

我國用過核燃料長程處置計畫  
第二階段增續工作計畫

小蘭嶼地質初勘  
報告書

尤崇極	鄧仁杰
施清芳	張福麟
張坤城	劉建麟
宋國良	

委託單位  
台灣電力公司  
核能廢料管理處

原子能委員會核能研究所

中華民國八十年五月

## 注 意

本系列報告係在台灣電力公司資助下，由原子能委員會核能研究所、經濟部中央地質調查所、及工業技術研究院能源與資源研究所，協力所完成者，其產權係屬台灣電力公司所有。

報告中之各項資料、數據，僅可用於中華民國境內之「用過核燃料長程處置計畫」今後工作之引用或參考。台灣電力公司及其協力者或任何參與本報告之工作者，對本報告之內容包括其正確性、完整性、適用性等不負任何法律責任，亦不負擔因引用或參考本報告致使其私人權益受到傷害之責任，任何責任概由引用者或參考者自行負責。

## 弁 言

用過核燃料之長程處置為核能發電後端營運重要的一環，早於民國七十二年原子能委員會、台灣電力公司、核能研究所、中央地質調查所及能源與資源研究所即共同組成工作小組，擬訂“我國核子反應器用過燃料處理研究計畫書”，並由台電公司報請行政院核定實施。

核能電廠用過燃料因具有長時間高放射性及高衰變熱能之特性，故其處置必需考慮長期之安全性。目前國際間雖有直接處置及燃料經過再處理二種方式，但均以在設廠國家境內選址作深層地質處置為目標而進行研究。鑒於當前環保意識之高張及其對未來能源策略之影響，世界各核能發電國家莫不投入大量經費及人力進行此等研究。我國則於民國七十六年設立“台灣電力公司核能發電後端營運費用基金收支保管及運用辦法”以為肆應。

民國七十五年台電公司委託核能研究所主辦“我國用過核燃料長程處置技術發展分項計畫”，為期二年，由能資所及地調所協辦，計完成場址準則、場址調查及處置場設計概念等之研訂，是為本計畫之第一階段。

民國七十七年台電公司委託核研所會同地調所、能資所及清華大學共同執行“用過核燃料長程處置第二階段工作計畫”，亦為期二年。規劃全程工作內容與時程及相關之管理計畫、國際合作、人才培育、資料整合、品質保證及社會溝通等配合工作，並進行地質驗證調查、離島地質調查及調查區域評選等工作。

民國七十九年台電公司再度委託核研所會同地調所及能資所執行本計畫第二階段之增續工作，以增補、修正、說明及答辯已提出之報告書，並進行功能評估模式研究、小離島地質初勘、低放射性廢料最終處置場址準則與評選草案之研擬及撰寫區域地質調查技術規範書等工作。

溯自執行本計畫第二階段工作以來，計畫同仁殫精竭慮，集思廣益，在國內法律、政治、經濟、社會、管理、環保、地科、核工、化學等專家學者三十餘位之指導及美國Roy F. Weston, Inc. 與瑞典Nuclear Fuel And Waste Management Co. 二家顧問公司之協助下，已圓滿達成台電公司之委託要求，計先後完成中文研究報告二十九種及英文研究報告二十五種。各項再委託案由中央研究院地球科

學研究所、中國地質學會、中央大學地球物理研究所、台灣大學地質系及台大慶齡工業研究中心等所提出之研究報告均列為附件，尚不包括在內。而與國外顧問公司進行技術交流會議 (Technical Exchange Meeting) 所撰寫之資料文件亦未計入。

本計畫執行期間蒙 台電公司大力支援及提供寶貴意見，各協同單位長官之指導，同仁之合作及地質調查地區有關單位之後勤支援，更為本計畫達成任務所不可或缺之助力，均此誌謝。

我國用過核燃料長程  
處置計畫第二階段及 宋國良 謹識  
增續工作計畫主持人

民國八十年七月一日

## 摘 要

小蘭嶼為蘭嶼南方約3海哩處的無人小島，滿潮時面積約0.94平方公里。島之南面有約十多公尺高之谷口地形，坡度頗為平緩。北面也有一平緩斜坡之谷口地形，其餘則皆為陡峭山壁。島之中央則為火山口，島上最高點位於東側中央偏南處，標高174.9公尺。小蘭嶼為火山島，火山口之地形仍然可見。最大者位於島居中之右側，直徑約200公尺，深45公尺。

小蘭嶼之氣候條件與蘭嶼相似，年平均溫度為22.6°C，最高與最低之月平均溫度分別出現在七月（26.2°C）與一月（18.2°C），年平均溫差不大。年平均降雨量與蒸發量分別為3070公厘與1454公厘，屬於多雨的地區。小蘭嶼孤懸海中，除了受冬季與夏季之季風吹襲外，亦常受颱風襲擊。

小蘭嶼與蘭嶼、綠島同屬於呂宋弧的一部分，係由島弧岩漿噴發形成的島嶼，但是其岩石種類不似蘭嶼者複雜，故小蘭嶼的形成過程中較為單純。島上的岩石以含黑雲母安山岩為主，全島除了陡峭之山壁有新鮮之岩石露頭外，其餘均為草木覆蓋。在島之西北側的山壁發現有不連續現象，該處岩體並有輕微的摺曲及斷層。此外，在島之四周可以見到岩石崩落的跡象。根據鉀-氬定年的研究，發現小蘭嶼最老的岩石約為一百廿萬年，較蘭嶼年輕得多，而與綠島同屬上新世至近代的火成活動的產物。

小蘭嶼南北兩側之河谷地形，均為綠色植物所掩。由於河道很短，上下游總長不超過一公里，地形陡峭，因此除降雨期間，河道均呈乾涸狀。地下水的來源為雨水自地表直接滲入地下，尤其以火山口為地下水的主要補注區。由於全島僅在南側海岸有泉水自海崖處流出，因此研判地下水流向以往南為主，這對於將來的地下水監測與管制是較為有利的條件。

台灣東部地區為地震發生頻率較高地區，此乃因海洋板塊與大陸板塊在此處發生碰撞之故。根據統計，在台灣地區發生的地震，宜蘭至蘭嶼之間釋出之能量約佔70%。此外，小蘭嶼所在之菲律賓海洋板塊每年約以6.8公分的速率向西北方向移動。小蘭嶼地區預期在1000年內之地震將有60次的規模（ $M_b$ ）大於7，換言之，每年有百分之六的機率會發生規模大於7的地震。

小蘭嶼作為核廢料處置場的優點為島上無人居住及無任何礦產，且距離目前的蘭嶼貯存場較近，將來在管理與營運方面比較便利，尤其在運輸作業上（蘭嶼貯存場至小蘭嶼）所承受的風險較小。而經過初步評估，該島坡度平緩地區，應可容納低放射性核廢料處置設施。此外其周圍有流速強流量大的黑潮經過，而萬一有放射性物質外洩，黑潮亦能迅速予以稀釋，對環境造成的衝擊可以降到最小。同時也符合可能造成污染的設施集中管制的原則。再由地下水流向及分佈情況研判，未來設於島上之處置場較易水流排出之廢水予以集中監測，亦應為一有利條件。以人口密度及社會經濟等條件而言，預期在社會溝通方面的困難此處可能比其他各離島（如澎湖羣島）為小。而低放射性核廢料處置場，由於安全年限約為三百年至五百年，且不若核電廠之脆弱，若干地質的不利條件似可以工程方法加以補救。

## ABSTRACT

Hsiaolanyu, an uninhabited island, is located about 3 nautical miles to the south of Lanyu with a total area of 0.94 square kilometers at high tide. "Hsiao" means small in Chinese. There are valleys with gentle slopes dipping towards both southern and northern coasts while precipitous cliffs fringe the rest of the islet. Several volcanic craters are found at the middle part. The largest one has a diameter of 200 m and a depth of 45 m.

The climate of this islet is similar to that of Lanyu. The annual average temperature is 22.6°C. The highest and lowest monthly average temperature occur in July (26.2°C) and January (18.2°C) respectively. The annual average precipitation and evaporation are 3070 mm and 1454 mm respectively. In addition to strong winds in the winter and summer seasons, Hsiaolanyu is also frequently stricken by typhoons.

Hsiaolanyu, Lanyu and Lutao are a part of the Luzon Arc. The rock of Hsiaolanyu is not as complex as the Lanyu. The major type of rock on this islet is biotite andesite. Fresh outcrops are mostly found on cliffs but to heavy coverage of vegetation at other places. There is a minor fault in association with folding on the cliff at the northwestern coast. Rock debris on the slope is cliffs is commonly found. According to the K-Ar dating, the oldest rock of Hsiaolanyu is about 1.2 m.y., younger than that of Lanyu. It is a result of the igneous activity from the Pliocene to the Pleistocene that also occurred in Lutao.

The valleys at the southern and northern sides are covered with plants. The course of an intermittent river is short, with a total length of less than one kilometer. The high gradient and short course make the river always dry except during raining season. The groundwater comes mostly from the infiltration of meteoric water. Crater basins are major recharging areas. Groundwater flows in general southward. Places at the southern coast are often found where water seeps out. This may be a favorable condition for the monitoring and management of groundwater, in case a repository is to be constructed at Hsiaolanyu.

The eastern part of Taiwan suffers frequent earthquakes due to the collision of the Phillipine Sea Plate and the Eurasia Plate. The released energy from earthquakes occurred between Ilan County to Lanyu Island constitutes about 70% of

the total released energy from earthquakes occurred in Taiwan area. And the Philippine Sea Plate, where Hsiaolanyu is located, is moving towards northwest with a speed of 6.8 cm/yr. In the area of Hsiaolanyu, it is expected that there will be 60 earthquakes with a magnitude ( $M_D$ ) of greater than 7 in next 1,000 years. So the probability of an occurrence of an earthquake with a magnitude greater than 7 may be 6% every year.

A lack of inhabitants and mineral resources constitute favorable conditions for establishing a repository at Hsiaolanyu. In addition, Hsiaolanyu is located very close to Lanyu, it will be convenient and safe to transport the waste which is temporarily stored at Lanyu. Based on the preliminary survey, the gently sloped area may be large enough to build the repository. The Kuroshio Current flows from south to north with a high speed passing through the neighborhood of Hsiaolanyu. If by any chance the radionuclide leaks out, the contamination will be quickly diluted by the current and its impact to environment will be greatly reduced. This is also consistent with the policy that the hydrologic study of groundwater, it will be easier to monitor the groundwater. With respect to public acceptance, it is expected that more difficulties will be encountered if the repository is to be constructed in a place such as Penghu Islands. The normal life of a LLW repository is 300 to 500 years. Certain unfavorable factors of geology may be compensated by engineering barriers.

Keywords: Geography, Geology, Geochemistry, Hydrology and Earthquake

# 「小蘭嶼地質初勘報告」

## 目 錄

	頁 次
1. 前言 .....	1 - 1
2. 地理 .....	2 - 1
2.1 地理位置及交通 .....	2 - 1
2.2 地形 .....	2 - 1
2.3 氣候 .....	2 - 2
2.3.1 溫度 .....	2 - 2
2.3.2 降雨量 .....	2 - 2
2.3.3 蒸發量 .....	2 - 2
2.3.4 溼度 .....	2 - 3
2.3.5 風 .....	2 - 3
2.4 海流 .....	2 - 3
2.5 潮汐 .....	2 - 4
3. 地質 .....	3 - 1
3.1 地表地質 .....	3 - 2
3.2 地質構造 .....	3 - 3
4. 地球化學 .....	4 - 1
4.1 同位素地質 .....	4 - 2
4.2 岩石化學 .....	4 - 3
5. 水文概況 .....	5 - 1
5.1 地表概述 .....	5 - 1
5.1.1 地貌 .....	5 - 1
5.1.2 湖泊 .....	5 - 1
5.1.3 泉水 .....	5 - 1
5.2 水系及排水 .....	5 - 2
5.2.1 水系 .....	5 - 2

	頁 次
5.2.2 排水 .....	5 - 2
5.2.3 地下水概況 .....	5 - 3
5.2.4 水質背景 .....	5 - 3
5.3 潮流 .....	5 - 3
6. 天然資源 .....	6 - 1
7. 地震 .....	7 - 1
7.1 地震規模與能量 .....	7 - 1
7.2 震源機制 .....	7 - 2
7.3 大地構造與應力分佈 .....	7 - 2
7.4 地震頻率與最大可能加速度 .....	7 - 3
7.5 討論 .....	7 -24
8. 討論與結論 .....	8 - 1
9. 參考文獻 .....	9 - 1
附錄A .....	A - 1

## 圖 目 錄

		頁 次
圖2.1	小蘭嶼相關位置圖 .....	2 - 5
圖2.2	小蘭嶼地區地形圖 .....	2 - 6
圖2.3	小蘭嶼地區地形坡度分析圖 .....	2 - 7
圖2.4	颱風侵台路徑圖 .....	2 - 8
圖3.1	琉球－台灣－菲律賓島弧帶中之構造單元 .....	3 - 4
圖3.2	台灣東南外海海底等深線圖 .....	3 - 5
圖3.3	台灣東南外海海底地形分區圖 .....	3 - 6
圖3.4	綠島－蘭嶼－小蘭嶼安山岩之鉀鋇同位素定年結果 .....	3 - 7
圖3.5	小蘭嶼安山岩區包裹體中閃石類K-Mg/Fe 作圖並與小安底列斯 羣島比較 .....	3 - 8
圖3.6	岩石標本採樣位置圖 .....	3 - 9
圖3.7	小蘭嶼地質圖 .....	3 -10
圖4.1	台灣東部岩石區年輕岩樣（小於九百萬年）年代示意圖 .....	4 - 8
圖4.2	含黑雲母安山岩中共存礦物的鉀－鋇同位素含量比值圖 .....	4 - 9
圖4.3	安山岩包裹體中長石類之組成 .....	4 -10
圖4.4	A.安山岩包裹體斜輝石在Wo（矽灰石）－En（頑火輝石）－Fs （低鐵透輝石）三角圖中之分佈 B.安山岩包裹體直輝石在Ca-Mg-Fe三角圖中之分佈 .....	4 -11
圖4.5	東部地區安山岩包裹體中閃石類之K-Al作圖 .....	4 -12
圖4.6	東部安山岩石區包裹體中雲母在MgO- $\Sigma$ FeO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 三角圖中之 分佈 .....	4 -13
圖4.7	台灣東部海岸山脈、綠島、蘭嶼和小蘭嶼火成岩經球粒隕石基 準化的稀土元素圖 .....	4 -14
圖4.8	台灣東部海岸山脈、綠島、蘭嶼和小蘭嶼火成岩La對Th作圖 ..	4 -15
圖4.9	台灣東部海岸山脈、綠島、蘭嶼和小蘭嶼火成岩La對Ba作圖	4 -16

	頁 次
圖4.10 台灣東部海岸山脈、綠島、蘭嶼和小蘭嶼火成岩之Sr對 <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr 作圖 .....	4 -17
圖5.1 小蘭嶼南北方向地下水流示意圖 .....	5 - 5
圖5.2 三角水質當量圖 .....	5 - 6
圖7.1 台灣地區位置示意圖 .....	7 - 6
圖7.2 台灣地區之地震分佈 .....	7 - 7
圖7.3a 台灣地區之地震分佈, $M_L \geq 4$ .....	7 - 8
圖7.3b 台灣等次數地震圖, $M_L \geq 4$ .....	7 - 9
圖7.4 台灣地區分區之地震能量 .....	7 -10
圖7.5 台灣南部地區之合成斷層面解 .....	7 -11
圖7.6 選擇5個區域水平投影之最大及最小主應力分佈 .....	7 -12
圖7.7 台灣東部板塊運動示意圖 .....	7 -13
圖7.8 台灣東南區域選擇地震垂直分佈之剖面 .....	7 -14
圖7.9 圖7.8 投影在垂直面上之斷層面解 .....	7 -15
圖7.10 台灣附近海底地形分佈圖 .....	7 -17
圖7.11 台灣地區之地質圖 .....	7 -18
圖7.12 地震次數與震度之迴歸關係 .....	7 -19
圖7.13 台灣東南區域, 小蘭嶼淺震區B及東南部中層地震區A .....	7 -20
圖7.14 斷層與小蘭嶼之距離關係 .....	7 -21
圖7.15 台灣地區斷層長度與Richter 震度關係 .....	7 -22
圖7.16 台灣地區立體板塊構造示意圖 .....	7 -23

## 1. 前言

我國的核能發展雖然肇始於民國五十年，當時國立清華大學建造我國第一座水池式核子反應器（THOR），但是早在民國四十八年，我國即積極參與國際放射性待處理物料之安全處理方式與處理技術的有關活動。民國五十九年，我國決定興建第一座核能發電廠，行政院原子能委員會即於民國六十年，邀請本所、國立台灣大學海洋研究所、國立清華大學原子科學研究所及台灣電力公司等有關單位，組成放射性待處理物料技術小組，積極研擬適合我國環境之最佳管理策略。民國六十一年，本所在參照世界各國已有之放射性待處理物料技術與經驗後，自行設計建造完成我國第一座低放射性待處理物料廠；同年，放射性待處理物料技術小組亦開始對台澎地區陸地與海洋進行實地探勘，以尋求能確保人類與生活環境安全並符合經濟效益的貯存或處理方式。雖然投海棄置於穩定的海底沈積層之中有五千公尺深的海水作為天然屏障，與人類的活動空間保持相當安全的距離，並且也符合經濟效益，但是因倫敦公約的限制，各國均已停止海洋投擲的處理方式，我國亦不例外。因此，經過數年審慎地調查、研究與評估後，最後決定將貯存場設在蘭嶼南端人煙罕至的龍門地區。民國六十七年八月，國人自行設計之放射性待處理物料貯存場開始在蘭嶼施工興建。民國七十年元月，原能會正式成立放射性待處理物料管理處，以便管理監察全國放射性待處理物料，以保障人民之健康與安全，並於同年的九月，隨即派員進駐尚未完工之蘭嶼貯存場，配合各項工程之進度，展開監工與驗收之作業，同時也預先熟悉各項設備的運轉與作業流程。同年底，蘭嶼貯存場完工，待民國七十一年五月十九日第一批放射性待處理物料運抵蘭嶼貯存場起即正式展開運貯作業迄今，然而預估其貯存容量將在民國八十二年時達到飽合，因此目前有必要再尋找適當的地點作為核廢料的處置場，以有效且安全地解決核廢料的問題。

本計畫自79年10月至79年12月為地質調查階段，由於東北季風盛行，再加上小蘭嶼經常因空軍炸射演習而不能靠近，因此調查工作經常受到限制。本計畫工作同仁分別在十月與十一月前往小蘭嶼，總共進行了五次的地質調查作業，每次作業均以機動漁船載至小蘭嶼西岸外碇泊，再用塑膠筏搶灘登陸。由於東北季風

的影響，每次在島上的調查工作只有三～四小時，因此只能進行地表岩石樣本的採集，收集地下水及地形觀察與拍照等簡易之調查工作。報告之撰寫除了根據實際調查之結果加以描述外，並蒐集各相關文獻一併整理彙編完成。

小蘭嶼地質初勘作業能順利完成，必須要感謝蘭嶼貯存場全體同仁的協助，尤其是場長鄭崇賢先生悉心地安排及照顧，給予我們相當多的便利與尊重，在此表示謝意。另外，對於蘭嶼港區警察及駐軍指揮官的全力協助，也在此一併致謝。

## 2. 地理

### 2.1 地理位置及交通

小蘭嶼位於東經 $121^{\circ} 35'30''\sim 121^{\circ} 36'30''$ ，北緯 $21^{\circ} 56'30''\sim 21^{\circ} 57'30''$ ，北距蘭嶼約3 海浬（圖2.1）。該小島隸屬於台東縣蘭嶼鄉紅頭村，滿潮時面積約為0.94平方公里，退潮時約為1.12平方公里，至今仍是一個無人島。從台灣至小蘭嶼之交通，可先至台東搭乘台灣或永興航空公司飛機至蘭嶼，行程約25分鐘，再由開元港租乘一般機動漁船出海，船程約2小時便可到達目的地（照片1）。

。

### 2.2 地形

小蘭嶼之形狀略呈方形（圖2.2），最長一邊約1.2 公里，為一個火山島。保存有極完整之最新期火山岩，主要由集塊岩與安山岩所構成。全島四周由於受到海蝕之結果，常造成陡峻之山崖，在東側有高達100 公尺者（照片2）。祇有北側（照片3）與南側（照片4）有較寬之海岸平地，於東北季風期筏舟可於西側海岸處搶灘登陸。根據坡度分析（圖2.3），小蘭嶼地形坡度可分為如下五級：

第一級坡度  $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ ，佔總面積 14.7%。

第二級坡度  $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ，佔總面積 33.3%。

第三級坡度  $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ，佔總面積 18.0%。

第四級坡度  $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ，佔總面積 17.3%。

第五級坡度  $40^{\circ}$  以上，佔總面積 16.7%。

由以上統計數字可看出，小蘭嶼地形坡度在 $20^{\circ}$  以內者約佔全島面積之半。這些地區主要分佈在島中央附近，而坡度大於 $40^{\circ}$  者亦佔有相當大的比例，主要分佈於島之四周。

小蘭嶼之四周有山稜，最高點位於東側中央偏南，標高為174.9 公尺之小紅頭嶼，第二高峰位於小紅頭嶼南方約175 公尺，高度為166 公尺，第三高峰位於東北角，高為142.3 公尺，第四高峰位於西南角，高約139 公尺，第五高峰位於西北角，高為104 公尺。這幾個高峰構成了小蘭嶼主要之山稜地形。此等山稜乃

為火山口壁，其中間有盆地狀之火山口。

在島中央有兩個相鄰甚近之火山口，使得該地區呈現一大窪地。其位於東側者最大，直徑約200公尺，深約45公尺（照片5），西側者為較老之火山口，直徑約110公尺，深亦約45公尺。此外，另尚有兩個爆裂型火山口；其位於東北角者，直徑約100公尺，附近地形比較平緩，深度很淺，其方向乃向東傾斜；其位於東南角者，直徑約40公尺，深度約20公尺，火山口中樹木叢生。

## 2.3 氣候

小蘭嶼位於台灣東南端，與蘭嶼相距只有3海哩，其氣候類型和蘭嶼一樣，屬於濕熱多雨的型態。目前中央氣象局在蘭嶼設有氣候測站一所。茲將歷年各項氣象統計資料，包括每月之總降雨量、月平均溫度、相對濕度等，列於表2.1。

### 2.3.1 氣溫

小蘭嶼由於四周環海，故每月溫差不大，年平均氣溫為22.6℃，除冬季（十二、一、二月）平均溫度略低於20℃外其餘皆在20℃以上。盛夏期間最高氣溫有時可達40℃，所幸有海風不斷地吹送，故亦無酷暑之苦。該小島全年以一月份平均氣溫最低，為18.2℃，七月份最高為26.2℃。

### 2.3.2 降雨量

根據統計，歷年年平均降雨量為3070公厘，全年降雨日數超過200天，降雨量以九月份最多，為384.4公厘，三月份最少，為159.0公厘，雨量之豐在全省僅次於基隆地區。

### 2.3.3 蒸發量

歷年各月平均蒸發量以二月份的86.8公厘最少，最多為七月份的156.1公厘，年平均蒸發量約在1454公厘。

#### 2.3.4 濕度

小蘭嶼屬於高濕度的地區。根據歷年統計，年平均相對濕度高達90%。其中以六月份的94%最高，一月和十二月份的86%最低。

#### 2.3.5 風

小蘭嶼孤懸海中，受風影響範圍大，冬夏季風交替吹襲，恆定而持續，尤以東北季風最為強勁，夏秋又有颱風肆虐。

冬季季風盛行於10~3月間，恆定、強勁、且持續控制該小島六個月之久，風力常達蒲福6~7級間，10~12級風也屢見不鮮。5、6月間為冬夏季風轉換季節，一般風力稍弱，在蒲福風力2~4級間，最大也可達6、7級，風向善變，恆定度小。夏季季風盛行於6~9月間。其威力遠在冬季季風之下，一般在蒲福4~5級間。9、10月為夏冬季風轉換時期，風向不定，風力則隨風向而異，通常東北向大於西南向，前者在蒲福5~7級間，後者則在蒲福3~4級間。

小蘭嶼亦常常遭受颱風襲擊。根據統計，近二十五年（1961~1985）來，侵襲台灣地區之颱風而造成較大災害有88次，每年平均三至四次。颱風最早出現在四月，而在十一月結束。這些侵台的颱風路徑，大致可分為如圖2.4所示的七類。在這些分類中，以第四路徑發生次數最多，計有27次。各路徑逐月統計發生次數如表2.2。又依颱風的強度劃分，在88次侵台之颱風中，強烈颱風有42次，中度颱風有32次，輕度颱風有14次。表2.3為各路徑颱風強度發生次數表。

在圖2.4之路徑分類中，第三、四、五路徑都可能影響到小蘭嶼。在88次侵台次數中，經過小蘭嶼的次數就有45次，平均每年有兩次以上。在45次中，強烈颱風就有22次，也就是說，侵襲小蘭嶼之颱風，平均每兩次就有一次是強烈颱風。若依月份分配，則以九月份發生次數最多，計有10次，各月統計如表2.4。

#### 2.4 海流

台灣東部外海，為有黑潮主流通過，黑潮的水溫、鹽度與密度均比一般海水的平均值高。黑潮原為北太平洋之北赤道吹送流，自菲律賓東部轉向北流，經過呂宋北方諸島及、小蘭嶼、蘭嶼、綠島海面，最遠到達日本附近海域，幅廣100

至200公里之間。

冬季（10~4月）黑潮自菲律賓東岸北上，至巴士海峽裂分為二支。主流北北東向，經小蘭嶼、蘭嶼、台灣、琉球入東海，而以接近海岸外流速較大。在小蘭嶼附近海面的流速為0.8~1.5節（40~75cm/s）。此期黑潮流速較低，因其流向與強勁之東北季風相逆而抵消之結果。

四至六月流速漸增，四月時的流速為0.8~2.0節（40~100cm/s），六月時可達1.0~3.0節（50~150cm/s），此乃與日漸轉強之西南季風有關。

夏季（6~9月）黑潮流速增強，乃因為其流向與西南季風輻合。此時往南海的支流與南海表層之季風流混合，流向為東北，由南海、巴士海峽抵台灣東南海面與主流會合，其勢益振。在小蘭嶼附近，其流速約達1.0~3.0節（50~150cm/s）。

九至十月西南季風減弱，故黑潮流速又告降低，介0.8~1.5節（40~75cm/s）間。黑潮深度可及600公尺，唯流速則與深度成反比。

## 2.5 潮汐

台灣沿岸之潮汐乃受太平洋潮流所左右，其方向係自東而西，故小蘭嶼的滿潮時間比台東略早，而台灣東岸又比西岸略早，前後相差達六小時。

潮汐自外海向沿岸增加，在小蘭嶼附近潮差屬中等。據李思根(1983)實測最高潮為5.8公尺，最低為2.3公尺，最大潮差3.5公尺。

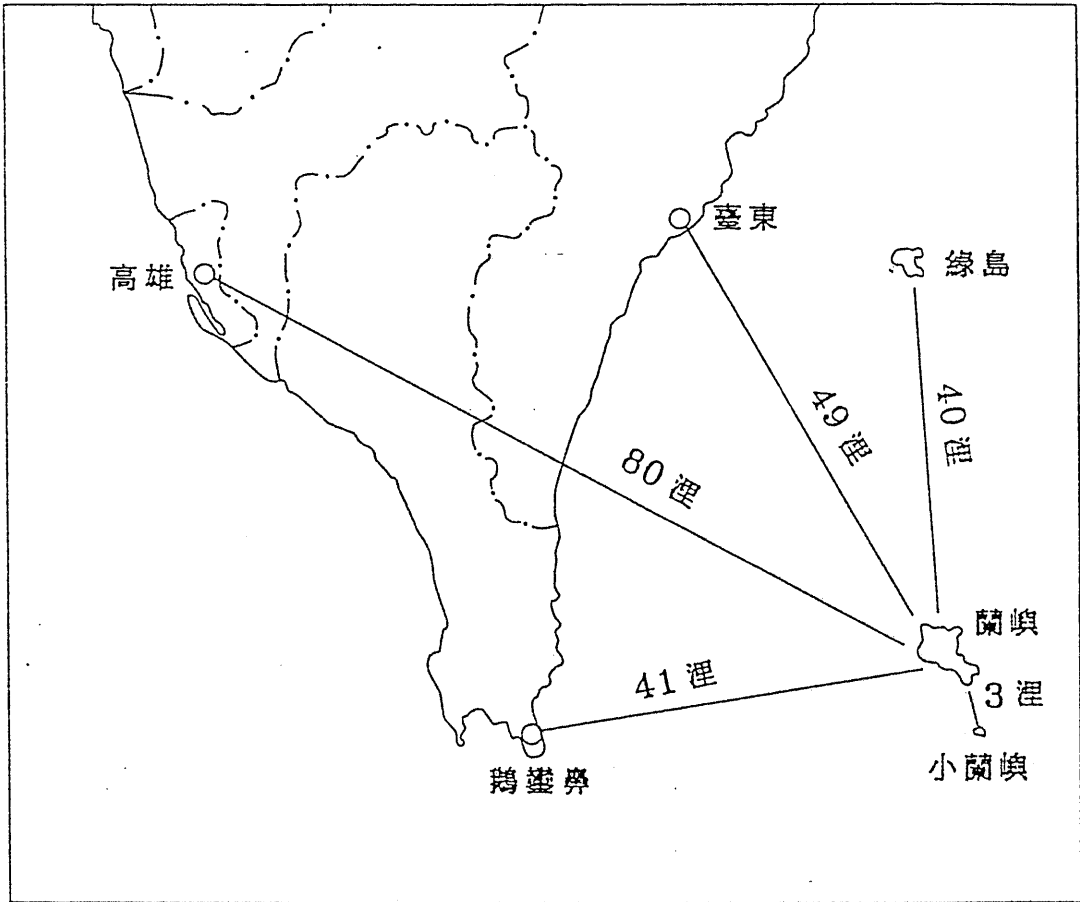


圖 2.1 小蘭嶼相關位置圖

比例尺  
SCALE

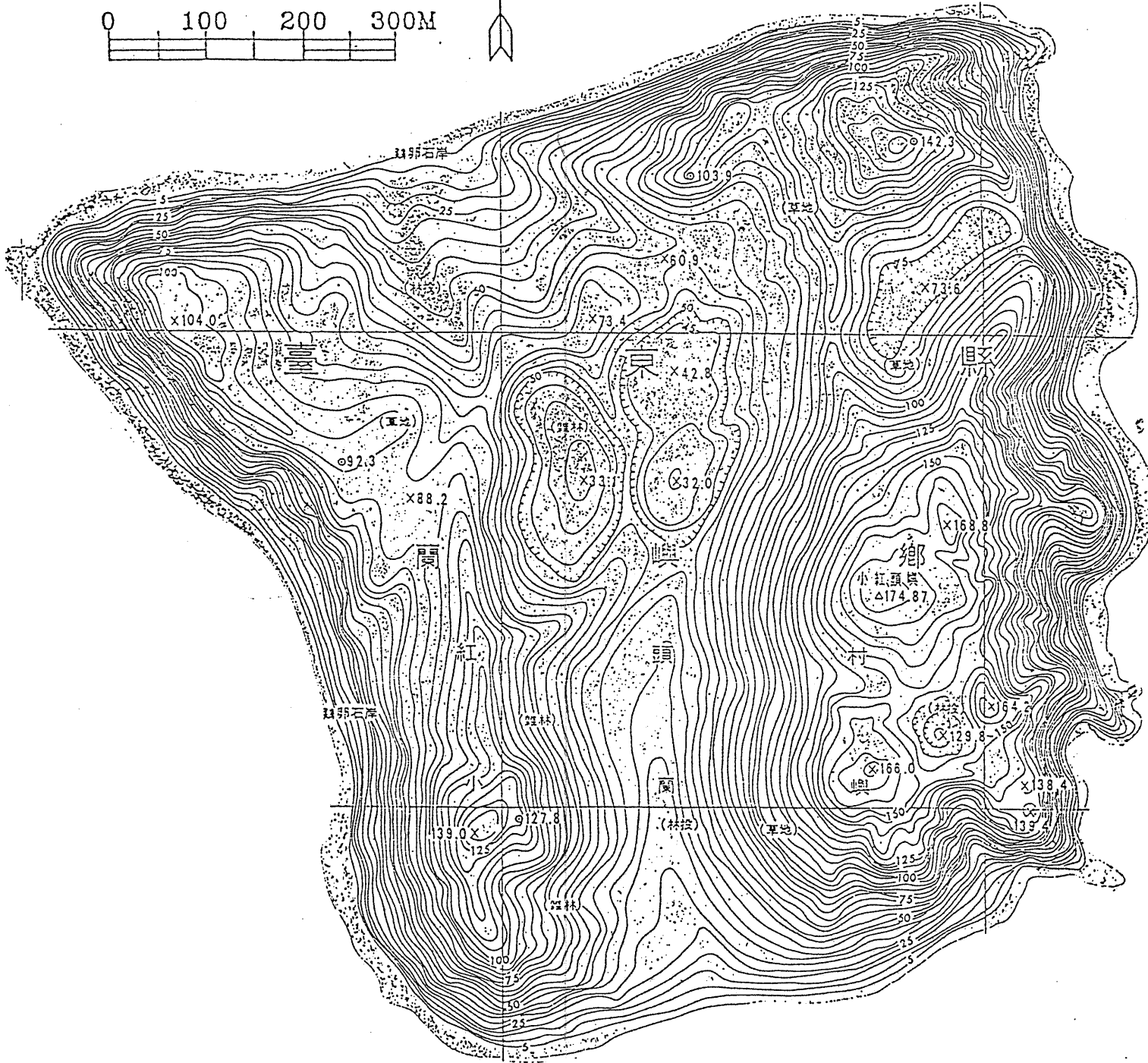
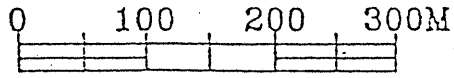


圖 2.2 小蘭嶼地區地形圖

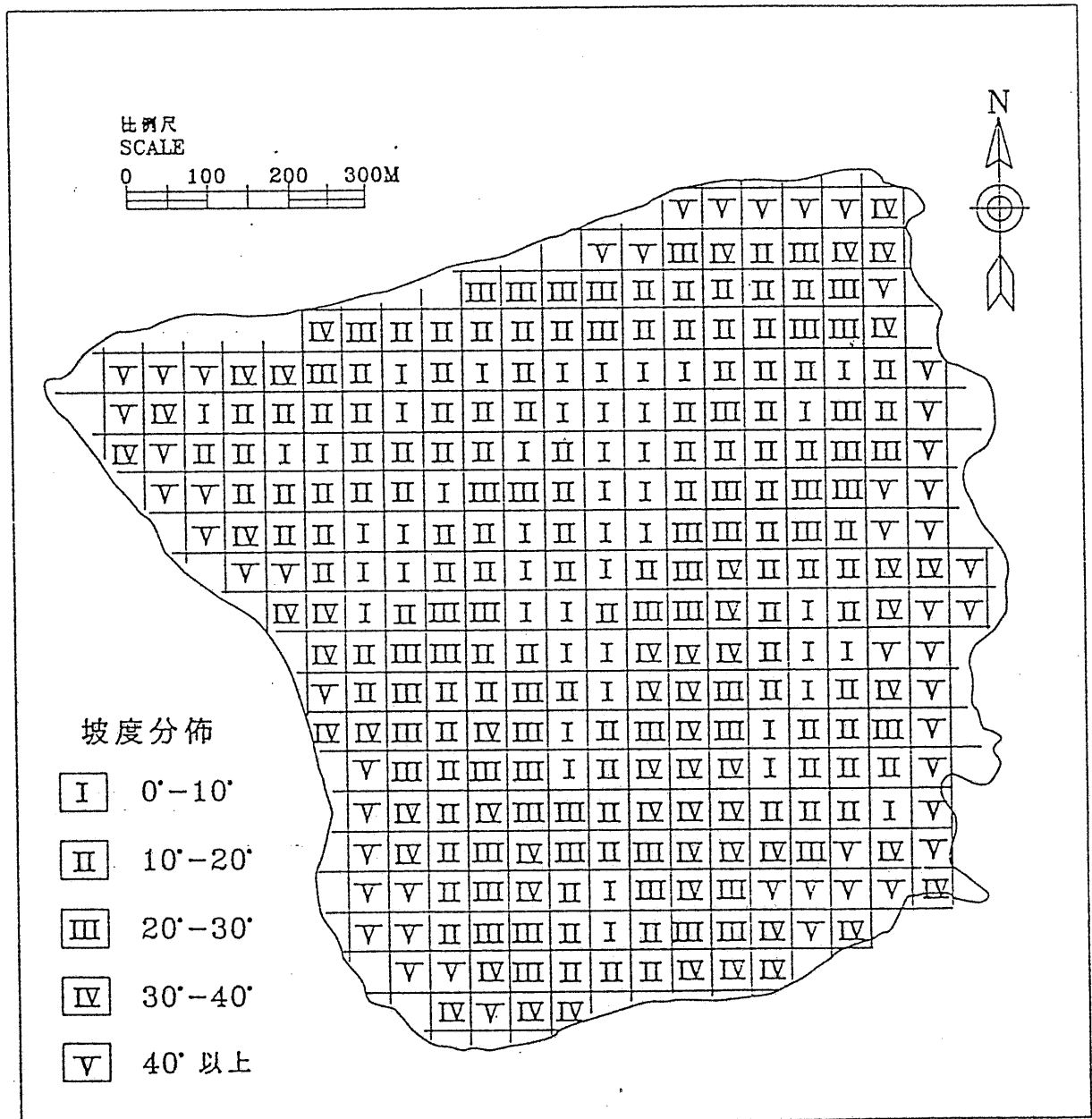


圖 2.3 小蘭嶼地區地形坡度分析圖

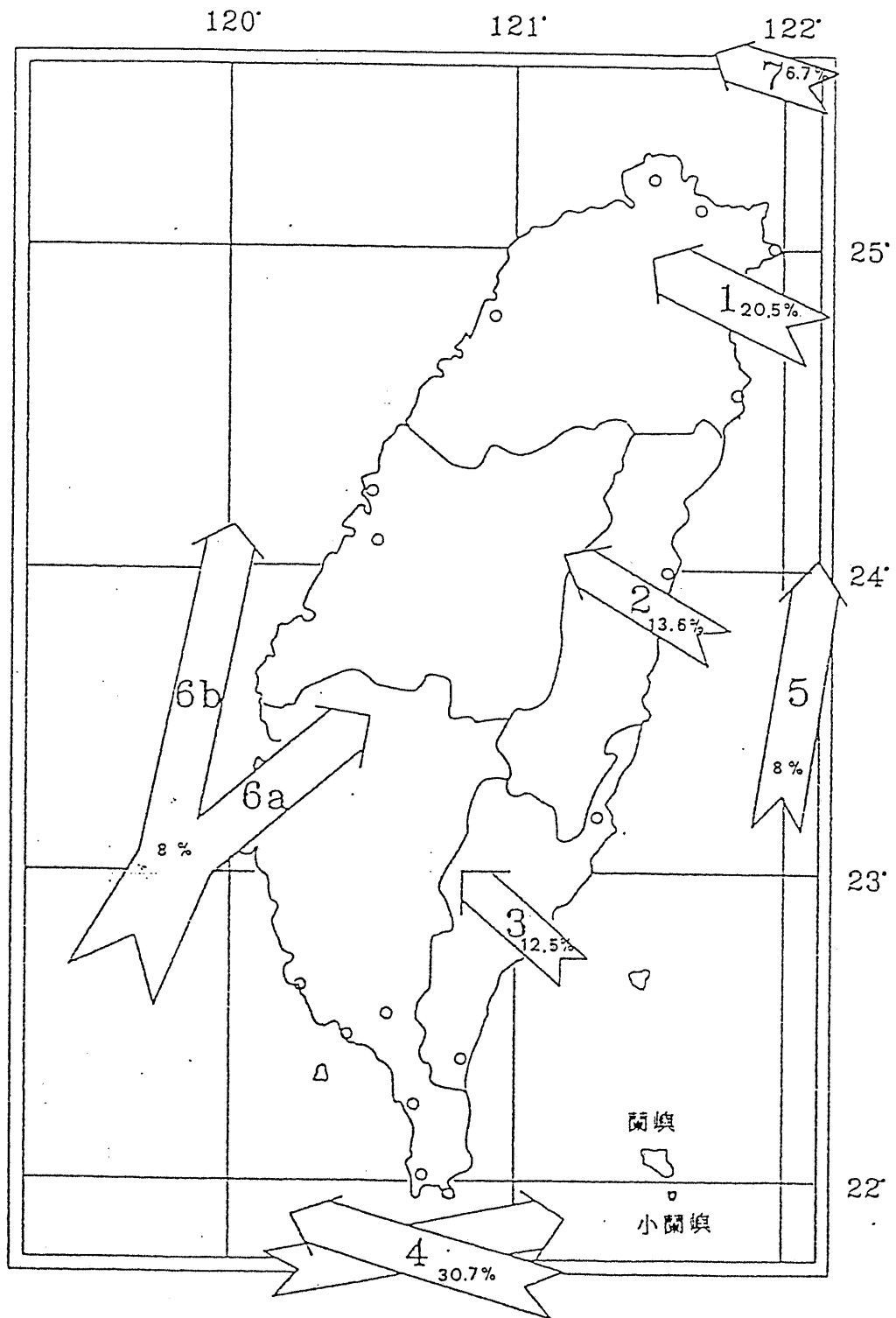


圖2.4 颱風侵台路徑圖

表2.1 小蘭嶼地區氣象資料

月 份	溫 度 (°C)	降 雨 量 (mm)	蒸 發 量 (mm)	相 對 濕 度 %
一	18.2	253.0	106.5	86
二	18.8	224.4	86.8	90
三	20.4	159.0	104.8	90
四	22.5	169.3	115.8	91
五	24.4	254.0	121.9	93
六	25.6	272.6	123.4	94
七	26.2	240.0	156.1	92
八	25.8	273.0	144.0	93
九	25.3	384.4	136.9	91
十	23.8	334.6	133.0	89
十一	21.4	287.3	119.1	89
十二	19.1	219.1	105.6	89
年 總 量		3070.7	1453.9	

\* 統計年份 1971~1988

來 源：中央氣象局

表2.2 近廿五年來侵台颱風各路徑之每月發生次數統計表 (1961~1985)

月份 路徑	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二	合計	百分比
第 1 級						1	3	9	5				18	20.5
第 2 級							4	3	4	1			12	13.6
第 3 級					1	1	3	2	4				11	12.5
第 4 級				1		3	5	5	6	5	2		27	30.7
第 5 級							1	2		4			7	8.0
第 6 級					1	1	3	1		1			7	8.0
第 7 級							1	5					6	6.7
合 計				1	2	6	20	27	19	10	3		88	100

來源：中央氣象局

表2.3 侵台各路徑颱風強度統計表 (1961~1985)

路 徑	第1級	第2級	第3級	第4級	第5級	第6級	第7級	合 計
強 烈	9	8	6	13	3	1	2	42
中 度	4	4	5	8	4	3	4	32
輕 度	5	-	-	6	-	3	-	14
合 計	18	12	11	27	7	7	6	88

來源：中央氣象局

表2.4 侵襲小蘭嶼颱風次數各月統計表 (1961~1985)

月 份	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二	合計
次 數	0	0	0	1	1	4	9	9	10	9	2	0	45
百分比	0	0	0	2.2	2.2	9.0	20.0	20.0	22.2	20.0	4.4	0	100

來源：中央氣象局

### 3. 地質

小蘭嶼是呂宋火山島弧北延南北向的火山帶（圖3.1）。在這個南北向的火山帶中，蘭嶼角閃石安山岩依K-Ar定年為中新世（11.2m.y），小蘭嶼為更新世（1.19m.y），南端呂宋島為現代活火山，因之時代愈北愈老，愈南愈新（Ho.1986）。位於歐亞大陸板塊上的地殼向東隱沒到菲律賓海板塊上的呂宋火山弧海洋地殼之下的現象，這是因為島弧中的火山弧位於板塊縫合線的東面，所以板塊隱沒作用的方向是由西向東。最初南中國海的海洋地殼原由呂宋島向北延伸到台灣大陸邊緣東側的歐亞大陸板塊之上，在歐亞大陸板塊向東隱沒的時候，這個南中國海盆即逐漸向東消滅在呂宋火山島弧之下。因兩板塊不斷擠壓而抬升隆起，構造上加高增厚，造成位於馬尼拉海溝和呂宋海槽間的增積岩體。

南中國海岩石圈隱沒到台灣南方的呂宋島弧之下而形成的，馬尼拉海溝是一個狹窄的深海溝，並位於西呂宋海槽之西。兩者間為一狹小的海脊分隔。Ludwig (1979)指出有充填沈積物的馬尼拉海溝可以向北追蹤到北緯二十二度，就是台灣最南部的西側。

畢慶昌 (1972a)及Murphy(1973)曾提出馬尼拉海溝向北延伸到台灣的說法。畢氏 (1972a)認為屏東谷地是馬尼拉海溝向北延伸到台灣陸上的一部份。他並指出具有相當高度的海底崖坡可以由馬尼拉海溝的內壁一直向北延長到台灣最南端恆春半島的西海岸。屏東谷地的東緣可能向南與這個海底崖坡及馬尼拉海溝的內壁相對比。最近地質學者都同意馬尼拉海溝向北延伸到台灣的說法。

依海底地形等特徵（圖3.2），綠島—蘭嶼—巴浦耶海脊和台灣海岸山脈南延海脊間之海槽，由綠島往南逐漸變窄，而在小蘭嶼西方此二海脊已幾乎銜接（圖3.3）。從鉀—氫定年所得的年齡看來蘭嶼台灣海岸山脈火成活動，彼此間似有重疊之關係。舊期系列海岸山脈與蘭嶼之火成活動早從中新世早期開始至上新世早期結束；繼之而起者是新期系列綠島—小蘭嶼之火山活動，由上新世一直延續至更新世（圖3.4）。

依火成岩之鉀氫定年與岩石學研究，小蘭嶼安山岩之礦物和岩石化學組成之例証（表3.1）可以顯示富含黑雲母且不相容元素如鉀和鋁之含量有極顯著的增加

。此可能導因於上新世至現代北呂宋島弧地區由兩板塊（歐亞與菲律賓海）隱沒過渡碰撞時期中地殼增厚所造成之岩漿作用而成獨立分化系列（表3.2 及3.3）。屬於島弧鈣鹼系列的岩石，可能則受東南—西北方向構造擠壓作用之影響。咸信此擠壓作用與台灣本島延續至今的第四紀造山運動有關。

小蘭嶼安山岩則為角閃石+黑雲母+輝石+斜長石（照片6、7）。此等火成岩之基質常受綠泥石化，碳酸鹽化與黏土化作用。大部份的基質組成礦物均保持完整。而在島之西側安山岩富含包裹體聚晶團塊（照片8）顯著增多之外，尚有透長石(sanidine)斑晶出現。據莊文星（1988）研究，小蘭嶼和蘭嶼含角閃石之聚晶團塊之閃石類的組成分佈範圍較廣；閃石類中變化較大者為鉀元素。東部海岸山脈包裹體之鉀含量較低，而綠島及小蘭嶼則含有較高的鉀。其鉀含量較高係屬於鈣鹼岩系之母岩漿（圖3.5）。

### 3.1 地表地質

小蘭嶼主要是由四個火山口（圖3.6）噴出之角閃石黑雲母安山岩，熔岩流及集塊岩構成。島嶼中央地帶有兩個火山口並列成橢圓形狀的窪地，直徑約有200公尺。此兩火山口噴出達30—60公尺之熔岩。火山口之邊緣劃分為北向水系及南向水系之分水嶺。此兩水系顯示幼年期且乾涸無水（照片9）。北向與南向水系海岸邊緣（河道出海口）覆蓋著薄層沖積層及崩移岩錐堆積（照片10）（圖3.7，冊底內頁附圖）。

地表露頭有個特徵。面積方形之四個邊角山頭高峰或嶺線岩石露頭都呈暗紅色，其地貌凹谷為暗灰黑色並具有流動構造（照片11、12）。

集塊岩分佈在島之西側（動力筏登陸之地點，照片13），及東側少部分的河谷、邊緣亦有集塊岩呈零星棋式形之佈局。由暗灰色或黑灰色、形狀不規則之玄武岩質、安山岩質等火山碎屑及角礫膠結而成。集塊岩外表顏色及膠結程度與蘭嶼集塊岩有些差異。

在地質方面，小蘭嶼不同於蘭嶼的部分為：

- (1) 火山岩之不共容元素含量有顯著的增加。
- (2) 未受銅礦化作用及熱水換質之現象，岩石較新鮮。

- (3) 未有珊瑚礁出現，也沒有紅土層。
- (4) 安山岩中之鐵鎂含量較高。
- (5) 安山岩之包裹體，罕有超基性團塊的出現。
- (6) 地形明顯差異，小蘭嶼沒有海階地形。
- (7) 火成岩之基質組成物均保持完整。

### 3.2 地質構造

裂隙及破碎系統帶，一般岩石透水性分為完整岩石或岩石材料的初始透水性及具有裂隙岩石的次生透水性，對淺層岩盤而言，因火成岩解壓或長期風化的影響，裂隙較發達，但在深層岩盤則因裂隙的緊密度隨著深度而改變緊閉。但亦避免在較具有規模破碎系統帶進而將核種的遷移至人類可能接觸的環境。

在野外實地調查時，島上蔓草叢生，亦可能導致地質構造不易被發現。尤以東側岸邊地形陡峭，又受東北季風海浪之影響，動力筏屢次無法靠岸，竟無功而返，只得以船隻周圍拍攝照片供參考。

僅有一處位於西北海岸岩石有錯動（照片14）。此斷層面為西北三十二度走向，傾角向東北五十至六十度為正斷層，則可能僅是局部性小規模錯動而已。

至於節理在海崖上，有許多大規模的節理存在為高角度者居多。大部份傾角大於六十度以上。這些節理可能係因火山熔岩之冷卻收縮作用所造成的。

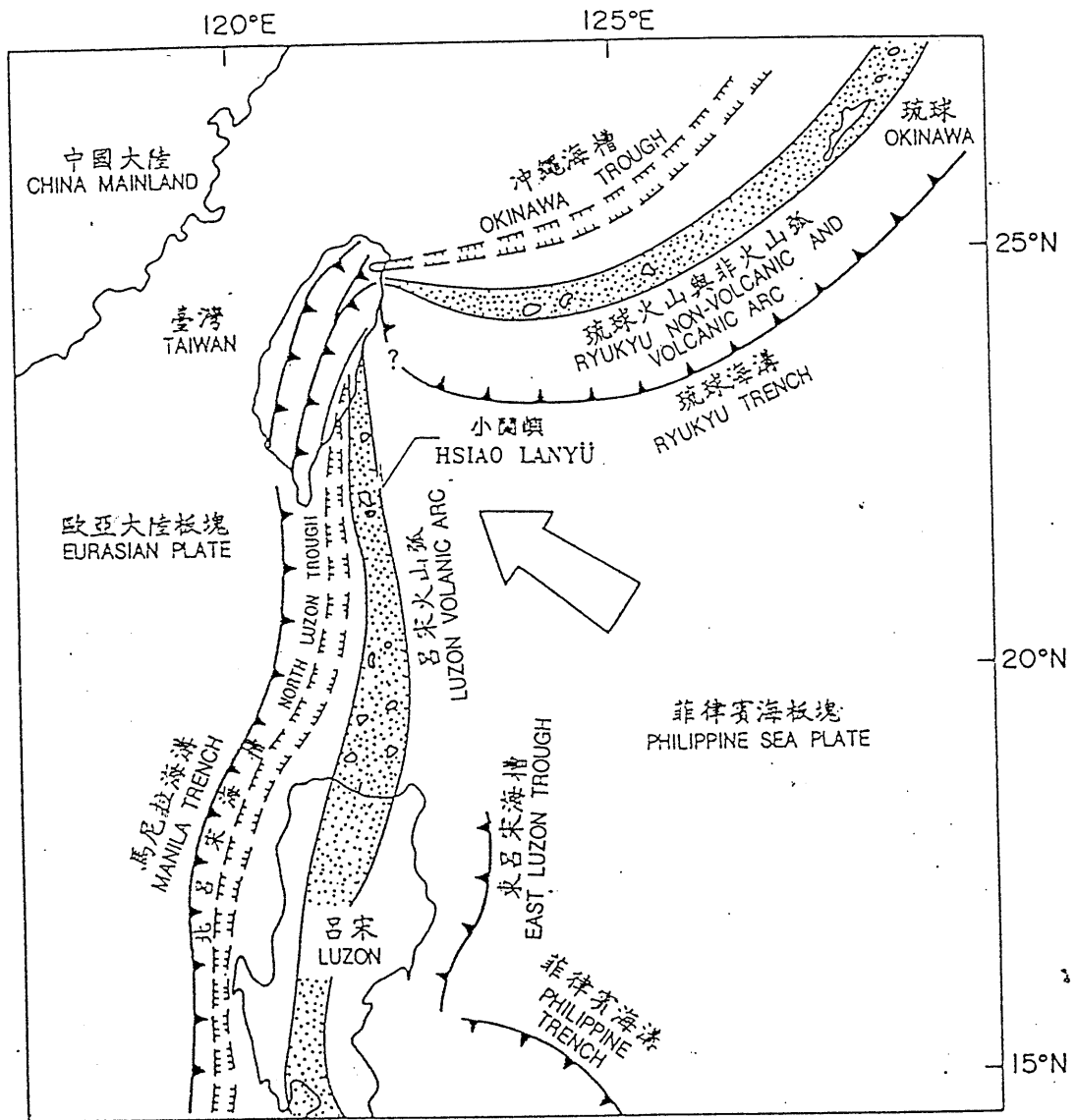
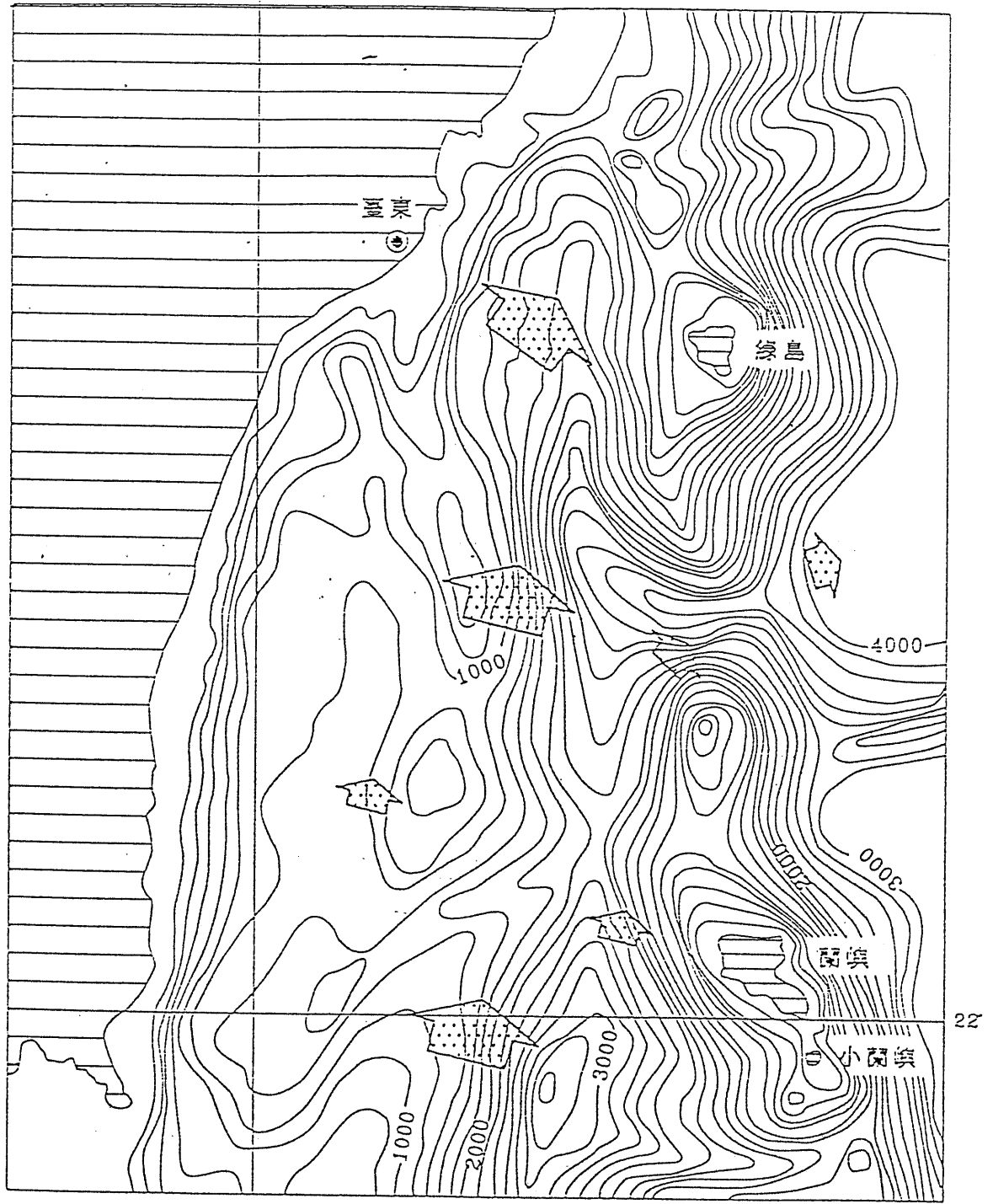


圖3.1 琉球-台灣-菲律賓島弧帶中之構造單元 (何, 1988)



121°  
 圖 3.2 臺灣東南外海海底等深線圖 為黑潮主流；水深單位為公尺  
 (原圖引自經濟部繪製臺灣地質圖)

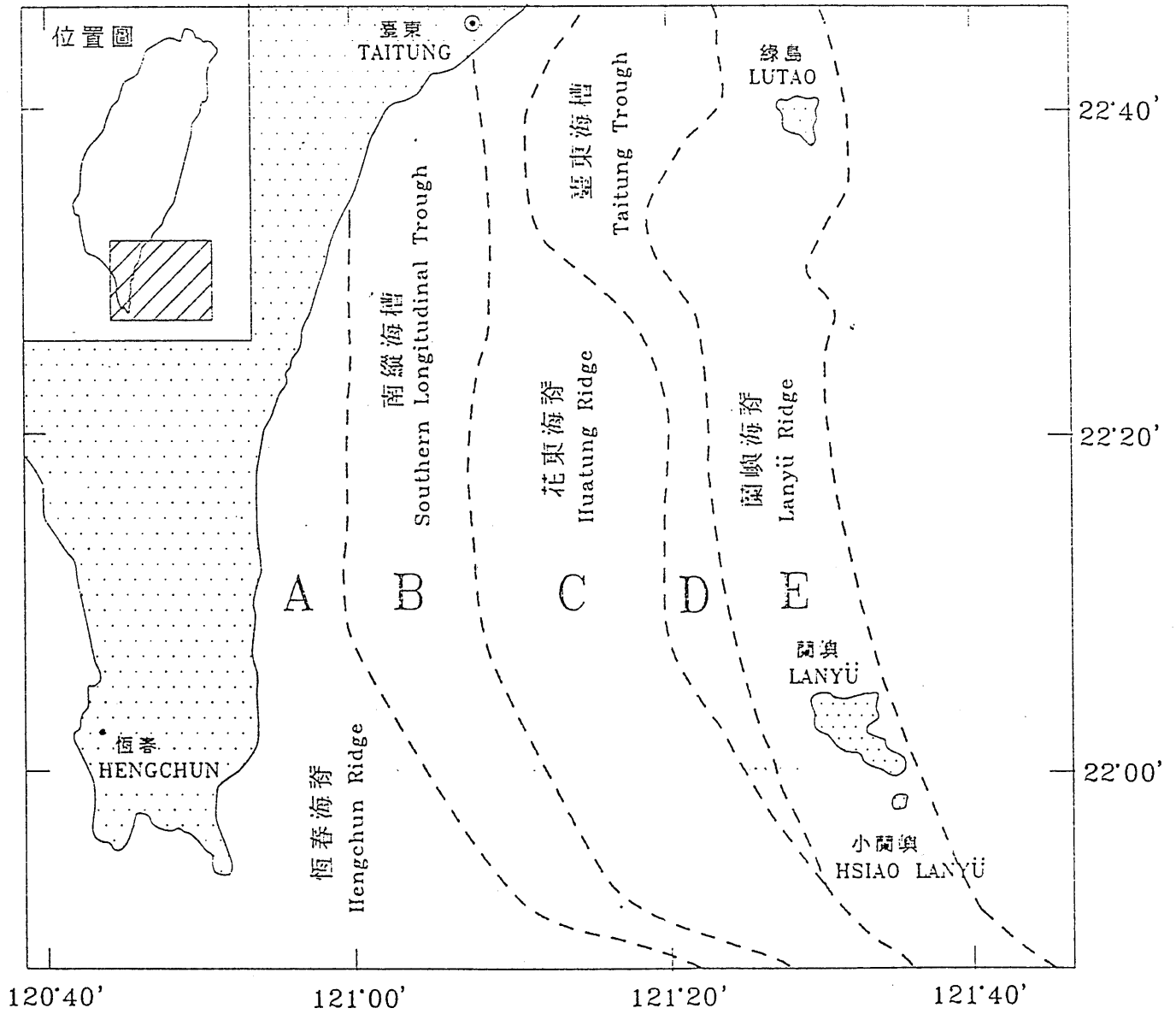


圖3.3 臺灣東南外海海底地形分區圖 (Chen et al., 1988)

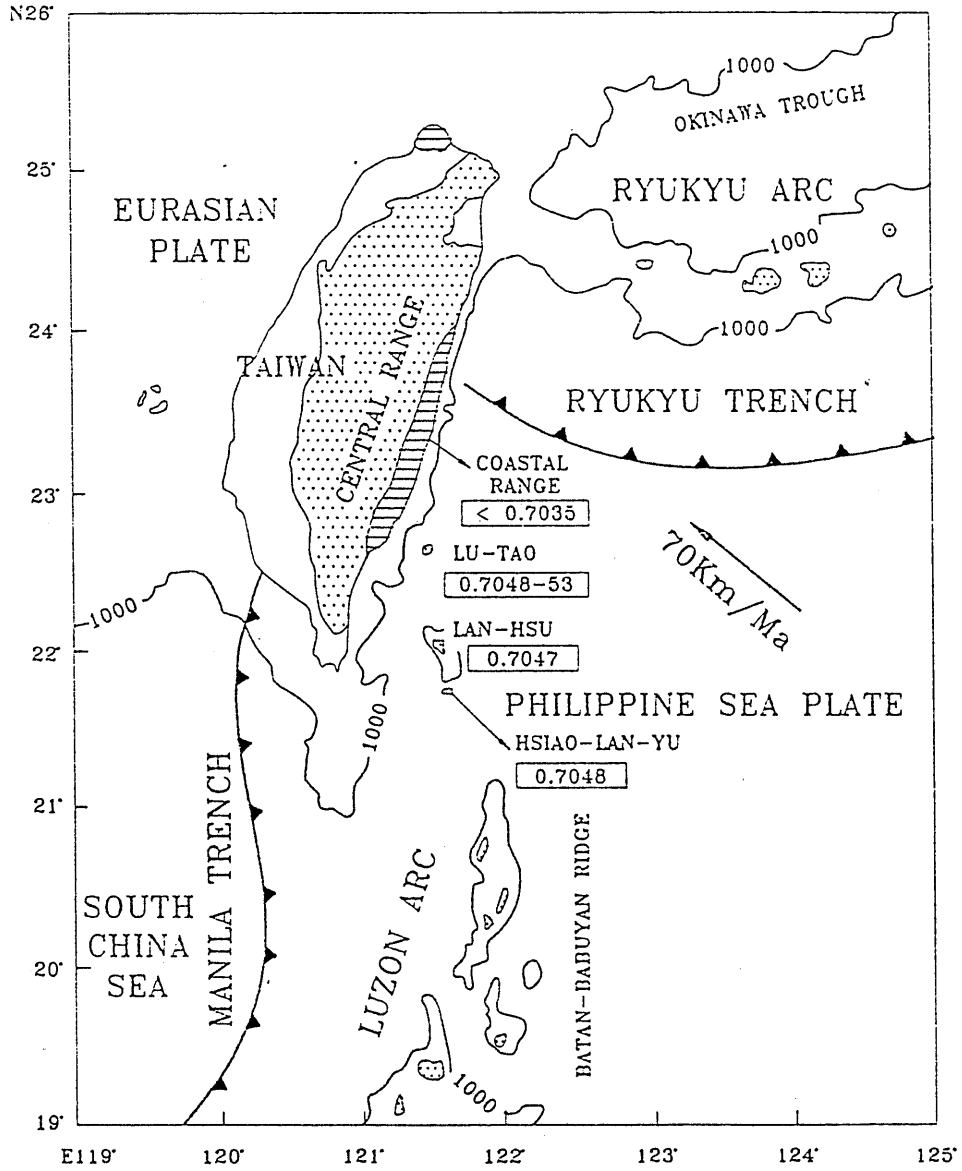


圖 3.4 綠島-蘭嶼-小蘭嶼安山岩之 Rb-Sr 同位素定年結果 (藍, 1986)

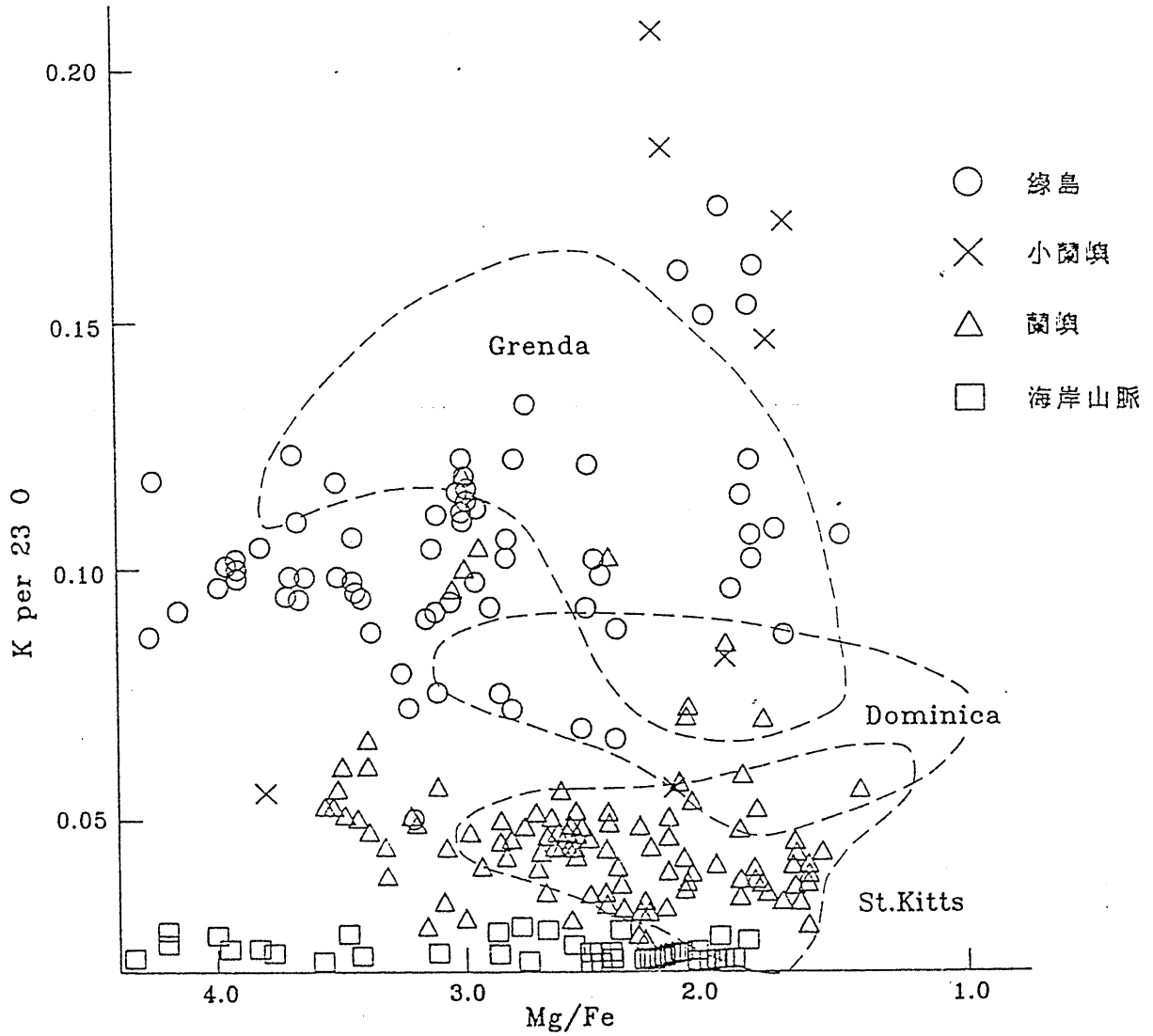


圖 3.5 小蘭嶼安山岩區包裹體中閃石類 K-Mg/Fe 作圖並與小安底列斯群島比較 (莊, 1988)

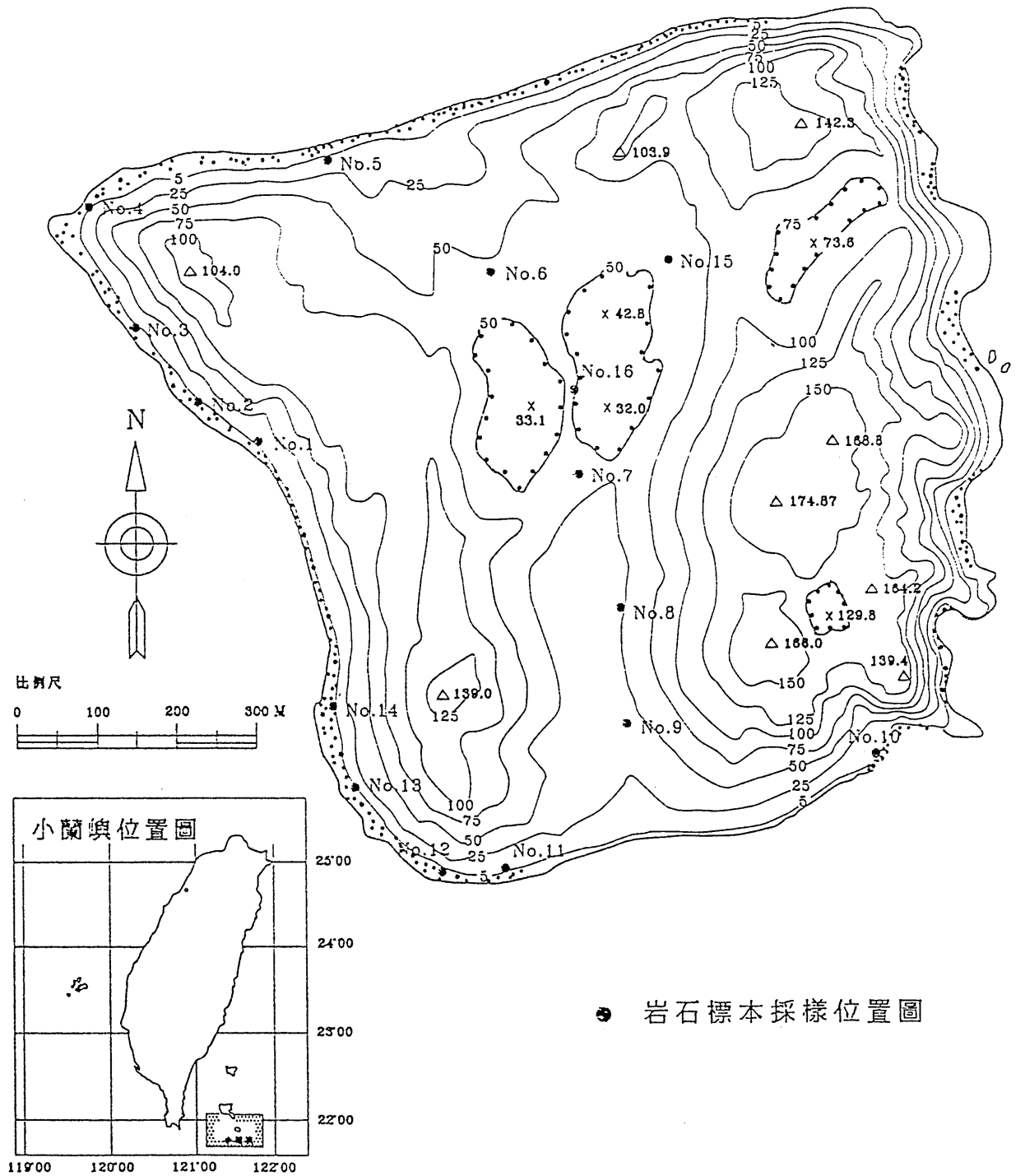
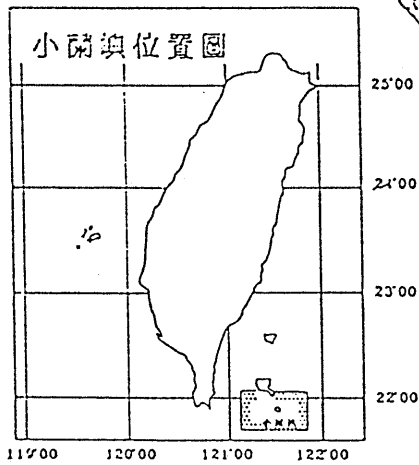
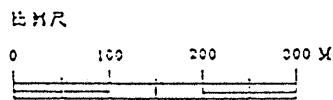
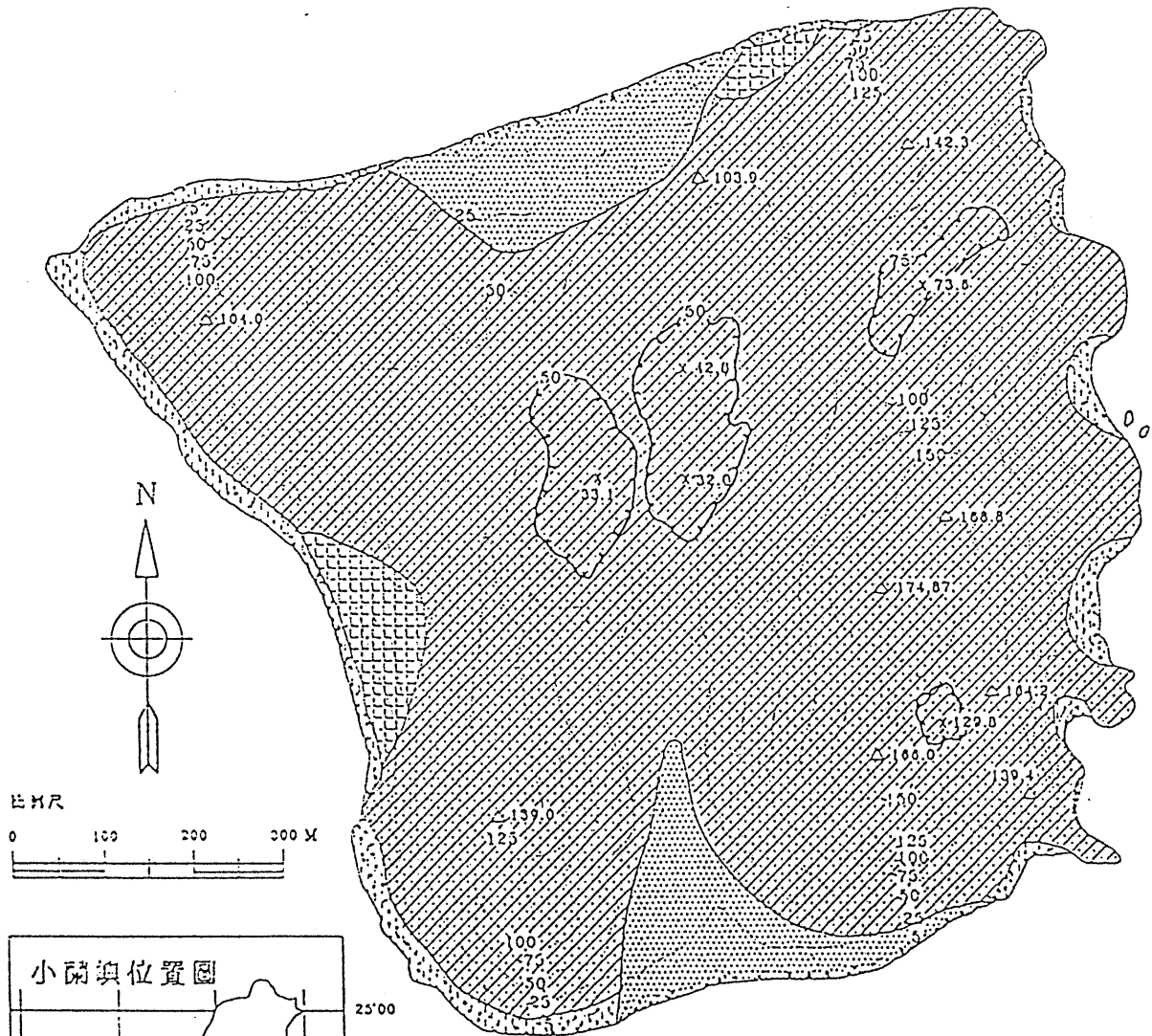


圖 3.6 岩石標本採樣位置圖

# 小蘭嶼地質圖

## GEOLOGIC MAP OF HSIAOLANYÜ



1:3.7 小比例尺圖

### 圖例 LEGEND





-  沖積層及片麻岩  
Alluvium, Talus Deposit
-  片麻岩  
Talus Deposit
-  塊狀岩  
Agglomerate
-  角閃石-黑雲母安山岩  
Hornblende - Biotite Andesite

表3.1 小蘭嶼安山岩與鄰近安山岩平均組成之比較

sample no element	HSIAOLANYU 小 蘭 嶼	LUTAO 綠 島	LANYU 蘭 嶼
SiO <sub>2</sub> (%)	58.30	59.93	57.24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	17.76	18.15	18.69
ΣFeO (%)	6.52	4.36	5.95
MgO (%)	4.28	3.61	3.97
CaO (%)	7.14	6.03	5.13
Na <sub>2</sub> O (%)	3.12	3.57	3.31
K <sub>2</sub> O (%)	1.60	1.73	0.75
TiO <sub>2</sub> (%)	0.61	0.44	0.46
MnO (%)	0.13	0.10	0.12
L.O.I. (%)	0.91	1.57	4.46
Total (%)	100.37	99.49	100.10
La (ppm)	33.82	24.21	9.95
Ce (ppm)	57.03	43.25	32.6
Nd (ppm)	27.53	22.25	19.15
Sm (ppm)	4.59	3.25	3.24
Eu (ppm)	1.18	0.92	0.81
Tb (ppm)	0.54	0.41	0.43
Yb (ppm)	2.19	1.53	1.48
Lu (ppm)	0.32	0.23	0.21
Hf (ppm)	2.93	2.91	2.51
Sc (ppm)	24.21	21.65	22.41
Th (ppm)	15.96	9.65	6.49

表3.2 東部安山岩區鉀-氬定年結果 (莊, 1988)

Sample no.	Age(m.y.) ± uncertainty	$^{40}\text{Ar}^*$ ( $\times 10$ moles/g)	$^{40}\text{Ar}^*$ <hr/> $^{40}\text{Ar}_T$	$\text{K}_2\text{O}$ (%)	Weight analysed(g)
綠島					
101(b)	1.62±0.08	1.7171	0.123	7.35	0.2647
223(b)	1.81±0.08	1.8687	0.167	7.15	0.3047
1104(b)	2.16±0.04	2.6579	0.370	8.53	0.2978
1104A(b)	1.90±0.02	2.067	0.347	7.53	
808(b)	1.81±0.05	1.6364	0.281	6.27	0.3517
101(hb,Xen)	4.83±0.43	0.2858	0.104	0.41	1.2263
108(hb)	5.20±0.26	0.06767	0.121	0.09	1.3443
441(W.R.,A)	2.39±0.08	0.5303	0.237	1.54	2.9377
221(W.R.,B)	1.43±0.03	0.3683	0.362	1.78	2.9172
444(W.R.,B)	1.31±0.01	0.1683	0.120	0.89	3.8522
442(W.R.,B)	0.84±0.06	0.1739	0.117	1.43	3.7651
小蘭嶼					
244(hb)	0.14±0.05	0.014	0.010	0.72	
245(hb)	1.19±0.05	0.1422	0.103	0.83	0.810
245(b)	0.14±0.05	0.1642	0.022	7.64	0.2845
蘭嶼					
282(hb)	13.5 ±2.0	0.4509	0.092	0.23	1.1153
230(hb,Peg)	11.2 ±1.0	0.2927	0.113	0.18	0.810
605(hb)	6.7 ±1.0	0.1845	0.115	0.19	1.2052
270(hb)	6.2 ±0.5	0.1879	0.124	0.21	1.0242
273(hb,Hbt)	3.66±0.18	0.1321	0.149	0.25	1.3847
264(hb)	5.76±0.43	0.1584	0.115	0.19	0.8533
411A(W.R.,B)	9.10±2.50	0.0856	0.035	0.065	2.4974
1002A(W.R.,B)	5.29±1.60	0.2139	0.013	0.28	3.2875
1003B(W.R.,B)	2.43±0.09	0.3823	0.210	1.09	3.5160
265(W.R.,A)	2.32±0.14	0.5428	0.102	1.62	3.5647
海岸山脈					
827(hb,Xen)	13.8 ±1.4	0.2194	0.100	0.11	0.8580
327(hb)	14.2 ±0.7	0.2052	0.147	0.10	1.0910

W.R.: 全岩(Whole rock); A: 安山岩(andesite); B: 玄武岩(basalt);  
 b: 黑雲母(biotite); hb: 角閃石(hornblende); Peg: 偉晶岩(Pegmatite);  
 Hbt: 角閃石岩(hornblendite); Xen: 捕獲岩(xenolith).

表3.3 島弧安山岩鉀-鋇同位素含量與定年結果 (Lan et al., 1986)

Sample no. Mineral	Weight (mg)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr*	Age <sup>†</sup> (Ma)
綠島角閃石黑雲母安山岩						
LT-7						
Amphibole A	9.7	9.4±.47	457.6±4.6	0.0590±.003	0.70609±4	(?)
B	4.8	3.3±.16	332.8±3.3	0.0288±.0014	0.70614±4	
Biotite	31.8	421.3±21	187.6±1.9	6.4963±.32	0.70570±4	
Plagioclase	3.3	3.5±.1	2280.0±68	0.0041±.00005	0.70483±4	9.4±0.9
LT-13						
Amphibole	12.2	8.6±.35	128.3±1.3	0.1939±.0078	0.70500±9	(3.4)
Biotite	20.5	327.2±9.9	72.4±.7	13.0739±.40	0.70563±4	
Plagioclase	3.3	4.2±.12	1547.0±46	0.0084±.00017	0.70510±4	2.9±0.5
LT-19						
Amphibole	9.9	4.3±.09	99.8±1	0.125±.0025	0.70478±11	
Biotite	7.6	694.3±7.0	52.9±.5	37.966±.385	0.70542±4	
Plagioclase	2.6	7.2±.22	1536.0±15	0.013±.0004	0.70481±4	1.1±0.2
LT-29I						
Amphibole	9.8	89.1±18	415.2±4.2	0.622±.12	0.70500±4	(4.0)
Biotite	20.4	706.5±22	181.0±1.8	11.296±.34	0.70560±4	
Plagioclase	3.0	95.0±9.5	1237.0±37	0.222±0.23	0.70524±4	2.3±0.5
小蘭嶼角閃石黑雲母安山岩						
SLY840246						
Amphibole	4.3	3.6±.04	194.0±2	0.0534±.0005	0.70490±6	(0.3)
Biotite	14.4	329.5±3.3	85.6±.86	11.1366±.11	0.70495±4	
Plagioclase	1.0	29.4±.65	2536.0±25	0.0335±.0007	0.70481±4	0.9±0.5
SLY840244						
Amphibole	3.8	6.2±.08	192.5±1.9	0.0929±.001	0.70478±15	(1.0±1.0)
Biotite	13.8	343.9±4.8	87.0±.9	11.4429±.16	0.70494±2	
Plagioclase	0.7	20.5±.4	2789.8±83	0.0212±.0004	0.70518±5	(?)
蘭嶼輝石安山岩						
LY-9						
Amphibole	10.7	0.55±.02	348.6±3.5	0.0046±.0001	0.70473±4	
Plagioclase	4.0	6.71±.13	739.3±7.4	0.0263±.0005	0.70471±4	
標準樣本						
BCR-1 (3 analyses)			331.0±0.3		0.70500±2	
NBS-987 (9 analyses)					0.710226±13	

\*Corrected for mass fractionation using the exponential law of Russell et al.(1978) by normalizing <sup>86</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr to 0.1194.

†Calculated from the slope of the tie-line between biotite and plagioclase. Ages calculated using amphiboles are given in parenthesis.

Half-life(<sup>87</sup>Rb)=1.42×10<sup>11</sup>y<sup>-1</sup>.

#### 4. 地球化學

小蘭嶼位於蘭嶼南方約3海裡，面積大約只有蘭嶼的四十五分之一。島上主要的岩石除了集塊岩外，就是含黑雲母角閃石安山岩。雖然綠島、蘭嶼及小蘭嶼距離台東海岸只有大約三、四十海裡，但是在地質構造上一般均認為應該屬於菲律賓呂宋弧（以下簡稱呂宋弧）的一部分。

呂宋弧略呈南北走向，全長約達1200公里。呂宋弧的北端止於台灣東部的海岸山脈南段；其南端則止於北緯十三度附近的塔布拉斯斷層。呂宋弧可細分為五個段 (Dedant et al., 1989)。其中台灣段即代表呂宋弧最北面的火山作用。它包括了海岸山脈及綠島、蘭嶼與小蘭嶼等三小島。若將呂宋弧概分為北中南三段，則呂宋弧北段，呂宋島北岸至台灣東南部海岸山脈，是向東凸出的弧形；南段，林加延－丁加藍斷層 (Lingayen-Dingalan fault)以南，則是向西凸出。呂宋弧的東邊自北往南是西菲律賓海板塊，東呂宋海槽與菲律賓海溝。西邊則是中國南海洋盆向東俯衝到呂宋地體之下所形成的馬尼拉海溝。此溝自民都洛 (Mindoro) 向北延伸至台灣西南外海附近，全長約達1300公里。在馬尼拉海溝與呂宋弧之間有北呂宋海槽與西呂宋海槽。呂宋弧的鈣鹼性熔岩以鉀－氬定年所得最老的年齡為一千萬年。在台灣海岸山脈以生物地層對比的方法推算其火山活動開始於一千三百萬年至一千四百萬年間，而北呂宋則稍早，為一千五百萬年。這些資料說明沿馬尼拉海溝的俯衝是緊隨於中國南海洋盆的擴張（約三千二百萬年至一千七百萬年前）。北面的呂宋微板塊和中國南海大陸邊緣之間的碰撞可能發生在七百萬年前，而南面的民都洛－巴拉望 (Palawan)地體之間的碰撞則更早，大約在一千萬至一千五百萬年前。晚中新世或上新世期間，民都洛的碰撞停止，而台灣的碰撞則剛開始並且在繼續進行中。Chen (1975, 1976)，Chen and Lin (1980) 曾分別針對海岸山脈安山岩，蘭嶼安山岩與綠島安山岩的地球化學研究提出其岩石化學的特徵並推測其發生的前因後果。而Richard 等人 (1986) 對海岸山脈、綠島及蘭嶼的地球化學研究認為在中新世至上新世早期，海岸山脈與蘭嶼即曾發生鈣鹼性火山作用，並指出海岸山脈最年輕的鉀－氬定年為4.4 百萬年，蘭嶼則為3.8 百萬年，而綠島的岩石年齡則介於1.8~4.3百萬年之間。

#### 4.1 同位素地質

對岩石礦物中所含的微量元素與同位素含量及其間之關係的研究，可以瞭解其母岩漿的特性與種類並進而推演其演化史。對於部分熔融或岩漿之結晶分化與混染作用等錯綜複雜的演變假說亦可提供一些關鍵性之資料。針對岩石中微量元素與稀土元素的研究，Chen and Huang (1986) 已發現到海岸山脈—綠島—蘭嶼之安山岩其化學成分有明顯的差異，顯示化學成分由於火山島弧噴發位置之不同而異，但並非是同一母岩因噴發時間不同而改變，此現象顯示，可能因不同的噴發位置，而有不同的母岩漿。

對於火成岩進行鉀—氬定年分析，最好是選擇鉀含量較高的雲母或是角閃石等，但對於有些不易進行礦物分離的火成岩，只要條件適宜，全岩分析仍然適用。表3.2 與圖4.1 為莊 (1988) 的資料，表3.2 中各地方的岩石樣本除了有全岩的鉀—氬定年外，還有自各岩石中分離出來的礦物作鉀—氬定年。這是因為岩體在形成之後，可能會受到後期之熱水換質作用，而此作用會引起鉀之流失或引入熱水中的同位素組成而造成錯誤的定年結果。因此才藉由礦物的分離並選擇適當的礦物作定年分析。小蘭嶼的火成岩主要是以黑雲母角閃石安山岩為主（照片15），此岩經礦物分離，選取角閃石與黑雲母作鉀—氬定年分析。從圖4.1 中可看出綠島與小蘭嶼的火山作用盛行的時期比海岸山脈或蘭嶼要晚大約二百萬年。所以台灣東部的火成活動可以二百萬年至四百萬年為界，劃分成由中新世早期至上新世早期的海岸山脈與蘭嶼之火成活動和上新世至近代的綠島和小蘭嶼火成活動。

在同位素地質研究方面，Lan et al. (1986) 也對綠島、蘭嶼及小蘭嶼安山岩利用鉀—鋇同位素法測其年齡及 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始值之實驗結果（表3.3）。同樣的資料也畫成圖4.2，(a) ~ (d) 圖表綠島的資料，(e)、(f) 則為小蘭嶼的資料。其中(a) 與(f) 圖中有斜率為負並標有「？」的直線，在數學定義上是指未來的年齡，在實際應用上它是毫無意義的。其他斜率為正的直線上面都標有計算出來的年齡，此值是以 $^{87}\text{Rb}$ 的衰減常數 $1.42 \times 10^{-11}/\text{year}$ 與直線的斜率之比得到的。這些定年的結果與鉀—氬法所測的頗為一致，但顯著地拉長了岩漿活動的前後時間；然而有些角閃石有同位素不均勻的現象，使得最老的年齡有些可疑；而較

年輕的年齡則顯示從碰撞開始後，岩漿活動至少仍持續有二百萬年之久，此與以古生物 (Chi et al., 1981) 及古地磁 (Yen and Ju, 1986) 方法研究海岸山脈火成活動所得的結論一致。在測量 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始值方面，綠島與小蘭嶼的安山岩均落在0.70478~0.70524之間，而蘭嶼的輝石安山岩亦頗為相近 (0.70472)。對由海洋板塊形成的島弧而言，如此高的比值，頗不尋常，表示安山岩的形成，不是與海水大量交換，就是混有大陸地殼物質。這些初始值較先前報導的海岸山脈火山岩低鋇比值 (小於0.7035) 高了許多，證明此島弧的鋇同位素組成不均勻。

#### 4.2 岩石化學

小蘭嶼的火成岩種類比起蘭嶼要單純得多，島上主要是以集塊岩與含黑雲母角閃石安山岩為主。在島上的鵝卵石海岸中隨處均可看到含有包裹體的安山岩。這些包裹體的大小不一，通常其直徑都只有數公分或數十公分大小。其與安山岩接觸的部分大都呈圓滑曲線。由於小蘭嶼與蘭嶼一樣是位在兩個板塊的聚合處，因此其火成活動所形成的岩石常有聚晶團塊的包裹體或基性捕獲岩。這種包裹體可能代表同源的聚晶體或岩漿捕獲之岩塊或耐高溫之殘餘岩塊。一般而言，在安山岩中的包裹體主要是粗粒的聚晶團塊。它由數公分大的礦物構成，有時包含了玻璃質，而此等礦物也常在安山岩中形成斑晶礦物，因此常被認為是屬於同源的聚晶團塊。

在島弧安山岩中的角閃石之矽含量通常較低，而且鎂／鐵比值也低 (Gill, 1981)。若是有大量的角閃石自母岩中結晶分化後分離，則將產生強烈的矽富集及微弱的鐵富集。這與許多火成岩區岩石之系統性變化趨勢相符合，因此粗粒角閃石的聚晶團塊常被認為是由基性母岩漿中分離出來而後產生了安山岩。含水的基性岩漿，經由角閃石的結晶分化而產生安山岩或石英安山岩。已經由實驗證實可能產生 (Green and Ringwood, 1967; Cawthorn and O'Hara, 1976)。

根據莊 (1988) 的描述，除了小蘭嶼之外，在海岸山脈、綠島及蘭嶼的安山岩中也同樣可以發現含有許多富含角閃石聚晶團塊的包裹體。這些包裹體依其產狀可以分為四種：(1) 角閃石巨晶 (megacryst)；(2) 富含角閃石之粗粒聚晶團塊 (cumulate nodules)；(3) 具針狀結構之角閃石聚晶團塊 (nodules with

acicular texture); (4)超基性團塊 (如純橄欖岩、直輝橄欖岩等)。若依礦物化學可概分為基性包裹體與超基性包裹體兩類，後者主要出現在海岸山脈奇美火成雜岩區的安山岩與蘭嶼部分地區的安山岩中，是屬於舊期系列的火成活動 (中新世早期至上新世早期)。其岩石特徵為：

- (1) 熱水與銅礦化作用較顯著。此時安山岩呈淺綠色，可大致分為普通輝石—角閃石安山岩、輝石安山岩、角閃石—普通輝石安山岩與角閃石安山岩等。角閃石與輝石部分已變為綠泥石、方解石、綠簾石。此外，部分鐵鎂礦物易形成透閃石與陽起石等次閃石類。其特徵為含有較高的矽，但相對地，鈉、鉀、鈦、鋁含量則較低。
- (2) 安山岩中有時含有地函物質經部分熔融後之殘留岩塊，純橄欖岩、直輝橄欖岩、兩輝橄欖岩，且含頑火輝石、鉻—透輝石與鉻尖晶石，可能代表著海洋原始地函物質經部分熔融後之殘留物。
- (3) 安山岩不含黑雲母或僅含少量之黑雲母。

相對地，屬於新期系列火成活動 (上新世至現代) 的綠島和小蘭嶼安山岩包裹體主要是以基性包裹體為主。其岩石特徵則為：

- (1) 岩石較新鮮，未受銅礦化作用。
- (2) 安山岩之包裹體，除富含角閃石之聚晶團塊外，罕有超基性團塊的出現。
- (3) 含有黑雲母安山岩。在綠島或小蘭嶼，其後期的火山岩流常為富含黑雲母斑晶之黑雲母—角閃石安山岩或含黑雲母角閃石安山岩。

在基性包裹體中所含的礦物有長石類、輝石類、閃石類、雲母類及綠簾石。

以下就小蘭嶼、蘭嶼、綠島及海岸山脈之安山岩包裹體中所含的礦物種類與意義分述比較如下：

#### (1) 長石類

富含角閃石團塊中之長石類主要為鈣長石 (anorthite) 與倍長石 (bytownite)，由 $An_{99}$ 至 $An_{70}$ 構成。蘭嶼與小蘭嶼火成岩中則尚有透長石 (sanidine) 出現。它僅與低鈣之斜長石共生。圖4.3 為小蘭嶼、蘭嶼、海岸山脈與綠島之安山岩包裹體中長石類之組成。

#### (2) 輝石類

輝石類主要為斜輝石與直輝石兩種。由圖4.4A Wo (矽灰石) - En (頑火輝石) - Fs (低鐵透輝石) 所示之成分分佈看來，綠島之透輝石的鈣含量較海岸山脈與蘭嶼者為高。這也反映出綠島火成岩母岩鉀含量可能較高 (Le Bas, 1962)。此外在小蘭嶼安山岩包裹體中沒有發現斜輝石礦物，圖4.4B為直輝石在Ca-Mg-Fe三角圖中之分布。直輝石的組成由En85至En65，與一般安山岩直輝石斑晶之範圍相仿。從圖中略可看出海岸山脈聚晶團塊所含直輝石具有較高的鎂，這點反映出較基性安山岩之特性。

### (3) 閃石類

小蘭嶼、蘭嶼、綠島與海岸山脈富含角閃石之聚晶團塊之閃石類的組成分布範圍較廣，然大部分是屬於鈣質羣，小部分才屬於鈉-鈣質羣。表4.1所示為小蘭嶼閃石類礦物微探分析的結果。在閃石類中變化較大者為鉀元素，由圖4.5 K-AlIV作圖看來，海岸山脈包裹體閃石類之鉀含量較低，而綠島與小蘭嶼則含有較高的鉀，尤以小蘭嶼的變化最大。由於閃石中鉀含量的多寡常取決於其所共生而達平衡之熔體 (Helz, 1973)，因此海岸山脈與蘭嶼閃石中鉀含量低也反映出其母岩漿在本質上是屬於低鉀型，可視為是島弧矽質玄武岩系；而綠島與小蘭嶼者其鉀含量較高則屬於鈣鹼岩系母岩漿。

### (4) 雲母類

黑雲母在小蘭嶼與綠島安山岩中雖然非常普遍，但是無論是在海岸山脈、綠島、蘭嶼或小蘭嶼之聚晶團塊中其所含的雲母類礦物均非常稀少。即使有也僅限於金雲母 ( $Mg/Mg + \Sigma FeO > 0.67$ )。此與安山岩之斑晶大都為黑雲母 ( $Mg/Mg + \Sigma FeO < 0.67$ ) 不同。表4.2為小蘭嶼安山岩捕獲岩 (聚晶團塊) 之雲母微探分析的結果。在MgO- $\Sigma FeO$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>三角圖中 (圖4.6) 所有分析的結果都落在De Albuquerque (1983) 所定與角閃石共生之範圍內。小蘭嶼安山岩包裹體之金雲母較海岸山脈、蘭嶼或綠島者含有較高的鐵，但鎂含量較低。這也顯示出小蘭嶼之母岩漿可能較趨向鹼性。

### (5) 綠簾石

雖然在海岸山脈或蘭嶼安山岩中，由於熱水換質之綠簾石化作用相當盛行，且常形成綠簾石之細脈，但在安山岩之包裹體中它並不常見。Zen and

Hammarstrom (1984)認為綠簾石可成相當後期的岩漿礦物。在某些鈣鹼岩質之深成岩，如英雲閃長岩或花崗閃長岩中，它可由角閃石與熔體發生反應而產生。其反應的壓力大約為8Kb，也就是至少要在地殼25公里深處進行。

就化學性質而言，新期系列之綠島和小蘭嶼安山岩其大離子半徑的不相容元素（如鉀、磷、鋰、銻、鉍、鋇與鈦）含量較舊期系列之海岸山脈奇美與蘭嶼安山岩者為高（表4.3）。換言之，舊期系列安山岩之低鉀含量即反映出其母岩漿在本質上是屬於低鉀型之矽質玄武岩系，而含鉀量較高的新期系列安山岩則屬鈣鹼岩系。

就球粒隕石基準化的稀土素圖形而言（圖4.7），新期系列的火成岩較舊期者具有較高的輕稀土元素含量。輕稀土元素富集的程度（La/Yb 值）也以新期者較高。就La-Ba（圖4.8）與La-Th作圖（圖4.9）而言，新期系列的綠島和小蘭嶼火成岩都落入高鉀型鈣鹼岩系的範圍，而舊期系列的海岸山脈和蘭嶼火成岩都落入了低鉀型的領域。同樣地，在Sr對 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 圖中（圖4.10），也可以看出新期系列較舊期系列含有較高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值。就綠島與小蘭嶼 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  之比值而言（表4.4），一般都大於0.7045（0.7048~0.70516）。對於由海洋板塊所形成的島弧而言，如此高的比值，頗不尋常，表示安山岩形成不是與海水交換，就是混有大陸地殼物質。小蘭嶼安山岩經球粒隕石基準化的稀土元素圖形（圖4.7）具有顯著的Ce負異常。此可能與菲律賓海板塊在隱沒前與海水產生的部分蝕變有關；Menzies 等(1977)認為Ce異常可能與海洋地殼暴露在海水環境下的時間長短有關。Hemingand Rankin (1979)亦認為海洋地殼暴露在海水中易引起Ce的流失。此等海洋地殼物質在隱沒帶部分熔融時，即產生具有負Ce異常的火成岩。

就岩石化學分析與放射性核種的關係而言，不同的放射性核種會與不同的岩石礦物發生不同的反應機制，有些情況能夠有效地阻止放射性核種的遷移，有些則不然。依據莊等（1989）在蘭嶼貯存場所採之現場樣本所作的放射性核種吸附之模擬研究結果顯示，岩石中的氧化或以生礦物（如沸石、方解石、綠泥石及赤鐵礦等）以及細粒基質部分易與放射性核種產生作用；而岩石中的斑晶如長石、輝石、角閃石則不易和放射性核種產生交換或是吸附反應。由於小蘭嶼的火成岩不似蘭嶼複雜，而且也未受過熱水換質作用，因此岩石通常較新鮮，換言之，島上

的次生礦物或氧化礦物種類就比較少，但是小蘭嶼安山岩中的鐵鎂含量卻相當豐富，其所形成的氧化鐵對於銫-134，銥 -90與鈷 -60（在低強度放射性廢料中，以輻射傷害的觀點而言較受注目的三種放射性元素）的吸附能力有加強的作用。放射性核種與圍岩間的交互作用除了吸附作用外，還包括離子交換作用、沈澱及共沈作用，因此所需考量的因子相當多，包括放射性核種的種類，地下水的物理及化學性質，岩石本身的條件及將來可能的變化，因此岩石化學分析的結果僅能說明岩石礦物對放射性核種可能的影響，尚不能有效地預測其後果。

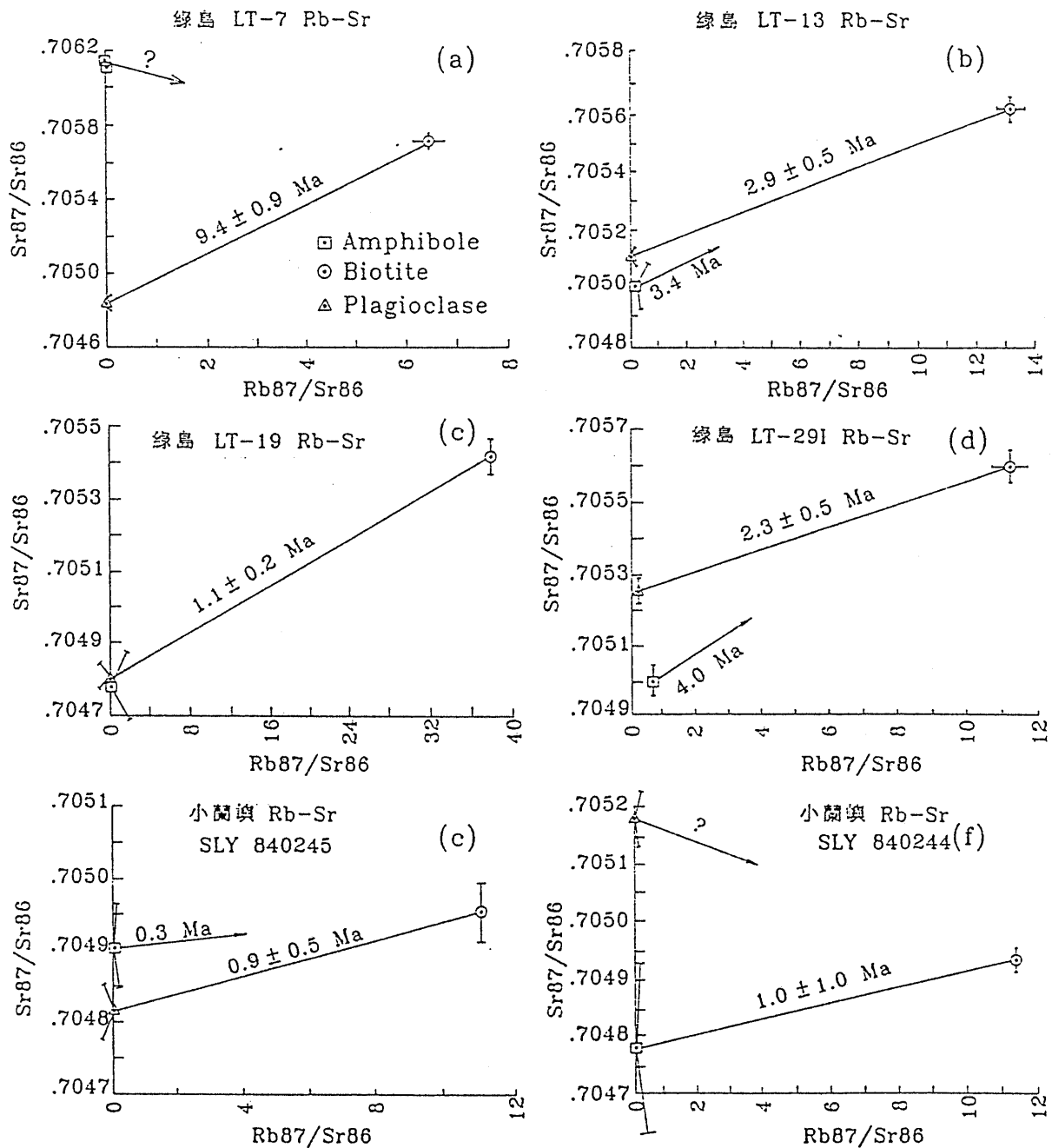
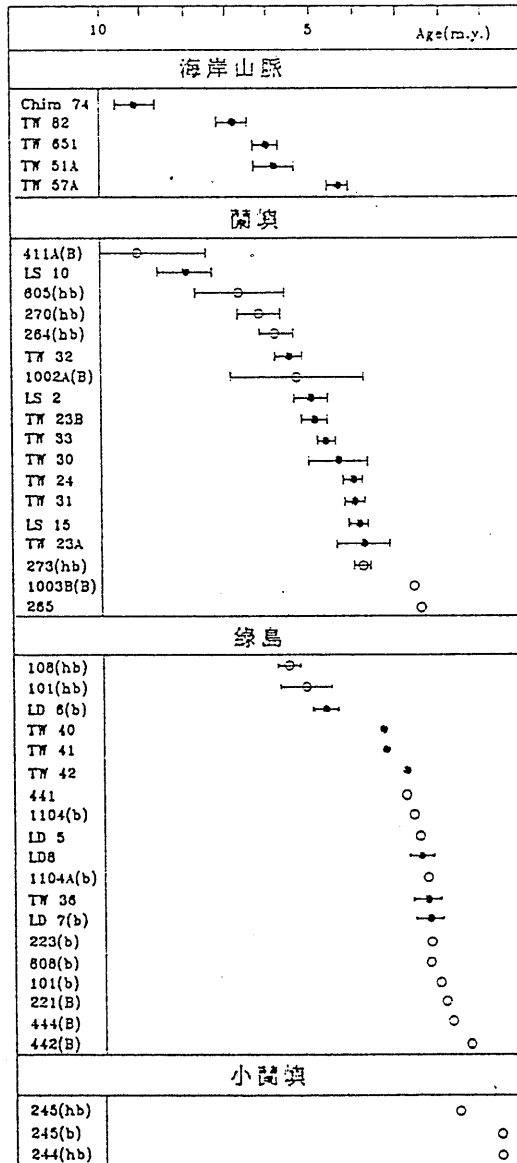


圖 4.2 含黑雲母安山岩中共存礦物的 Rb-Sr 同位素含量比值圖 (Lan et al., 1986).



● : data from Richard et al. (1988);  
 ○ : this study;  
 B : basalt; hb : hornblende; b : biotite;  
 others, results are carried on whole rocks of andesite

圖 4.1 臺灣東部岩石區年輕岩樣 (小於九百萬年) 年代示意圖 (莊, 1988)

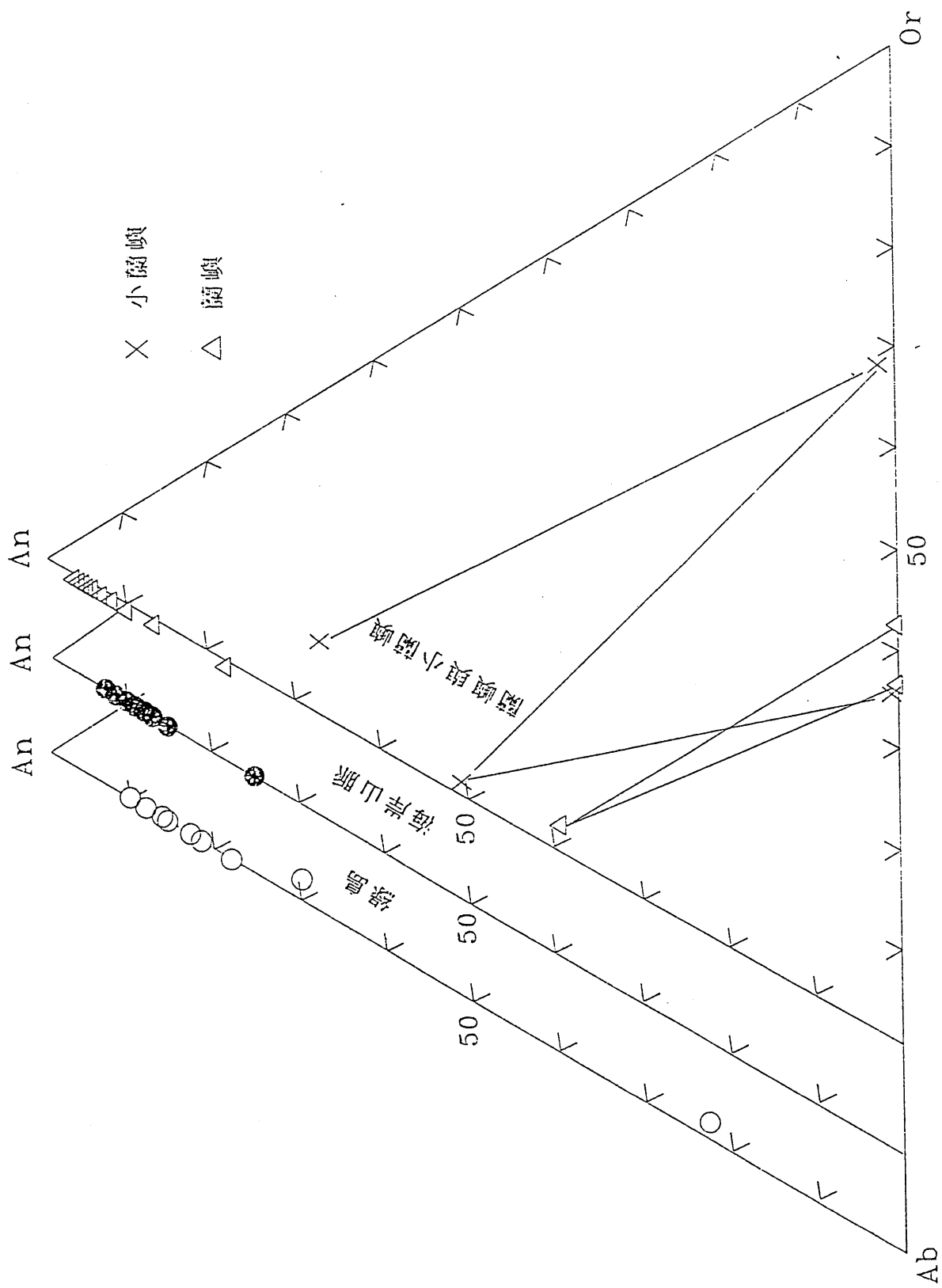


圖 4.3 安山岩包裹體中長石類之組成；聯線代表共生之礦物（莊，1988）

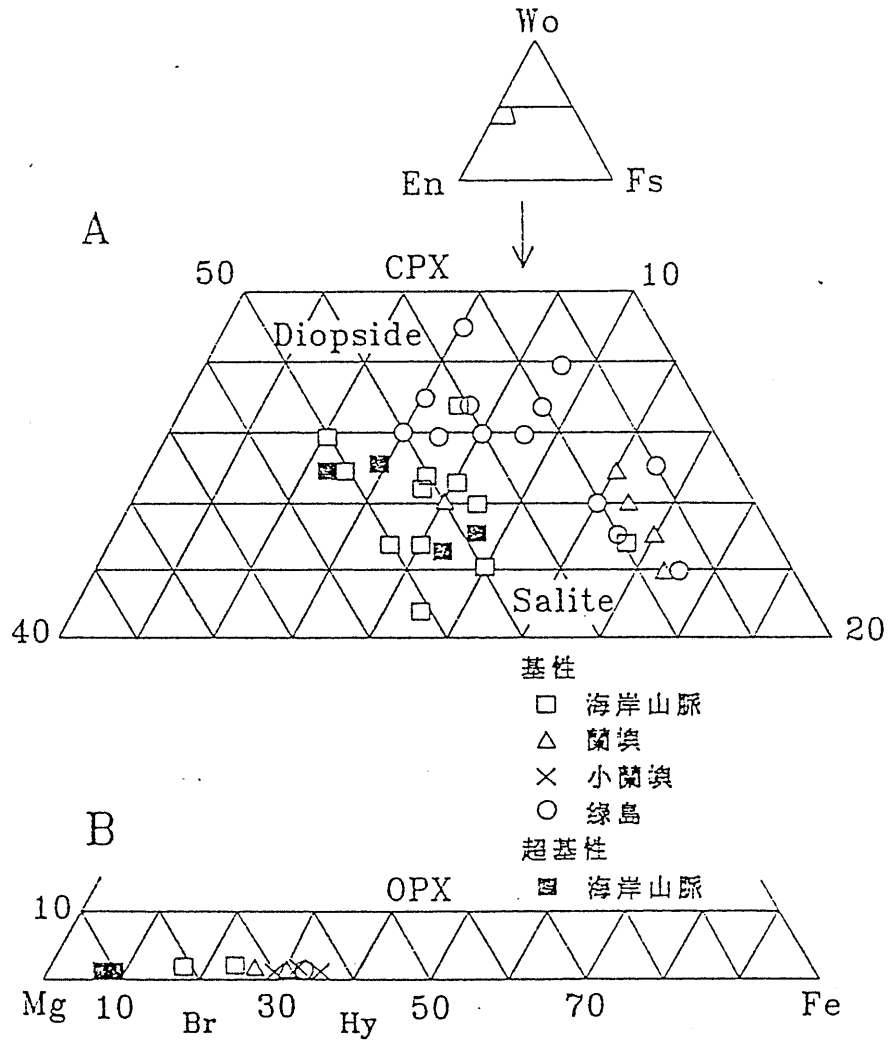


圖 4.4 A. 安山岩包裹體斜輝石在 Wo (矽灰石)-En (頑火輝石)-Fs (低鐵透輝石) 三角圖中之分布  
 B. 安山岩包裹體直輝石在 Ca-Mg-Fe 三角圖中之分布 (莊, 1988).

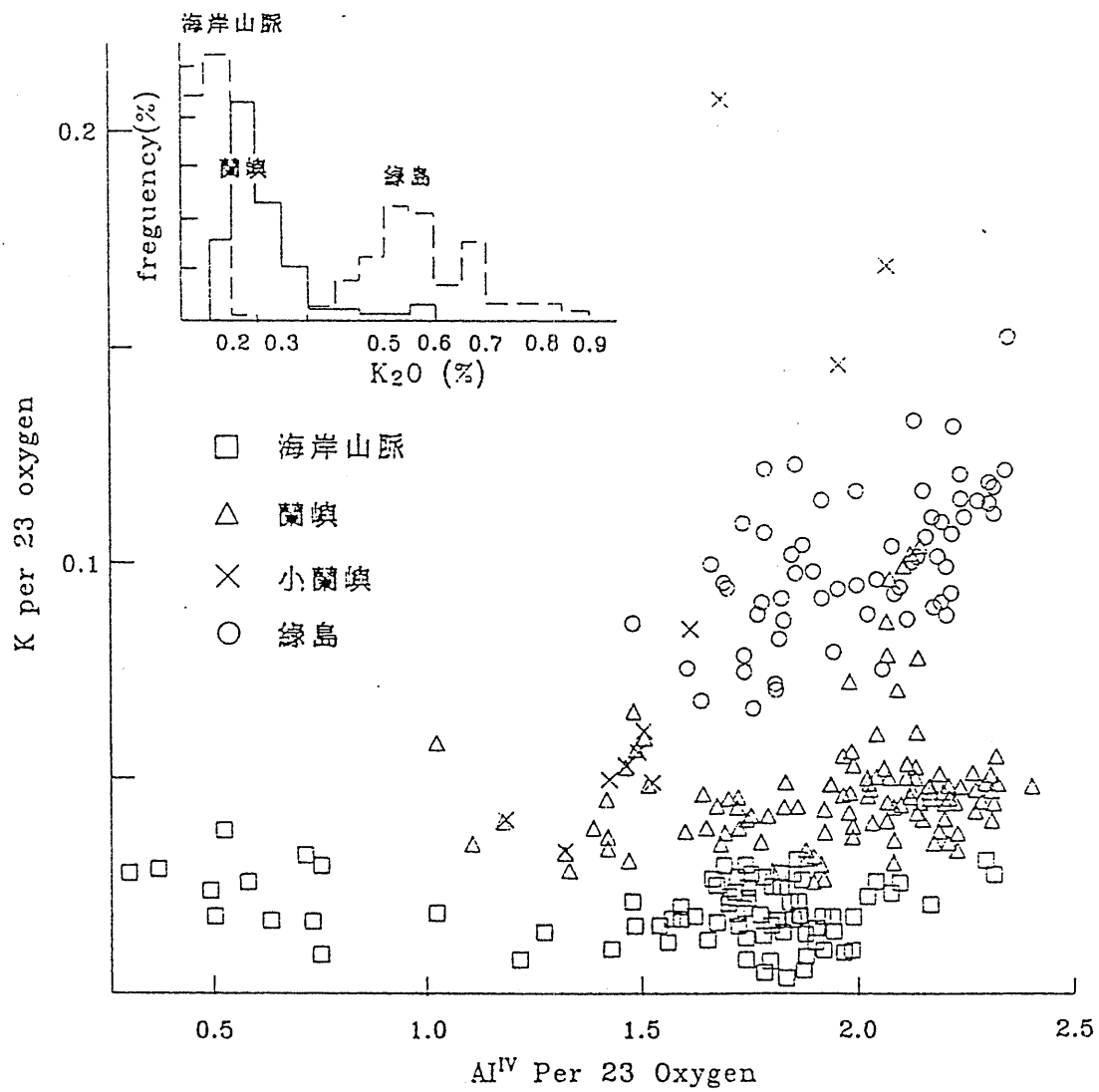


圖 4.5 東部地區安山岩包裹體中閃石類之 K-Al<sup>IV</sup> 作圖 (莊, 1988)

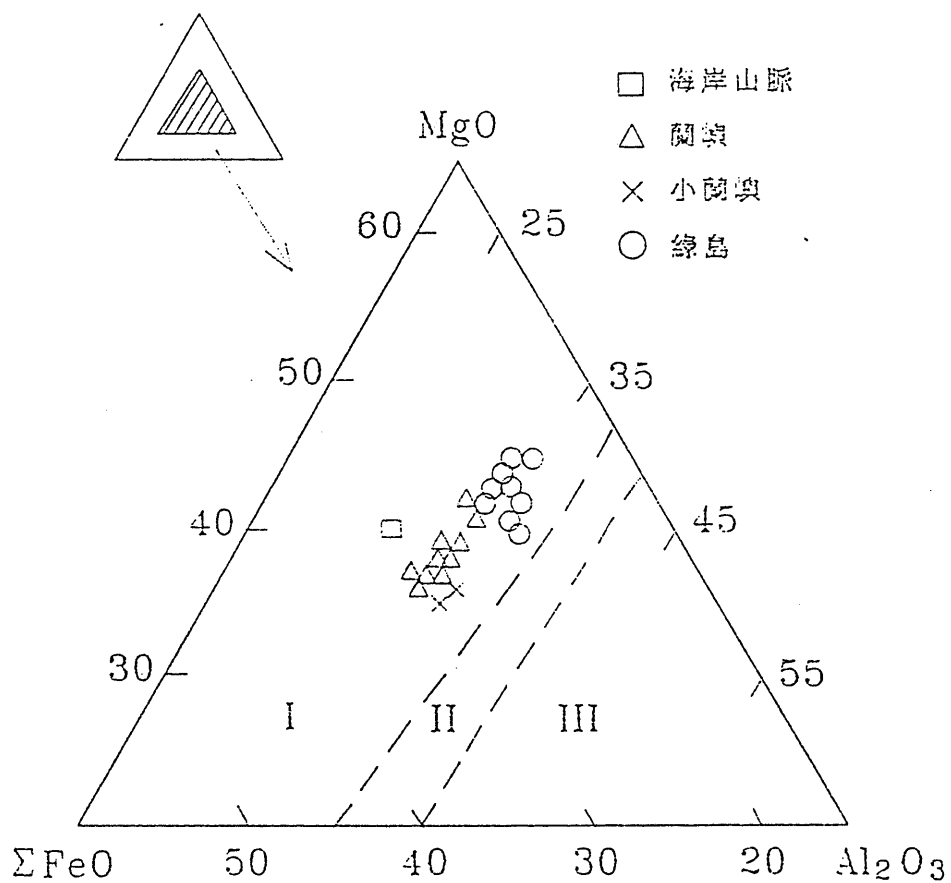


圖4.6 東部安山岩岩石區包裹體中雲母在  $MgO-\Sigma FeO-Al_2O_3$  三角圖中之分布；I. 代表雲母與角閃石共存區域；II. 代表雲母未與其他鐵鎂礦物共存之分布區域；III. 代表二種雲母共存區域 (De Albuquerque, 1973),(莊, 1988).

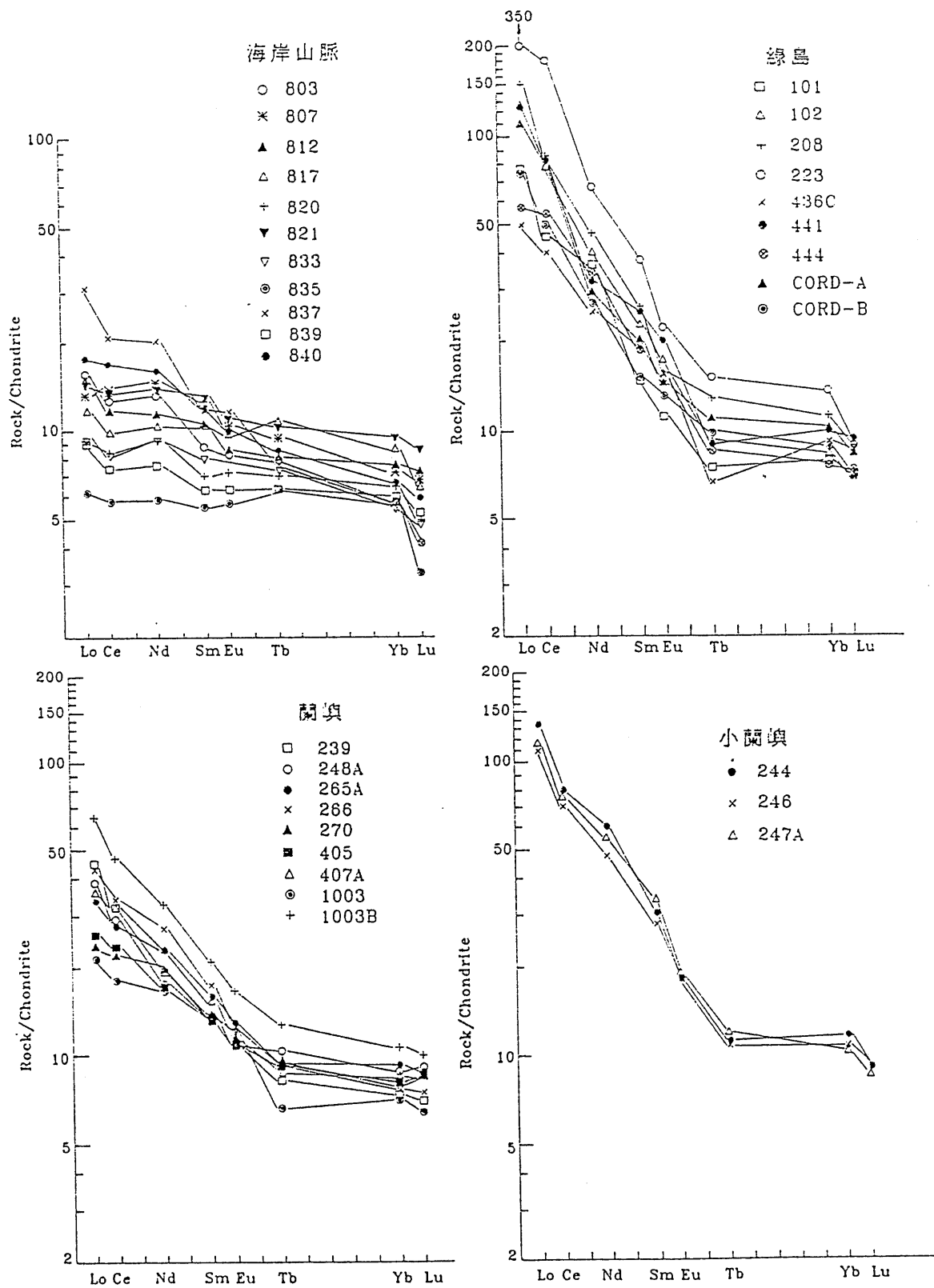


圖 4.7 臺灣東部海岸山脈，綠島，蘭嶼和小蘭嶼火成岩經球粒隕石基準化的稀土元素圖形 (莊, 1988)

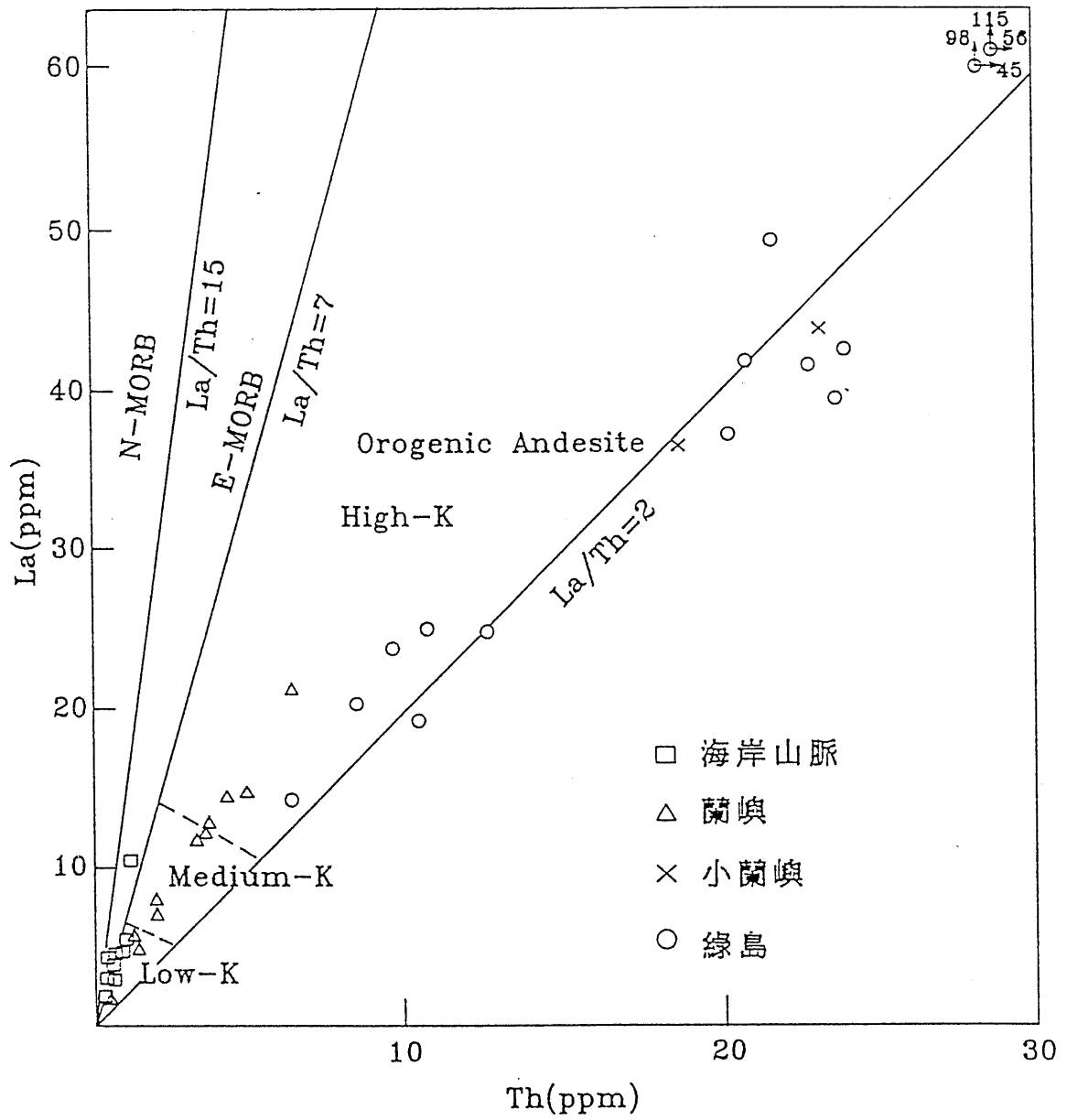


圖 4.8 臺灣東部海岸山脈, 綠島, 蘭嶼和小蘭嶼火成岩 La 對 Th 作圖. (莊, 1988).

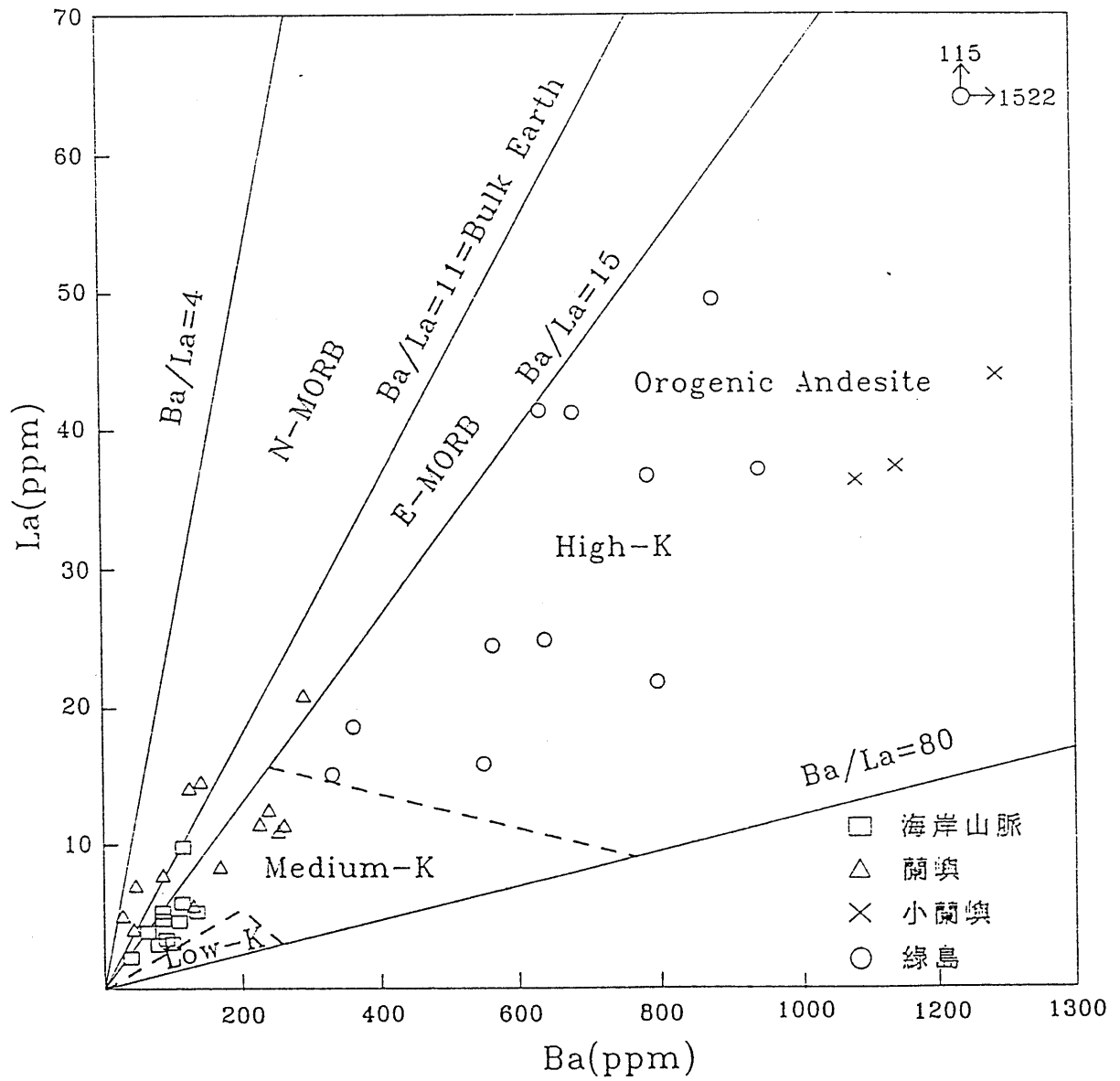


圖 4.9 臺灣東部海岸山脈，綠島，蘭嶼和小蘭嶼火成岩 La 對 Ba 作圖 (莊, 1988).

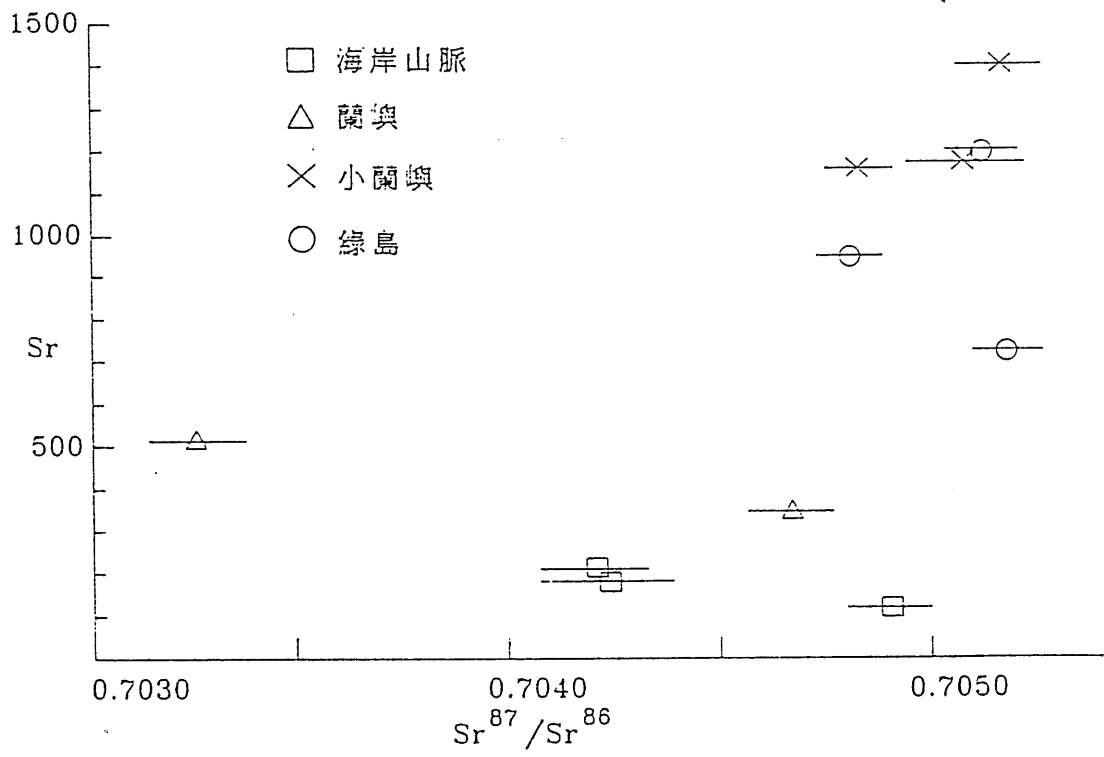


圖 4.10 臺灣東部海岸山脈，綠島，蘭嶼和小蘭嶼火成岩之 Sr 對  $Sr^{87}/Sr^{86}$  作圖 (莊, 1988).

表4.1 小蘭嶼安山岩捕獲體中閃石類礦物微探分析結果 (莊, 1988)

	242a	242b	242c	242d	242e	243a	243b	243c	243d	243e	243f
SiO <sub>2</sub>	48.80	46.62	48.13	46.53	46.52	41.84	45.43	44.51	46.82	46.48	43.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.97	10.04	8.31	9.56	9.24	14.12	12.09	11.93	9.32	9.40	13.52
FeO	13.68	14.30	12.90	14.71	14.42	13.62	12.96	12.03	12.77	13.21	13.36
MgO	16.01	14.69	17.00	15.70	15.20	13.10	14.28	14.97	16.07	15.98	13.33
TiO <sub>2</sub>	0.47	0.75	0.53	0.65	0.75	1.32	0.93	1.20	0.93	0.91	1.30
MnO	0.49	0.48	0.43	0.46	0.45	0.28	0.32	0.22	0.37	0.39	0.27
CaO	10.21	10.43	10.73	10.40	10.65	10.73	10.67	9.65	10.49	10.60	11.05
Na <sub>2</sub> O	1.08	1.30	0.89	1.12	1.53	1.85	1.29	1.66	1.12	1.18	1.86
K <sub>2</sub> O	0.23	0.30	0.19	0.28	0.34	0.94	0.48	1.15	0.28	0.32	0.82
TOTAL	98.94	98.91	99.11	99.41	99.10	97.80	98.45	97.32	98.17	98.47	98.51

	MINERAL FORMULA BASED ON (23) OXYGENS											
Si	6.822	6.537	6.682	6.481	6.494	5.937	6.386	6.323	6.572	6.511	6.049	
Al(IV)	1.178	1.463	1.318	1.519	1.506	2.063	1.614	1.677	1.428	1.489	1.951	
Al(VI)	0.135	0.196	0.041	0.050	0.014	0.298	0.388	0.320	0.113	0.062	0.290	
Ti	0.049	0.079	0.055	0.068	0.078	0.140	0.098	0.128	0.098	0.095	0.137	
Fe <sup>3+</sup>	0.400	0.471	0.460	0.530	0.565	0.610	0.434	0.451	0.461	0.502	0.584	
Fe <sup>2+</sup>	1.199	1.205	1.037	1.183	1.118	1.006	1.089	0.978	1.037	1.045	0.987	
Mn	0.058	0.057	0.050	0.054	0.053	0.033	0.038	0.026	0.043	0.046	0.032	
Mg	3.335	3.070	3.518	3.259	3.162	2.770	2.992	3.169	3.362	3.336	2.795	
Ca	1.529	1.566	1.596	1.551	1.592	1.631	1.606	1.468	1.577	1.590	1.665	
Na	0.292	0.353	0.239	0.302	0.414	0.508	0.351	0.457	0.304	0.320	0.507	
K	0.041	0.053	0.033	0.049	0.060	0.170	0.086	0.208	0.050	0.057	0.147	

表4.2 小蘭嶼安山岩捕獲體中雲母礦物微探分析結果 (莊, 1988)

	230A-C	230A-D	230A-E	230A-F	243A	243B
SiO <sub>2</sub>	36.15	38.48	38.16	38.51	37.60	37.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.16	15.25	15.11	15.09	15.21	15.26
FeO	14.76	14.78	14.08	14.14	13.96	13.60
MgO	17.46	16.97	17.14	18.15	15.77	15.97
TiO <sub>2</sub>	2.26	2.16	2.28	2.28	3.04	3.17
MnO	0.10	0.07	0.04	0.06	0.13	0.11
Na <sub>2</sub> O	1.18	0.92	0.77	0.79	1.20	1.50
K <sub>2</sub> O	7.31	6.67	6.60	6.72	7.51	7.67
TOTAL	94.38	95.30	94.18	95.74	94.42	95.03

MINERAL FORMULA BASED ON (11) OXYGENS						
Si	2.687	2.812	2.810	2.780	2.827	2.830
Al(IV)	1.313	1.188	1.190	1.220	1.173	1.170
Al(VI)	0.015	0.125	0.121	0.064	0.175	0.178
Ti	0.126	0.118	0.126	0.123	0.172	0.179
Fe <sup>+3</sup>	0.046	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe <sup>+2</sup>	0.871	0.903	0.867	0.853	0.878	0.852
Mn	0.006	0.004	0.002	0.003	0.008	0.007
Mg	1.934	1.843	1.881	1.953	1.767	1.784
Na	0.170	0.1309	0.109	0.110	0.175	0.218
K	0.693	0.621	0.620	0.619	0.720	0.733

表4.3 東部安山岩區新、舊期系列火山岩之化學特性 (莊, 1988)

Lithophile Elements				
I		II		
	海岸山脈	蘭嶼	綠島	小蘭嶼
NO. of				
Analysis	11	11	14	2
%				
P <sub>2</sub> O	0.08	0.14	0.26	0.24
K <sub>2</sub> O	0.69	0.75	1.27	1.45
ppm				
Ba	169	200	890	1150
La	4.7	10.2	42.3	40.2
Li	8	7	13	18
Rb	13	13	46	47
Sr	200	158	800	1320
Th	0.6	3.0	20.8	20.8

表4.4 台灣東部火成岩鋇同位素比值 (莊, 1988)

		$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
(1) 海岸山脈		
(奇美火成雜岩區)		
804	輝石安山岩	0.70420±13
806	輝石-角閃石安山岩	0.70423±16
819	角閃石安山岩	0.70490±10
(2) 綠島		
1104	黑雲母-角閃石安山岩	0.70517±8
804A	玄武岩	0.70511±9
441	含堇青石之角閃石安山岩	0.70480±8
(3) 蘭嶼		
239	角閃石安山岩	0.70467±10
1003	玄武岩	0.70326±12
(4) 小蘭嶼		
244	黑雲母-角閃石安山岩	0.70515±15
245	黑雲母-角閃石安山岩	0.70507±14
246	黑雲母-角閃石安山岩	0.70482±8

## 5. 水文概況

小蘭嶼位於蘭嶼東南方約 5.5公里，在低潮時島上面積約為1.12平方公里，是一未經開發之島嶼及我國空軍炸射練習用的靶場，人煙絕跡且無大型動物活動的足跡，僅有少數爬蟲類及蟹居動物活動於島上。島上也沒有大型木科植物，僅為低矮之草本植物及散布於沿岸附近經海水沖刷造成之卵石，可見島上水文條件非常欠缺。以下僅就觀察及採樣之樣品，來敘述該島之水文概況。

### 5.1 地表概述

#### 5.1.1 地貌

該島為保存極為完整之最新期火山層，由集塊岩與安山岩組成（李思根，1983），至今尚未發展成完整之水系。島之四周海涯甚高，僅北側與南側有較寬之海岸平地，其中在南側的地形隱約地顯現出一正在發展之幼年期河谷，河谷南端與海岸平地成一約有二、三十公尺高之海崖，並有泉水自崖壁中流出。在北側亦有一屬幼年期之河谷，唯接近北側海岸平地時坡度平緩連續，沒有海崖地形，也未見有溪水流動。島上其它地區則未見有任何溪床存在。降雨時，雨水皆隨地形之自然坡度逕流至海崖處入海或匯聚於島中央之火山口。

#### 5.1.2 湖泊

該島中央有一盆地狀之火山口，呈一大窪地。其內部以三個圓穴而成，大者直徑可達 200公尺，深約有45公尺，底部則有少許積水。降雨時，雨水在此聚集，後因蒸發及入滲而又乾涸。這次野外調查即發現火山口內的炸彈坑仍有積水，而另一火山口則呈乾涸。在火山口內發現少許低矮樹木，一般相信這裡必定是本區地下水之主要補注源頭。

#### 5.1.3 泉水

該島由集塊岩及安山岩所組成。一般認為，集塊岩之透水性較安山岩為佳，

在集塊岩區較易發現有泉水流出；而安山岩區僅在裂隙中發現濕潤的表面。小蘭嶼之南側靠近海岸平地之海崖，可發現有泉水流出（照片16）。其量雖細小卻延綿不斷，附近土壤亦較為鬆軟，而多處有地下水滲出。在西側海崖側壁偶而發現岩石裂隙呈濕潤狀，唯因面積不廣，亦無明顯滴水情形。相信存在其間的地下水相當有限。至於該島的其它地方，就很不容易發現有泉水湧出。泉水為地下水流出的地表特徵，由此看來，小蘭嶼的地下水相當有限。

## 5.2 水系及排水

### 5.2.1 水系

如前所述，該島約略有二條尚屬幼年期之河谷，一在北側，另一在南側。由地形圖及野外勘察可知島的東西兩側皆在靠海處形成海崖，而靠內陸側亦形成坡度相當大之山坡。在此兩側不易積水，天然降水皆順著地表坡度直接逕流流入島中之火山口或直接入海。未流入火山口之雨水再藉由南、北二側之河谷來排水。北側之河谷坡度較小，流程較短，流域面積也小，所以流量相當小；南側河谷流域較廣，是為該島的主要排水水路。唯因該島面積不廣，南北二側水流流程均短，上下游不到一公里，遲延時間 (lagtime) 相當短，非降雨時期則其流量很少。一般都呈乾涸狀，屬於暫時溪 (ephemeral stream) 之一種。是以本島的水系為不發達水系。

### 5.2.2 排水

核廢料處置場址的選擇，水流為一重要的考慮因素。尤其場址周圍之排水，如能掌握則較易監測地下水質是否遭受放射性污染。小蘭嶼全島之排水，可分為二種情況，一為藉地表逕流排入太平洋。這情況如上節所述之南北兩側之暫時溪排水，東西兩側的陸上地表逕流。在向溪谷匯合後便順著地形向南或北方流入海洋。另一為地下水流，地表雨水匯流至火口湖後經入滲於地表之下成為地下水流，最後以泉水的形成湧出入海。其詳細情形在下節述之。

### 5.2.3 地下水概況

小蘭嶼東、西兩側為安山岩所構成。理論上存在於其間的地下水相當有限。這可由5.1節泉水調查可為輔証。雨水經地表逕流後流入火山口，直接滲入地表下或在山坡地，是為地下水主要來源。該島地下水主要補注區為在島中央之火山口處（照片17）。地下水經由此區域補注後分向南北流動。在北側因地形坡度較緩，且海岸平地較廣，卻未見有泉水面或濕潤之土壤。由此研判地下水位面與地表面有段距離。南側海崖處發現有泉水滲出，且其高程約在海平面10公尺高，而與火山口底部標高32公尺（地形圖標出），相差有二十公尺。研判此泉水主要是由火山口底部的積水而來。由此判斷該島之地下水經補注後主要是往南移，僅少數往北移，可見圖5.1之示意圖。

### 5.2.4 水質背景

小蘭嶼為無人島，島上談不上任何水資源之利用，既無溪流也無地下水井；而能夠順利發現水源者，僅為南側海崖處之泉水。小蘭嶼之地質構造與大蘭嶼相似，主要為安山岩與集塊岩。茲將79年10月在小蘭嶼南側所採之水樣與蘭嶼之水質成份，同列於表5.1。再依主要陽離子 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{+2}$ 、 $\text{Mg}^{+2}$ 及主要陰離子 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{-2}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 及 $\text{CO}_3^{-2}$ 畫成三角水質當量圖如圖5.2。在圖中，明顯看出小蘭嶼之泉水（1號）與大蘭嶼之泉水（4號）的組成差異性。在主要陰離子部份還可看出相似處（以 $\text{SO}_4^{-2}$ 及 $\text{Cl}^-$ 為主），然在主要陽離子部份可看出小蘭嶼的泉水組成以鈉離子及鉀離子為主。在火成岩中，鈉主要由長石礦物衍生而來，所以該島地下水流經之地區，應有較多之長石礦物，比較於大蘭嶼以鈣、鎂為主，主要因其流經角閃石地帶所致，蓋地下水中，角閃石是產生鈣及鎂的礦物。故以判斷小蘭嶼之火成岩含有較少之角閃石成份。

### 5.3 潮流

小蘭嶼、蘭嶼及綠島均位於黑潮主流的範圍內。黑潮由南方流近蘭嶼後分兩股繞島而流。一般海圖上，蘭嶼的東南方（即與小蘭嶼之間的海上）及西北方都有明顯的紊流區。這是由於黑潮由南方流向蘭嶼，繞東南角及西北角所造成的現

象。蘭嶼可視為放在黑潮強流中的一艘船。蘭嶼西南沿海頂著黑潮，黑潮繞過蘭嶼與小蘭嶼間產生逆時針方向轉之渦旋 (eddy)，而在蘭嶼東清灣海域引起上昇流現象。

由以上小蘭嶼水文的敘述及研判，作為低放射性廢料處置場有以下幾點可作為選擇時的參考：

- (1) 島上中北部較南部有較厚的未飽和層對地下水的滲流有較長時間的流程，且地下水直接在地表下海水交界面處入海，較南部地區來說較有利場址選擇。唯地下水量稀少，地表逕流量在降雨時相對增加，易在窪地形成窪蓄。然而該島排水效果良好，對由地表水所產生的災害相對降低許多，對處置場較為有利。
- (2) 該島地下水流方向大都往南是因地表排水效果好所致，然而從島上四周海崖看，除南部有泉水，及北部少為草原帶外，四周岩盤裂隙發達，是為地下水良好的通路。若處置場的建設改變了當地自然排水狀況，或者導至入滲於地下，都將引起地下水流方向的改變。況且水在裂隙流速快，很容易滲透至處置場內部是較為不利的因素。

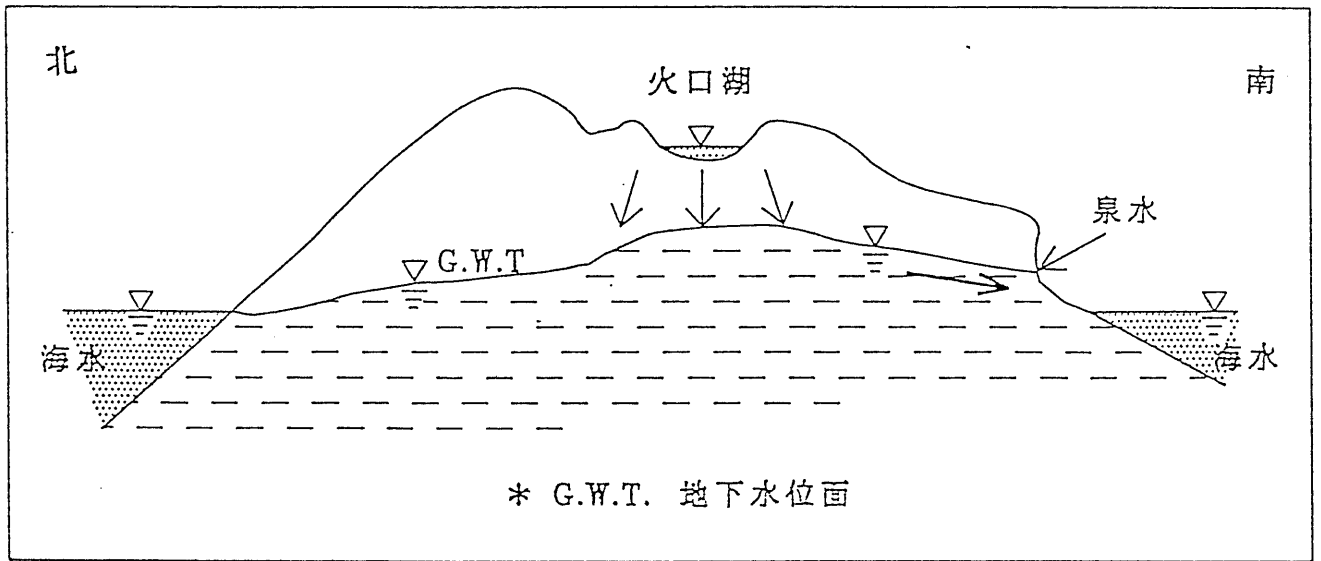


圖 5.1 小蘭嶼南北方向地下水流示意圖

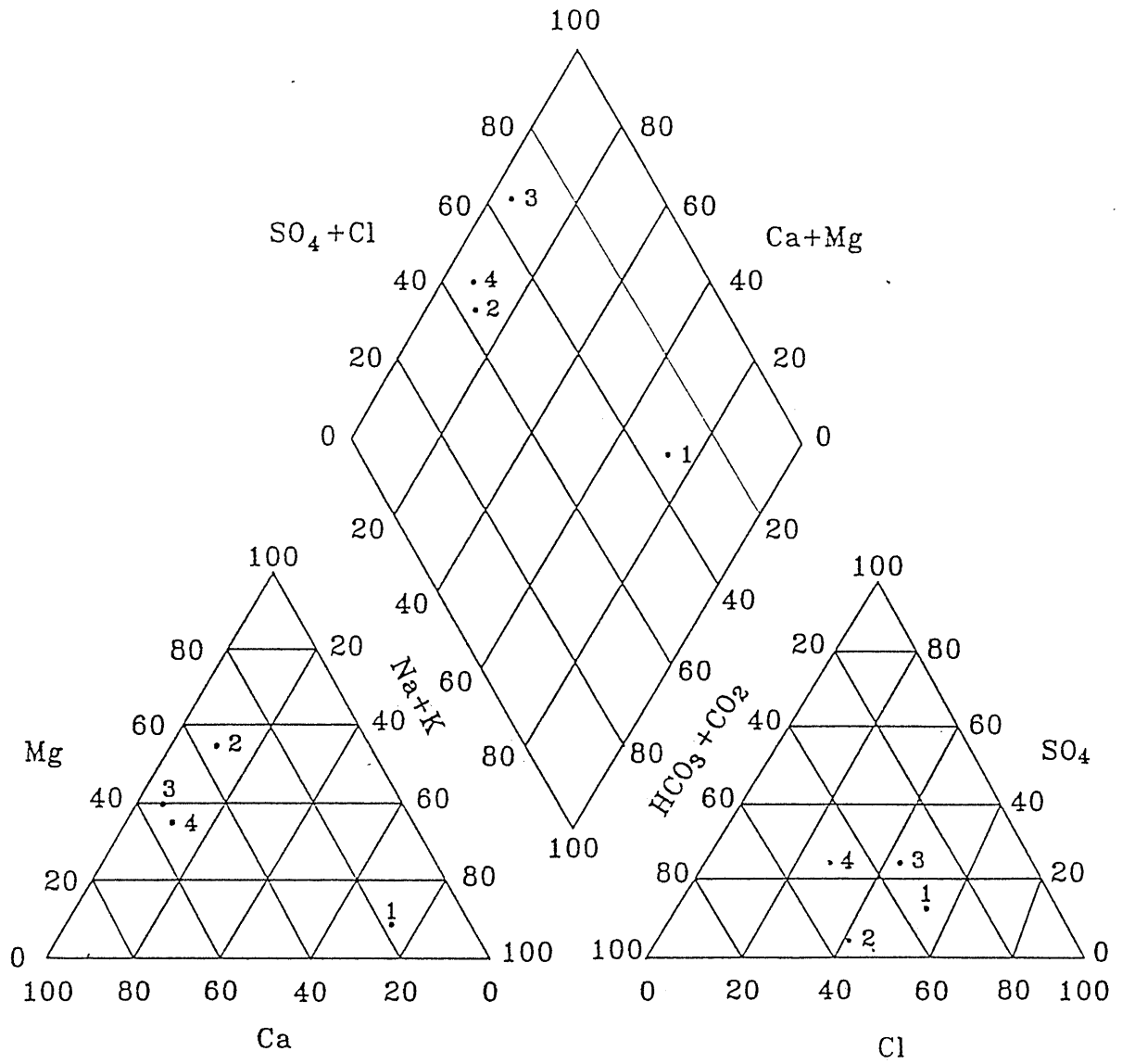


圖 5.2 三角水質當量圖

表5.1 水質成分表

樣品 編號	小蘭嶼	龍門溪 (蘭嶼)	東清溪 (蘭嶼)	蘭嶼 泉水
Na <sup>+</sup> ppm	63.6	26.8	27.3	18.6
K <sup>+</sup> ppm	6.0	3.0	1.0	1.1
Ca <sup>+2</sup> ppm	7.6	67	182	103
Mg <sup>+2</sup> ppm	8.6	63	83	50
Al <sup>+3</sup> ppm	< 0.1	0.1	0.2	0.1
NH <sup>+4</sup> ppm	< 0.5	< 0.05	0.05	< 0.05
Cl <sup>-</sup> ppm	91	52.3	44.4	28.7
S <sup>-2</sup> ppm	< 0.01	< 0.05	< 0.05	< 0.05
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> ppm	58.8	8.6	221.0	78.3
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ppm	0.4	< 0.5	< 0.5	< 0.5
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ppm	37.8	126	113	90
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> ppm	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Fe ppm	< 0.1	< 0.01	< 0.01	< 0.01
U ppb	0.2	< 0.5	< 0.5	< 0.5
pH 值	7.97	8.18	7.83	8.33
導電度 umho /cm	480	415	700	420

## 6. 天然資源

在天然資源豐富的地區，由於很容易受到人為之干擾，故並不適合作為核廢料最終處置場。因此欲決定最終處置場，必須對該地區天然資源蘊藏量方面有清楚的了解。

天然資源通常分為非能源資源、能源資源及水資源。非能源資源部份，目前在小蘭嶼並無發現有經濟價值較高之地下礦產；在能源資源方面亦未發現有放射性較高之礦產，故放射性礦物礦床之形成可能性不大；在水資源方面，由於小蘭嶼是個無人島，故對水資源並無所需求，故亦不會造成干擾，因此就整個小蘭嶼天然資源蘊藏量來分析，可說是相當缺乏，是頗適合作為廢料最終處置場的。

## 7. 地震

台灣地區 (圖 7.1) 位於亞洲大陸棚的東緣，菲律賓海盆的西側，以呂宋海溝與呂宋島相連，東北方約200 公里有沖繩海槽，往南 80 公里有琉球羣島，再往南120 公里有琉球海溝。本區位於環太平洋西側地震帶之中部，介於日本與菲律賓之間。台灣東部北自宜蘭南至蘭嶼南方恰位於此地震帶上，為一地震發生頻率甚高之地區 (圖 7.2)。

從場址選定的觀點而言，處置場應設立在低度地震活動區並且應遠離大地構造活動區，以保證處置場的完整性不受到破壞。基本上，場址所在地區之地震發生頻率或規模較一般地區為高時，為場址選定的不利條件 (IAEA, 1983; USNRC, 1986; USD OE, 1984; Brunton/McClain, 1977)。

綜合小蘭嶼地區地震震源機制及其可能的大地構造、應力分佈與地震活動度，有助於瞭解此地區之穩定性，進而作為場址選定評估之參考。

### 7.1 地震規模與能量

由 TTSN 所記錄之台灣地區地震資料 (圖7.3a, 鄭 等1984) 顯示1973年至1988年之十六年間，發生之地震 (圖7.3b) 集中於台灣東北區 (宜蘭、花蓮附近， $121.5^{\circ} E$ 至 $123^{\circ} E/24^{\circ} N$ 至 $25^{\circ} N$ )與台灣東南區 (靠近台東、綠島、蘭嶼等地區 $121^{\circ} E$ 至 $122^{\circ} E/21.5^{\circ} N$ 至 $23^{\circ} N$ )。由圖7.3b來看 $M_L \geq 4$ 高密度中心約距小蘭嶼23公里 ( $M_L$ 為近震規模，即芮氏地震規模)。

根據徐氏 (Hsu, 1971、徐, 1988) 所定義之地震規模 $M$ ，及Gutenberg-Richter Formula:

$$\text{Log } E = 11.8 + 1.5 M$$

$E$ : 地震釋出之能量 (erg)

將台灣地區自  $119^{\circ} E$  至  $123^{\circ} E / 21^{\circ} N$  至  $26^{\circ} N$ 每經緯度分成四個等分區，算出1934年至1972年各區地震發生率與釋出能量百分比 (圖 7.4, 李, 1983)，顯示台灣東部海岸線至 $123^{\circ} E$ 之發生率約佔 80%，而宜蘭至蘭嶼之間釋出之能量約佔 70%。

由震源之分佈位置及釋出之能量可知台灣地區地震活動大致呈東北－西南走向，以台灣東部為主要活動地區，而宜蘭、花蓮、台東、綠島、蘭嶼等地區最為活躍。

## 7.2 震源機制

一羣密集之微震若由相關之發震機制造成，可綜合震源深度剖面及「合成斷層面解」決定斷層之走向、傾角及滑動方向。

蘭嶼、綠島以西地區之地震頗為頻繁，林氏（林 等，1979）曾在1978年3月26日至6月5日（71天）的微震觀測期間發現平均每天至少發生規模 1.8以上之地震兩次。綜合本區之合成斷面解如圖 7.5所示（表 7.1），其中黑色區域表示壓縮性P波，第36, 37, 38 解與本區大部份的逆衝斷層不同，但卻與  $122^{\circ}$  E 以東的大部份地震同屬「走向滑移」斷層。若以西北－東南走向之節面為斷層面則為左旋之滑移斷層。這些意味著琉球海溝西側的左向切應力一直延伸至蘭嶼的西南方（Lin et al., 1981）。

台東、恆春海岸帶之間，由第 13, 22, 23, 24, 26 解可知這些斷層屬正斷層可能是由於中央山脈上升引起之 NWW-SEE 張力造成，性質與蘭嶼、綠島附近之解迥異。

## 7.3 大地構造與應力分佈

由應力的分佈形式，有助於對板塊運動方向之瞭解，而板塊之區域性應力變化通常是造成地震活動的主因。以合成斷層面解，選取同一地區內之T軸及P軸以Fisherian Analysis (Fisher, 1953) 可求出該區平均之T軸及P軸方向(Lin et al., 1985)。以蘭嶼地區16個斷層面解、綠島地區8個斷層面解求出此二區之平均最大壓力軸方向及傾角（圖 7.6、表 7.2）顯示蘭嶼平均最大壓力軸在  $N 61^{\circ} W$  幾乎水平（傾角  $2^{\circ}$ ），而綠島地區平均最大壓力軸在  $S 24^{\circ} W$ ，傾角  $60^{\circ}$ 。此與前述之馬蹄形震源分佈所隱含之板塊運動非常有關連，由板塊活動示意圖（圖 7.7）加上花蓮、台東、台東大武等地區之應力關係顯示由花蓮至恆春恰為板塊向西北方向運動之邊界，蘭嶼地區的最大壓力恰與板塊運動方向平行，

其速率大約向西北每年 6.8公分 (Seno et al. 1987)。根據25年的資料 (Pezzopane et al., 1989) 此處地殼概以每年2.6~5.4公分在方位 290° 收縮。

將台灣東南地區分出數個縱深剖面 (圖 7.8, Lin et al., 1981) 以震源對深度作圖及垂直投影於深度剖面的震源機制 (圖 7.9) 顯示小蘭嶼地區密集之淺層震源深度約在40公里之內, 而部份中層深度分佈在40公里至 120公里之間, 向東擴散至 100公里處, 傾角約50°, 整個活動帶長 150公里而小蘭嶼正位於此一不穩定活動帶之上方。

#### 7.4 地震頻率與最大可能加速度

Gutenberg-Richter (1944) 首先將地震規模與發生次數表示成數學關係式：

$$\log N = a - bM$$

其中 M： 地震規模

N： 規模大於或等於 M 的地震發生次數

a, b： 常數

a 與 b 為各地震區之特性常數, a 與觀測時間之長短及區域性地震活動度有關, b 值近年來發現在不同地區 b 值不同 (溫 等, 1984)。

考慮台灣地區區域性分佈及地質圖 (圖7.10及7.11) 及第 7.4節所述之板塊運動, 將台灣地區分成三個地震帶, 蘭嶼恰位於東南部地震區。以1973年至1979年之  $M_0$  資料 (Tsai et al., 1981) 算出本區之 a, b 值 (圖7.12)：

$$\log N = 6.66 - 1.14 M_L$$

(已知  $M_L = 0.33 \pm 1.04 M_0 \pm 0.26$ , Liaw et. al, 1981)

以東南部地震區而言 (圖7.13) 由1963至1985年之資料, 考慮較大區域之中層深度震源 (35~200 Km) 及較小區域之蘭嶼淺震區 (0~35 Km) 所得平均年發生地震率之關係式 (Tsai, 1987)：

$$\begin{array}{l} \log N = \left. \begin{array}{l} 4.982 \\ 5.018 \\ 6.199 \end{array} \right\} - 0.866 M_L \quad (\text{東南部中層地震區}) \\ \log N = \left. \begin{array}{l} 6.436 \end{array} \right\} - 1.074 M_L \quad (\text{小蘭嶼淺震區}) \end{array}$$

等號右側第一項為可能之上、下限值，取其平均值比較計算出之預期值與觀測值（後者參考 俞 等，1988）。其結果如表 7.3。其中 $M_b < 6$ 之十年平均年發生數誤差較三年者大，而 $M \geq 6$ 之十年平均年發生數誤差較小，顯示當 $M_b$ 愈大時（ $M_b \geq 6$ ）長期（十年）的年平均誤差較短期（三年）的少。（註： $M_b$ 為TTSN所定出之平均總震動時間規模）

各國地震工程學者曾提出不同的地震加速度衰減經驗公式，為估計蘭嶼地區最大可能之地震加速度，在此選用Campbell (1981) 之衰減模式：

$$a = b_1 e^{b_2 M} (R + b_4 e^{b_5 M})^{-b_3}$$

a：最大水平加速度 (g)

M：地震規模

R：場址與斷層之距離 (Km)

$b_1 \sim b_5$ ：常數

EIE (1984)利用台灣地區強震資料得出

$$b_1 = 0.0047 \quad b_3 = 1.05 \quad b_5 = 0.875$$

$$b_2 = 1.024 \quad b_4 = 0.0177$$

欲估計最大可能加速度除需有記錄之最大地震規模外，尚需場址與斷層之距離 R，若考慮第 7.2節所述之靠近蘭嶼西北方密集震源為可能之斷層帶（以1978年7月23日之小蘭嶼附近強烈地震震源深度 6.1公里為垂直距，表 7.4，(Lin et al., 1981)，所得斜面距24Km（圖7.14）為斷層距 R。考慮可能斷層長度36Km（參考Wang et al. 之震源分布之密集長度），以斷層長/震源規模關係式(Tsai et al., 1987)：

$$L = \exp(1.006 M_L - 3.232) \quad (\text{圖7.15})$$

其中 $L=36$  得出可能之地震規模：

$$M_L = 6.8$$

根據以往之經驗 (EIE, 1984; Yeh et al., 1984; 溫 等, 1984)，以經驗公式算出之規模。在此取 $M_L = 6.8$ 為最大地震規模，由EIE 式算出 a之值為0.15 g。

## 7.5 討論：

一般地震的發生與構造活動有極密切的關係。根據美國核能管制委員會 (US NRC) 之準則，地震若再次發生而使場址受到嚴重影響為潛在的不利條件；美國能源部 (USDOE) 也強調最大地震再次發生所伴隨之地表運動，對處置場可能造成衝擊。因此，未來可能之最大地震所伴隨之地表運動是否對處置場之施工、運作及其結構體構成嚴重之威脅，乃是評估場址的一項重要考慮。

台灣東部地區位於歐亞板塊與菲律賓板塊交接處 (圖7.16)，地震頻繁，小蘭嶼地處此活動帶。由分析資料顯示此區之地震次數與釋出能量佔台灣地區的70%以上。小蘭嶼地區預期 1000 年內之 $M_0 \geq 7$ 的地震將有60次很有可能影響未來處置場的安全穩定性。

徐氏 (徐 等, 1980) 將本區列為強震區，並明白指出本區在工程上的設計應考慮  $a$  為 0.25 g (徐, 1988)，而本文所估計之  $a$  值 (0.16 g) 略低。

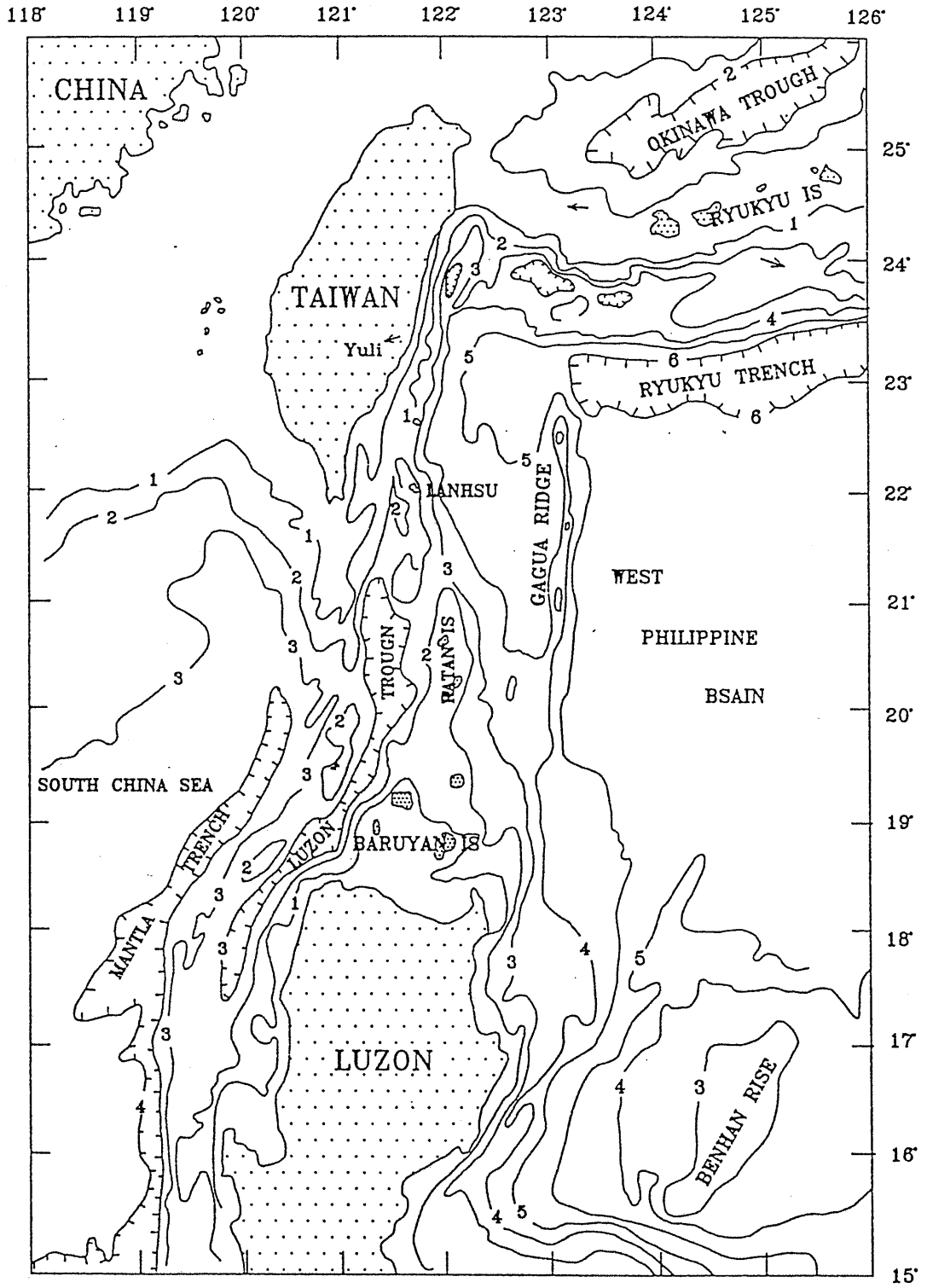


圖7.1 台灣地區位置示意圖 (等深線以km表示)。

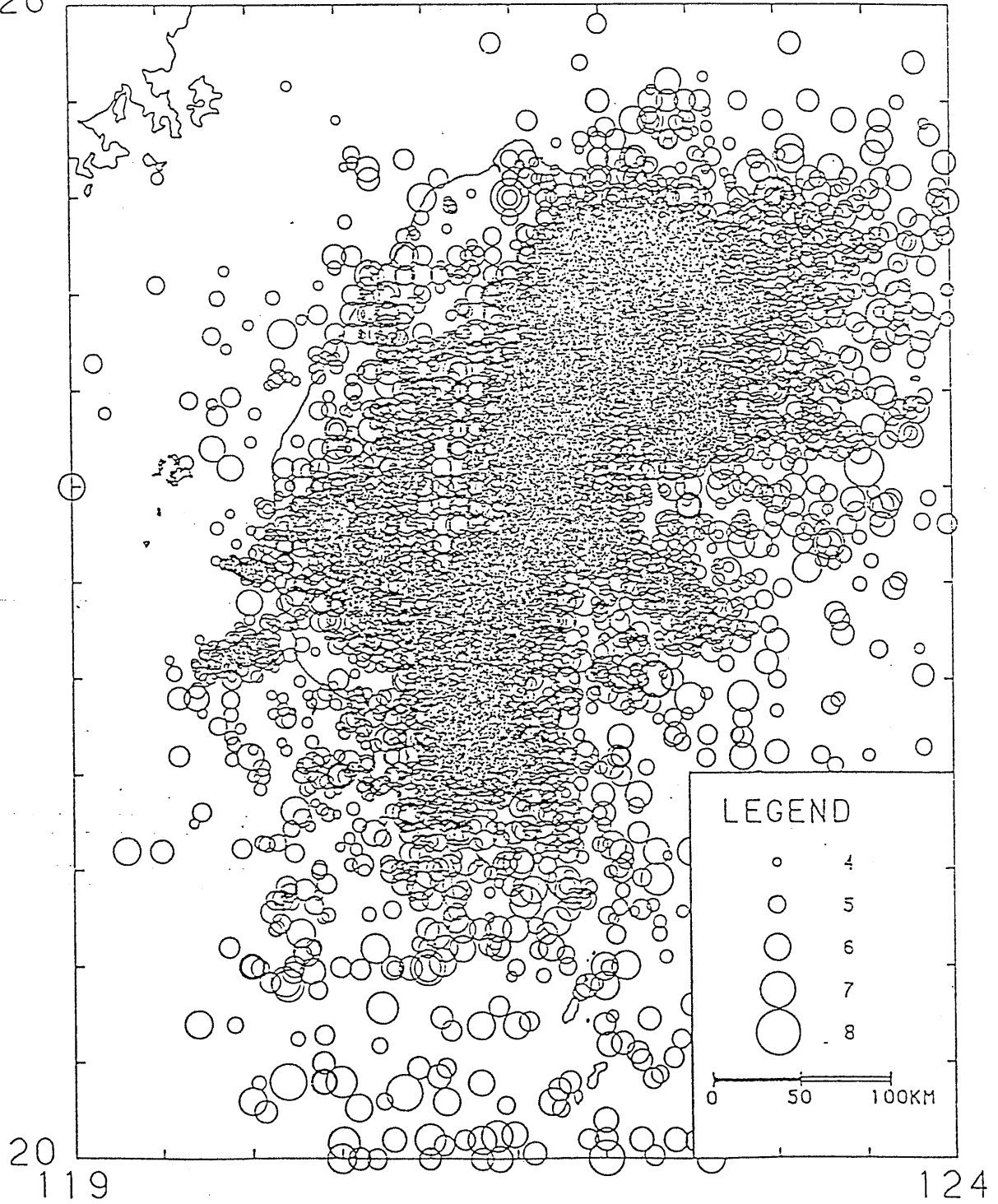


圖7.2 台灣地區之地震分布，資料時間：1889年至1988年。  
(參考 鄭 等，1989)



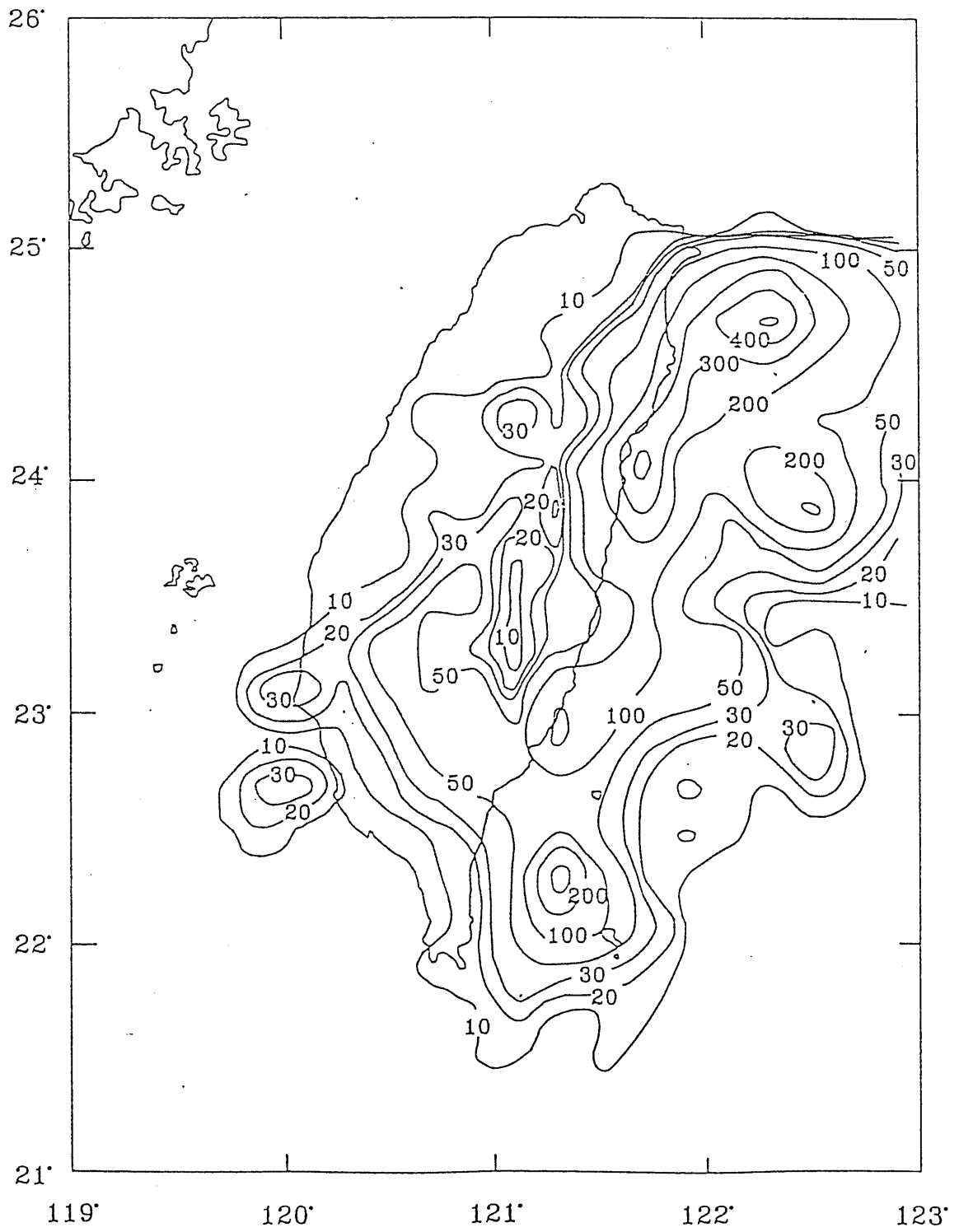


圖7.3b 台灣地等次數地震圖， $M \geq 2.0$ ， $L \leq 0$ ，資料時間：1973年至1988年。  
 (參考 鄭 等, 1989)



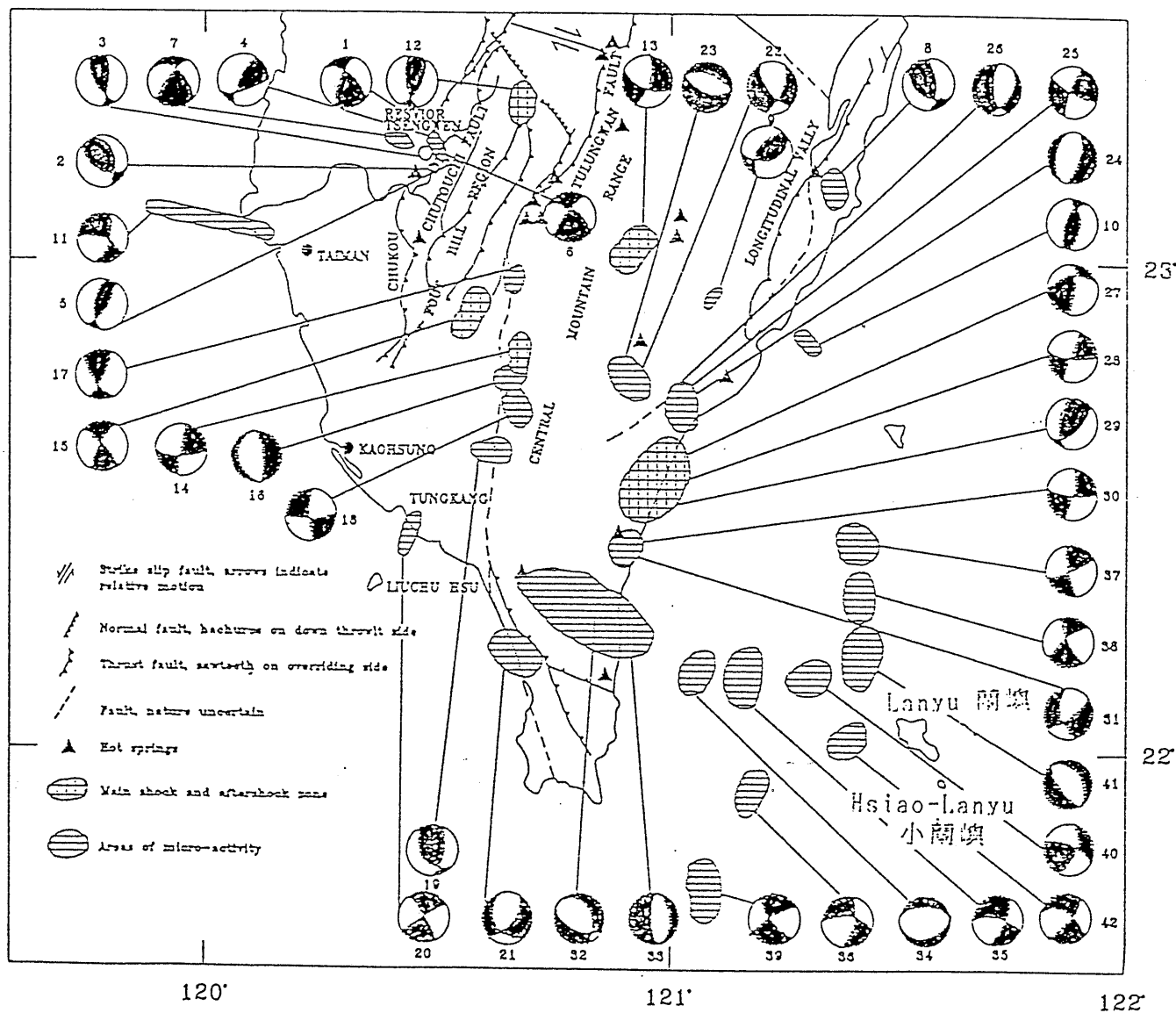


圖7.5 台灣南部地區之合成斷層面解。  
 (參考 Lin et al., 1981)

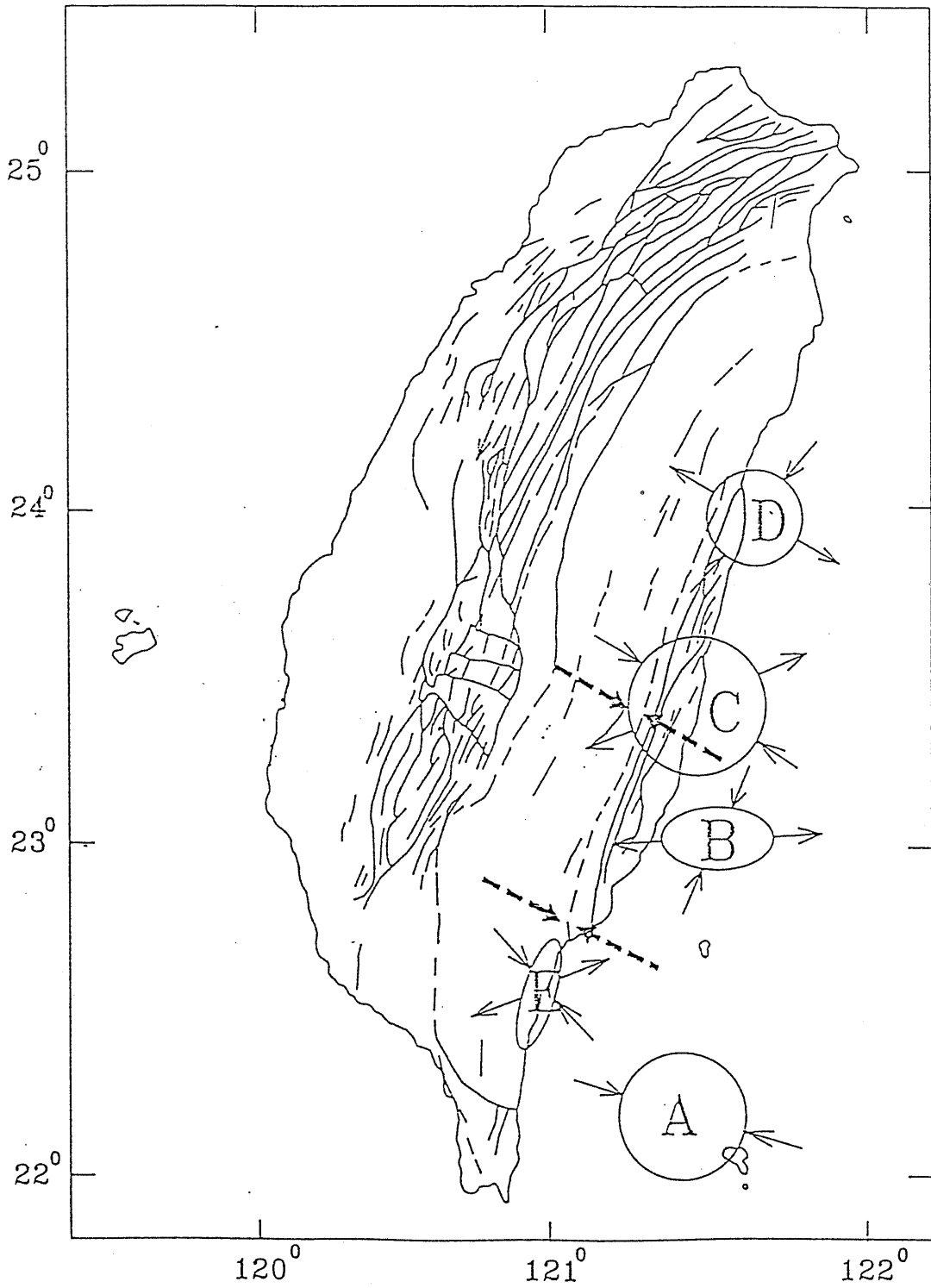


圖7.6 選擇5個區域水平投影之最大及最小主應力分布。  
 (參考 Lin et al., 1985)

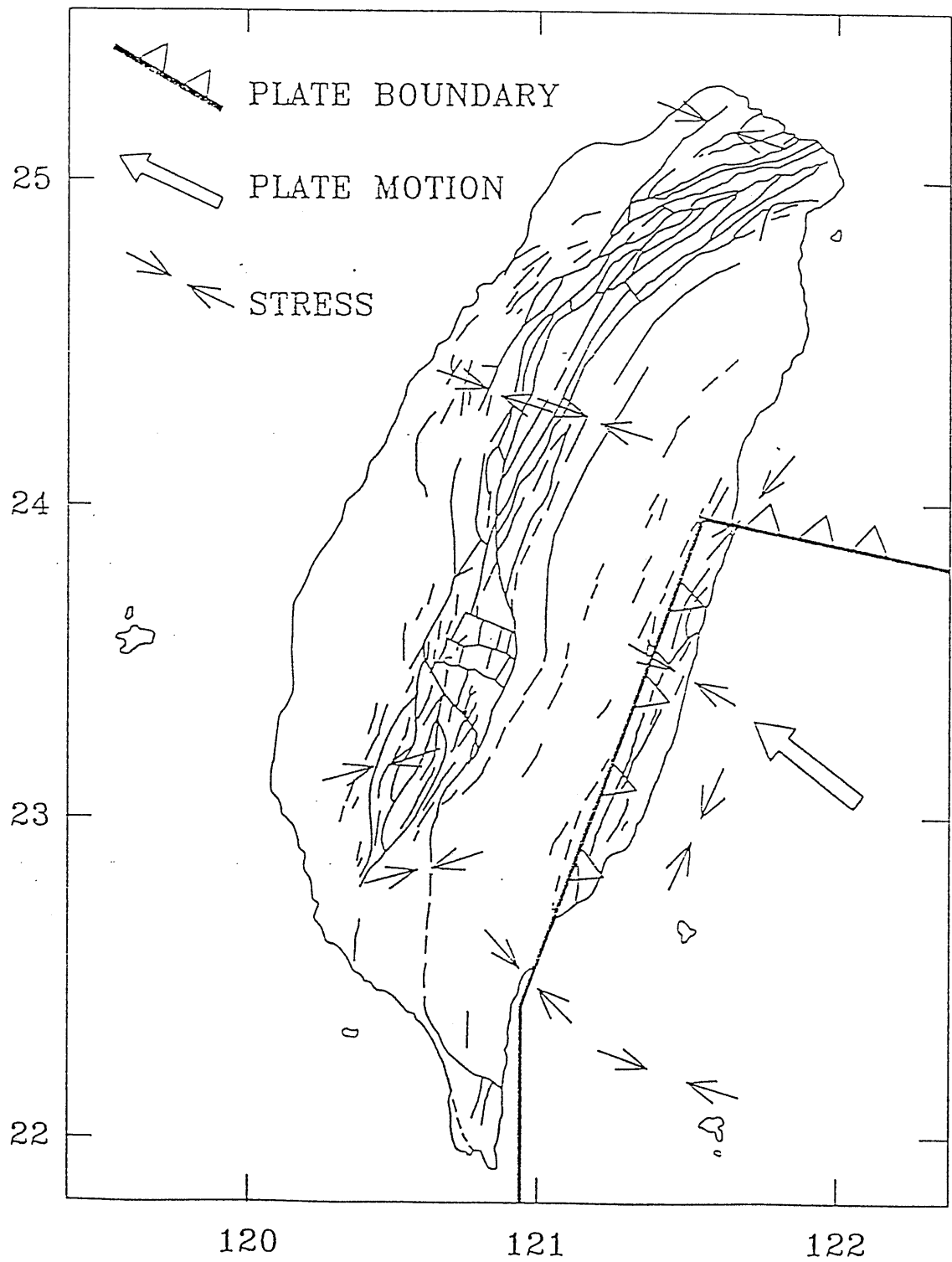


圖7.7 台灣東部板塊運動示意圖。  
 (參考 Lin et al., 1985)

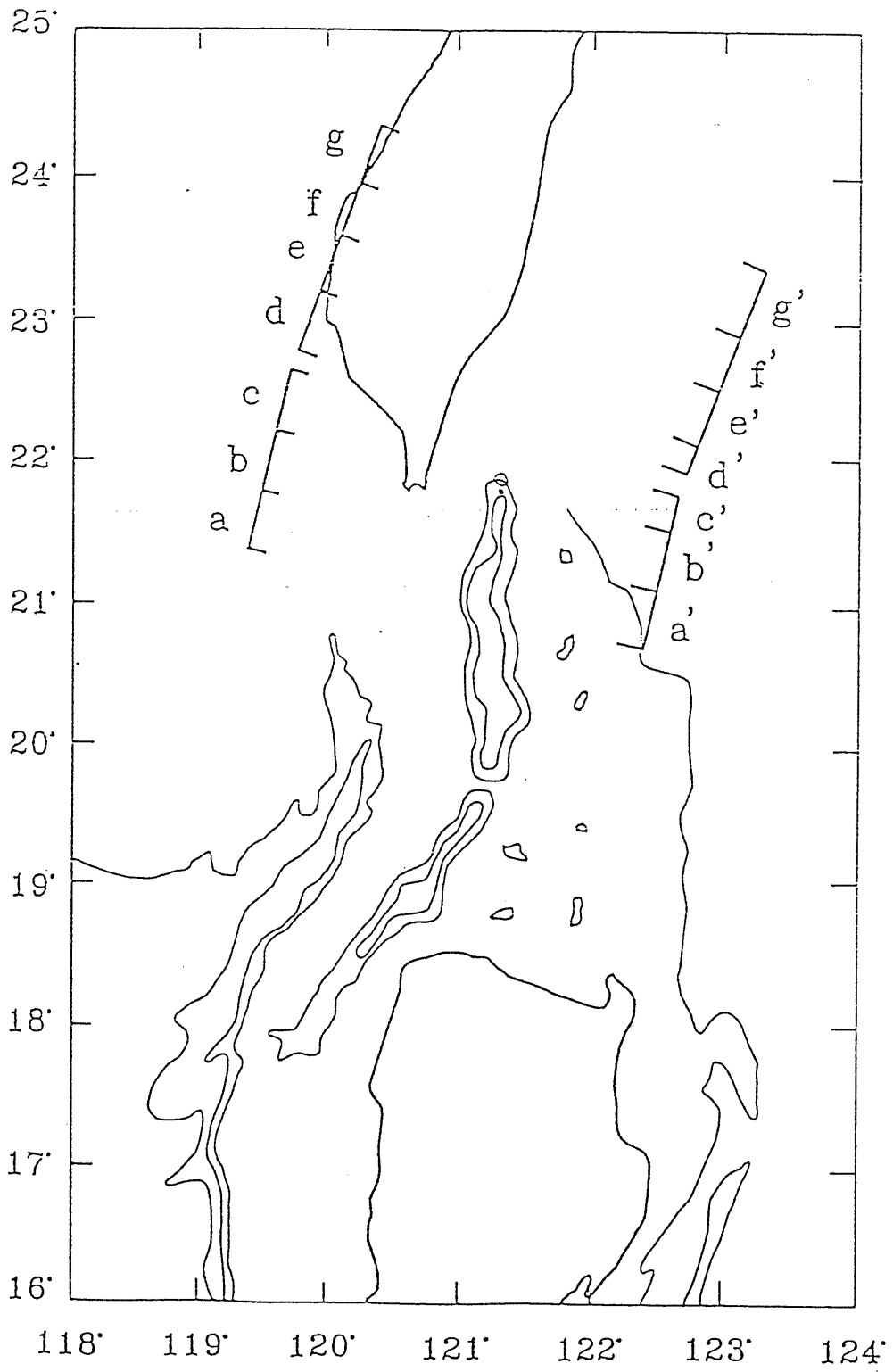


圖7.8 台灣東南區域選擇地震垂直分布之剖面。  
 (參考 Lin et al., 1981)

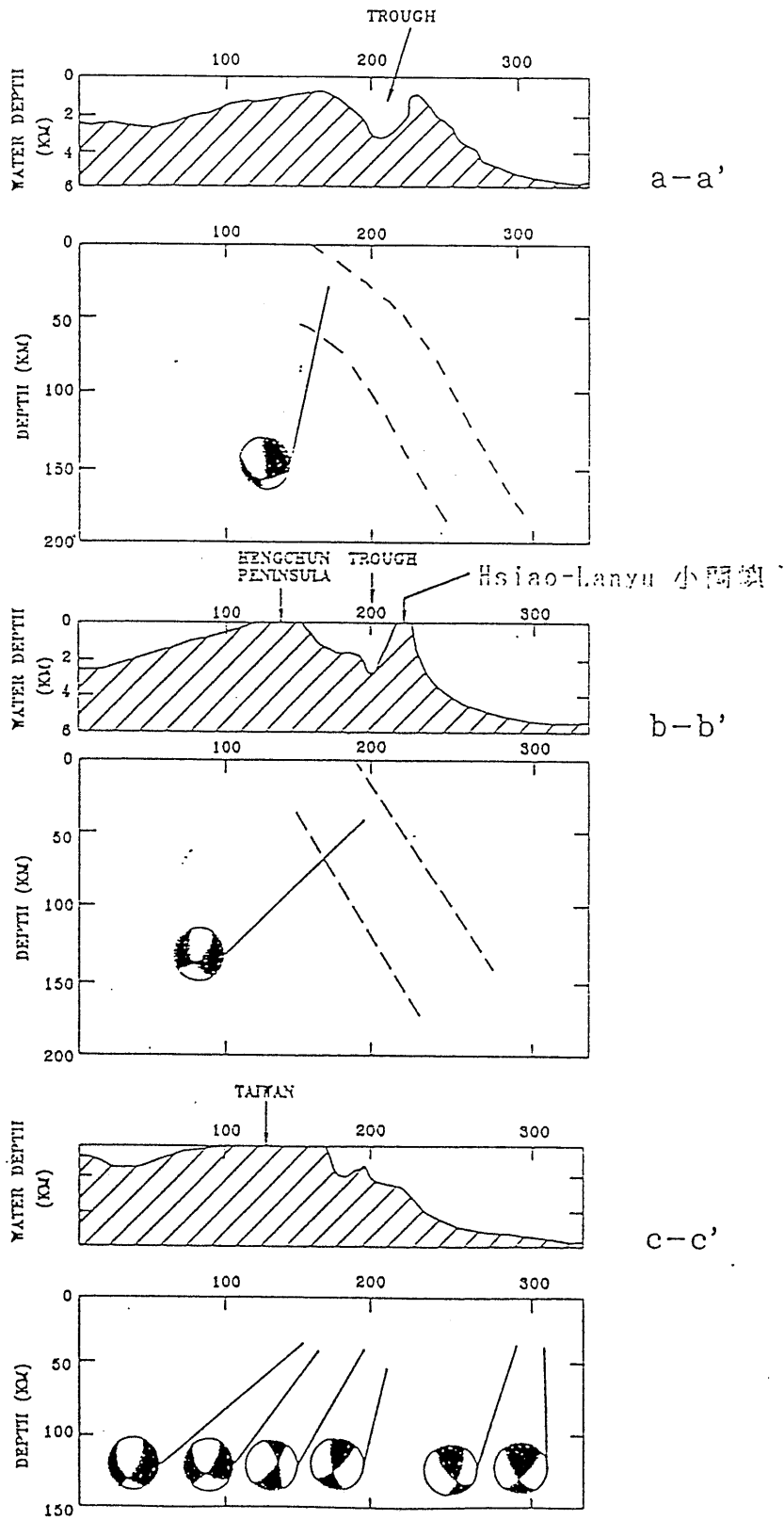


圖 7.9 圖 7.8 投影在垂直面上之斷層面解。  
(參考 Lin et al., 1981)

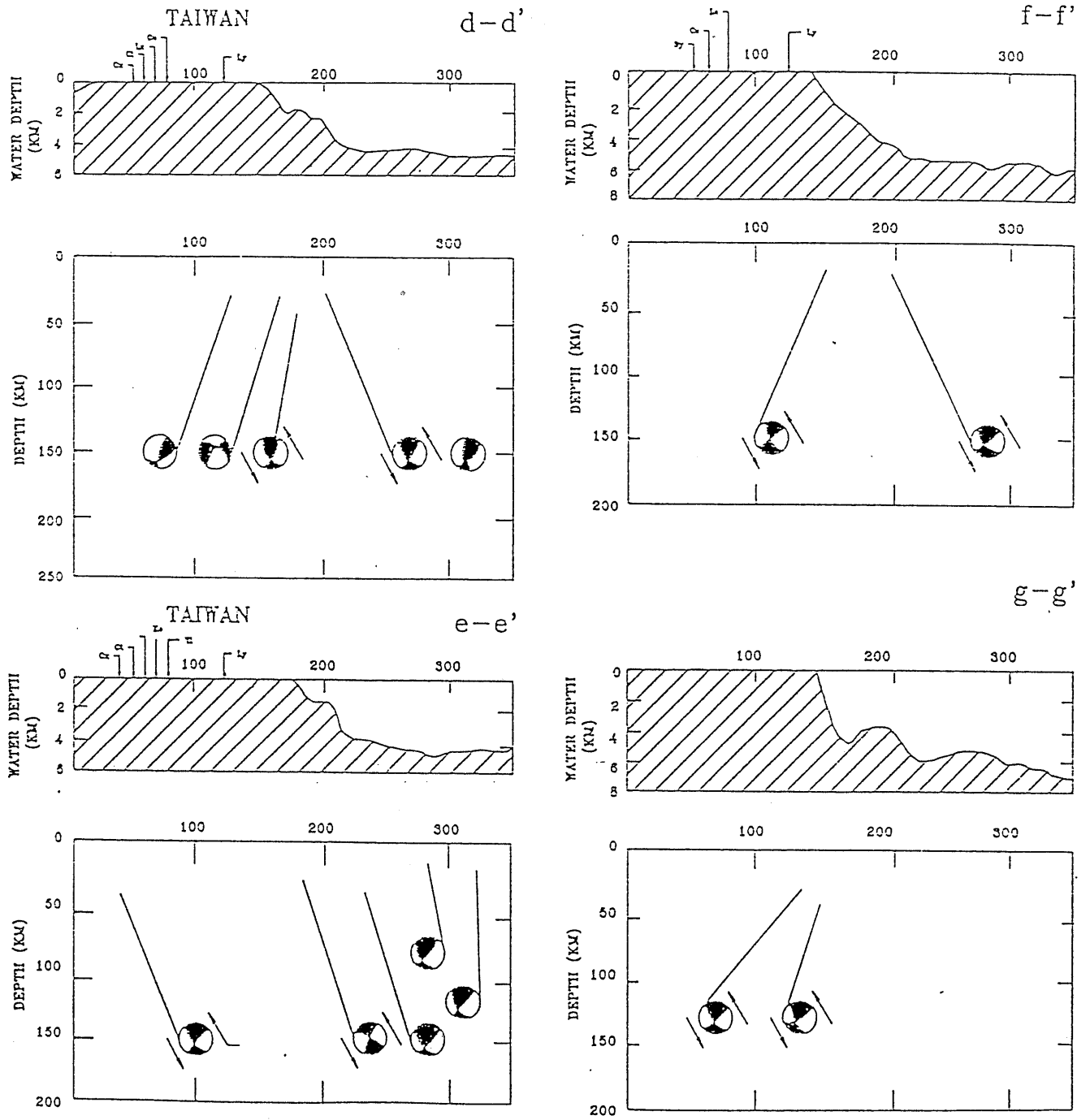


圖7.9 圖7.8 投影在垂直面上之斷層面解 (續)。

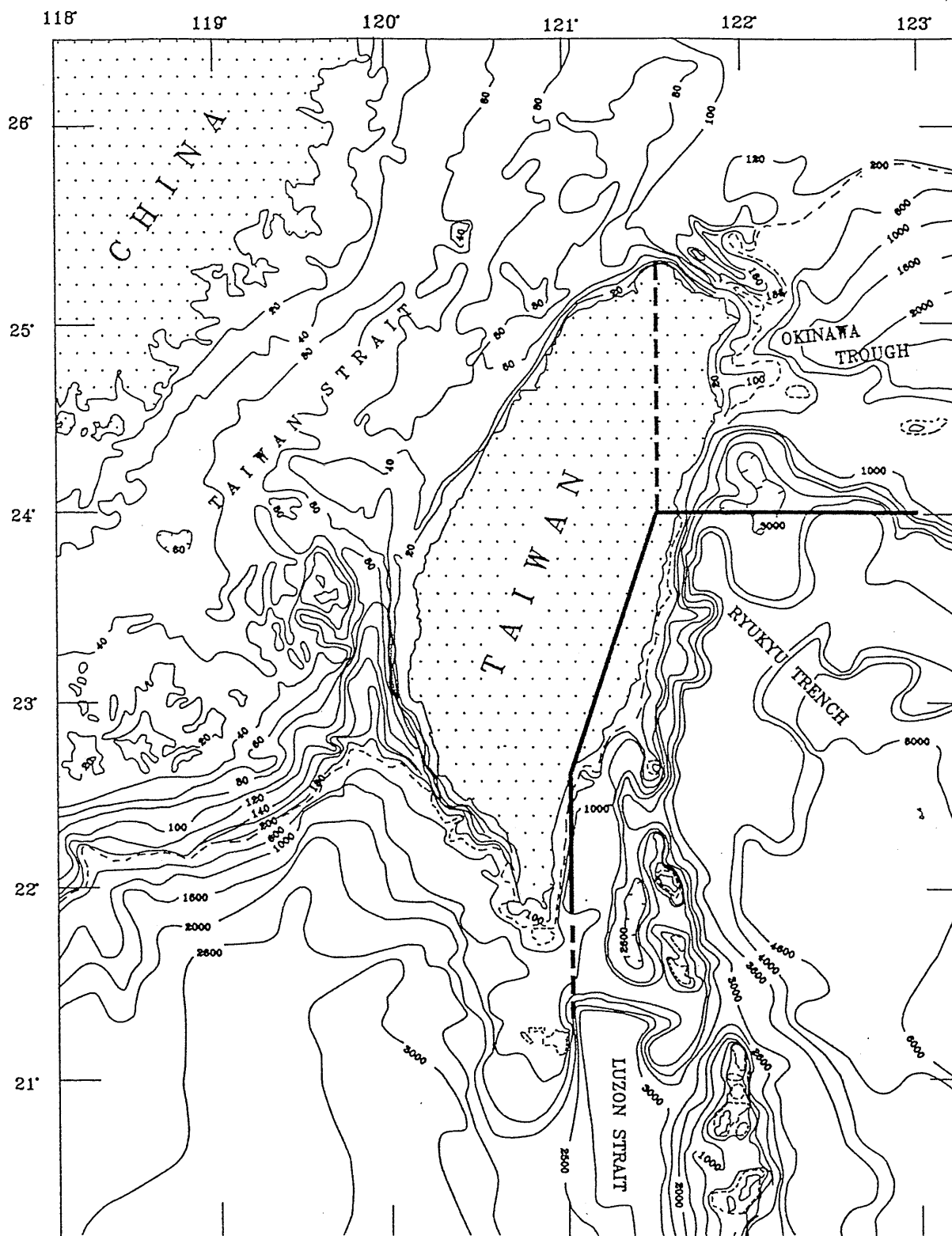


圖 7.10 臺灣附近海底地形分布圖

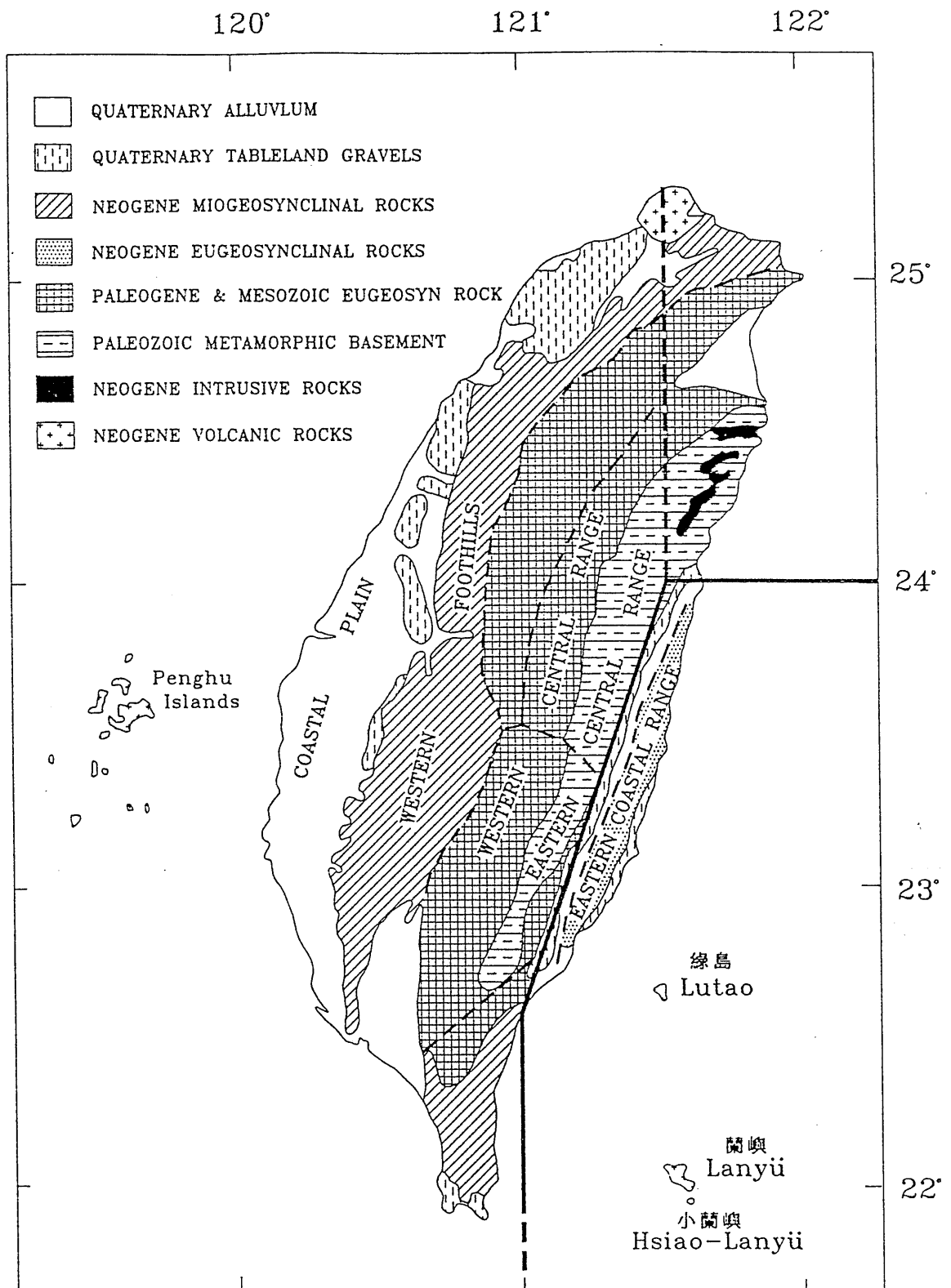


圖 7.11 臺灣地區之地質圖 (參考 Tsai et al., 1981)

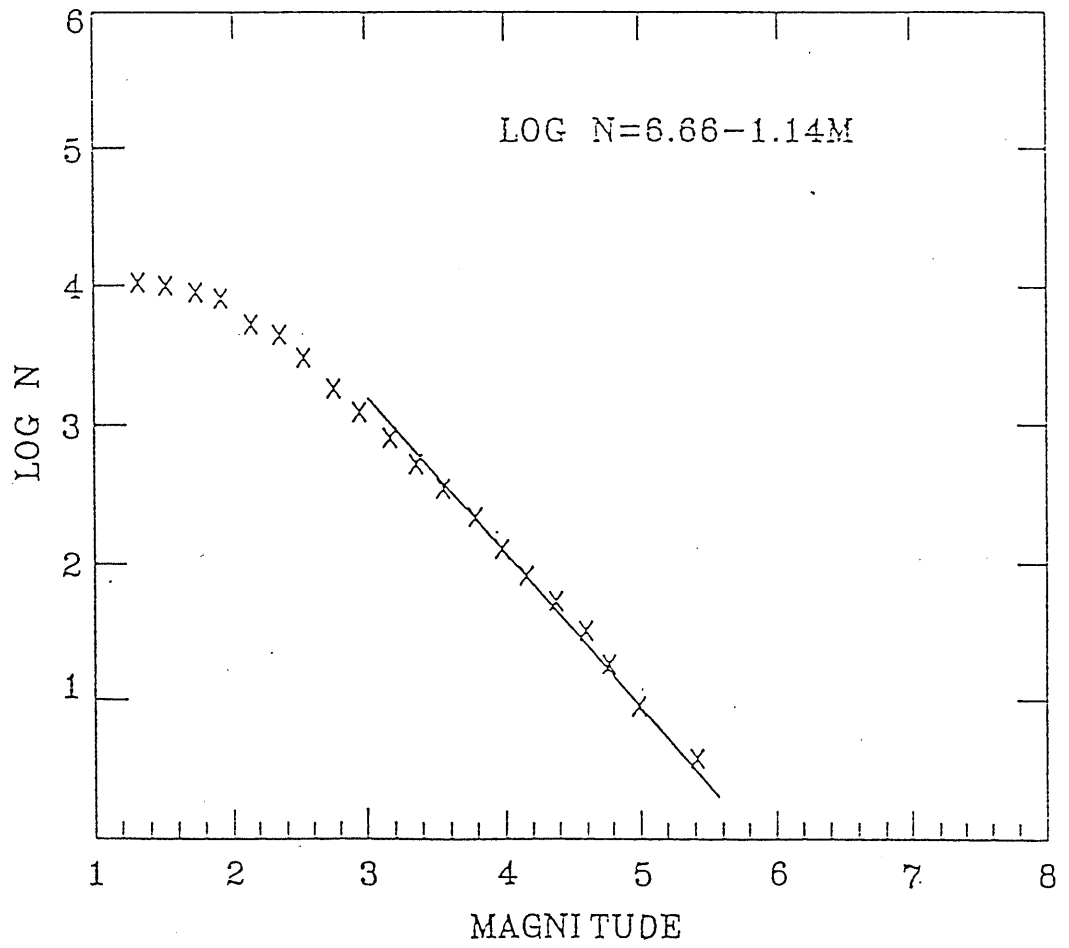


圖7.12 地震次數與震度之迴歸關係。  
(參考 Tsai et al., 1981)

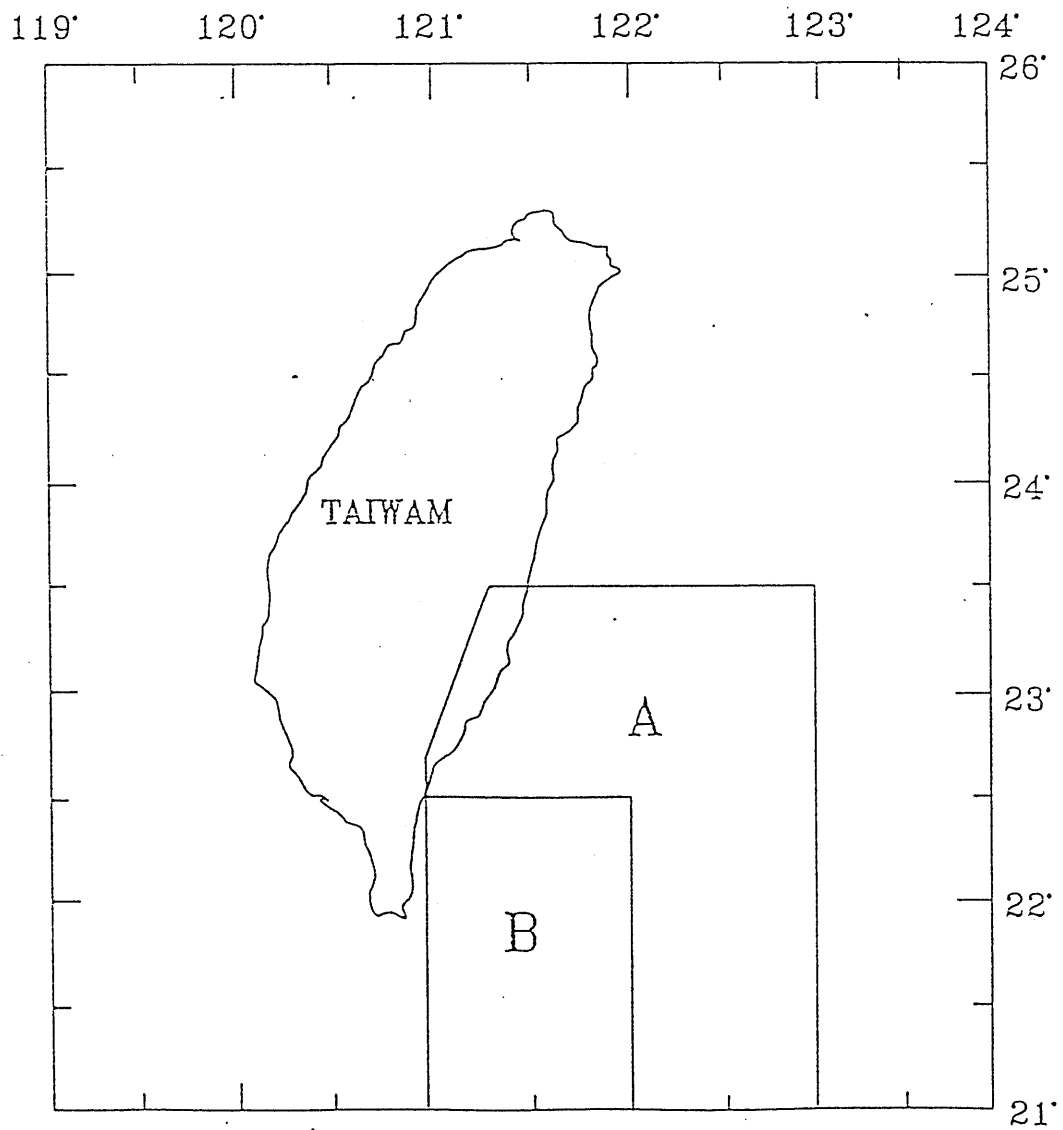


圖7.13 台灣東南區域，小蘭嶼淺震區B及東南部中層地震區A。  
(參考 Tsai et al., 1987)

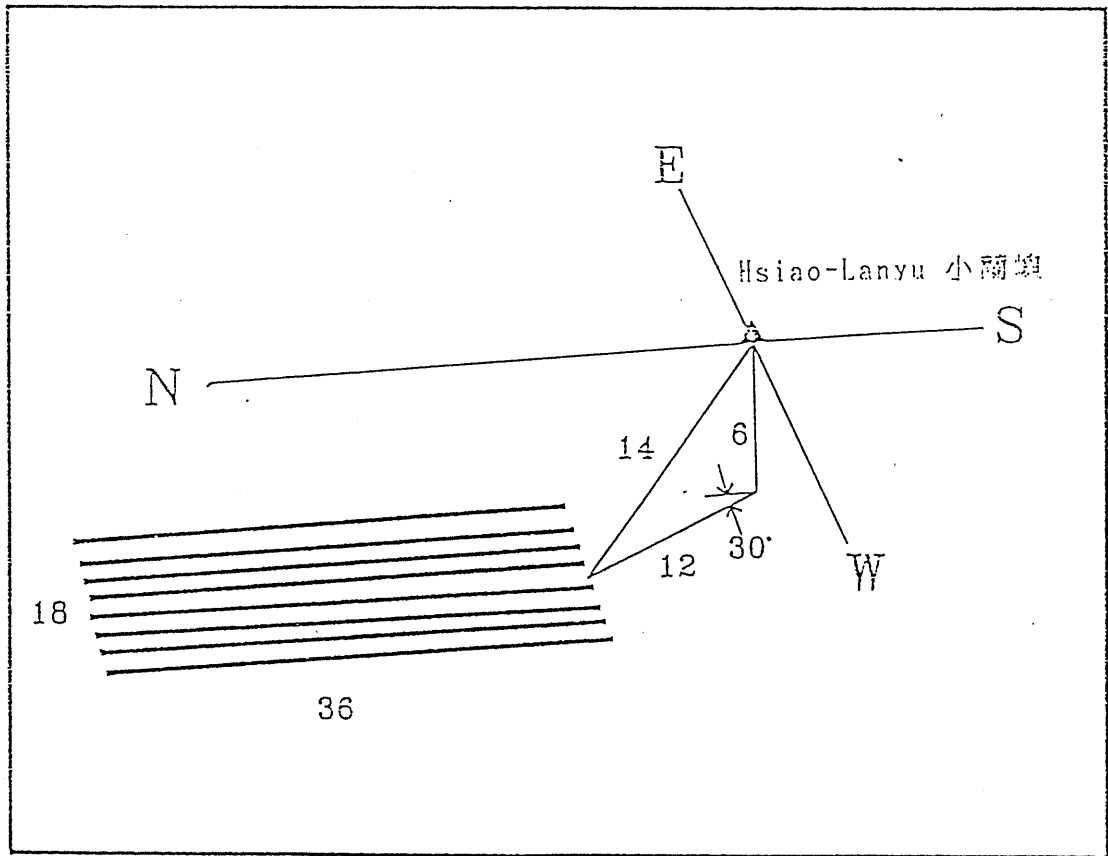


圖7.14 斷層與小蘭嶼之距離關係。

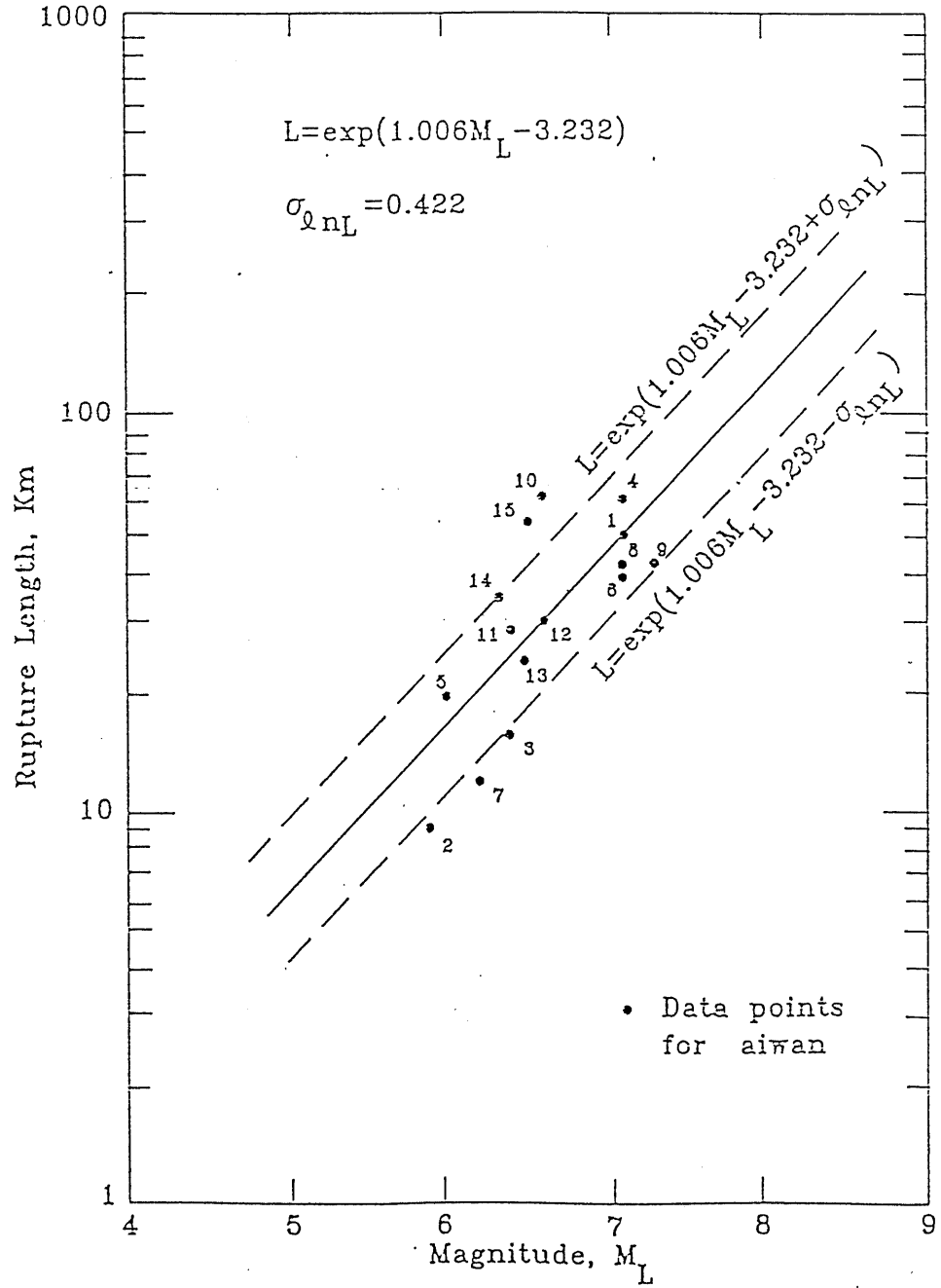


圖7.15 台灣地區斷層長度與Richter 震度關係，其中 $\sigma \ln L$ 表示斷層長度之標準偏差。

(參考 Tsai et al., 1987)

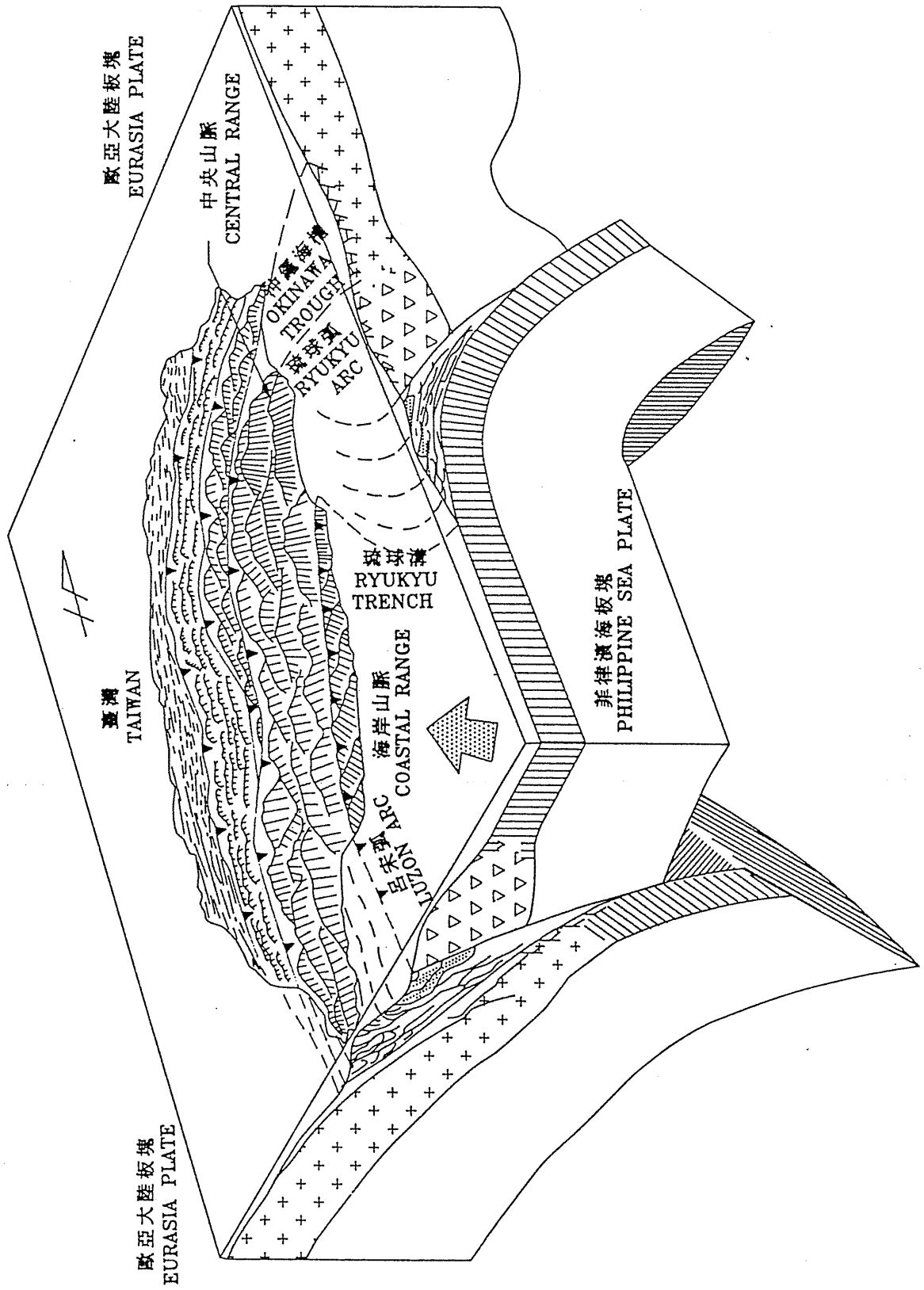


圖 7.16 臺灣地區立體板塊構造示意圖 (參考 何 1986)

表 7.1 台灣東南區之合成斷層面解

Event Number	Pole 1 AZ, PL	Pole 2 AZ, PL	p-axis AZ, PL	T-Axis AZ, PL	Survey Period	Source <sup>+</sup>
1	96,52	234,44	258, 5	154,71	Apr. 1-Apr.27,1973	M
2	44,50	244,40	54, 5	298,80	Ditto	M
3	258,54	60,39	247,10	22,77	Jan. 1-Jan.26,1973	M
4	350,75	116,11	308,34	99,53	Ditto	M
5	106,31	295,62	290,15	97,75	Ditto	M
6	90,20	216,58	252,20	124,56	Jan. 1-Jan.22,1974	M
7	104,32	214,28	70, 4	126,46	Jan. 1-Jan.22,1974	M
8	- -	- -	- -	- -	Apr. 1-May.31,1974	M
9	- -	- -	- -	- -	Ditto	M
10	- -	- -	- -	- -	Ditto	M
11	254,55	11,22	219,14	325,51	Jul. 3-Jul.12,1975	S
12	95,30	319,54	289,12	57,52	Apr.15-Apr.19,1975	A
13	274,26	18,22	332,33	235, 5	May 2-May.23,1977	S
14	88, 2	355,21	49,10	46,18	May 2-May.10,1977	A
15	108,20	195,20	244, 4	151,25	Oct.17-Oct.35,1977	A
16	86,86	266, 4	266,49	86,41	Mar.26-Jun. 6,1978	M
17	296,16	28,16	72, 3	17,20	Ditto	M
18	273, 0	3, 0	48, 0	318, 0	Ditto	M
19	270,54	53,40	250,12	10,66	Ditto	M
20	135,70	229,10	45, 8	184,24	Ditto	M
21	280,45	51,30	358,42	261, 8	Ditto	M
22	54,48	276,40	344,68	76, 2	Ditto	M
23	10,30	215,60	348,70	200,15	Ditto	M
24	282,49	102, 6	282,49	102,41	Ditto	M
25	102, 6	20,22	324,10	58,22	Apr. 4-Apr.10,1978	A
26	318,45	82,30	30,56	290, 6	Mar.26-Jun. 6,1978	M
27	292,48	160,32	318, 6	216,62	Mar.26-Jun. 6,1978	M
28	284, 0	14, 0	329, 0	239, 0	Apr. 8-Apr.30,1978	A
29	134,40	280,46	118, 6	12,73	Mar.26-Jun. 6,1978	M
30	280,12	187,10	324, 2	324,18	Apr. 8-Apr.30,1978	A
31	324, 4	58,56	4,63	106,20	Mar.26-Jun. 6,1978	M
32	62,46	48,44	18,82	236, 2	Ditto	M

(參考 Lin et al., 1981, +: M = Microearthquake, A = Aftershock sequence, S = Microearthquake swarm)

表 7.1 台灣東南區之合成斷層面解 (續)

Event	Pole 1	Pole 2	p-axis	T-Axis	Survey	Source <sup>+</sup>
Number	AZ,PL	AZ,PL	AZ,PL	AZ,PL	Period	
33	106, 4	289,86	109,50	289,40	Ditto	M
34	170,40	350,50	170,85	350, 5	Ditto	M
35	284,20	190,14	233,24	326, 4	Ditto	M
36	284,20	186,20	236,28	144, 2	Ditto	M
37	57,82	327,80	102, 2	12,14	Ditto	M
38	63, 0	333, 0	288, 0	18, 0	Ditto	M
39	236, 0	326, 0	11, 0	101, 0	Ditto	M
40	296,60	183,14	326, 6	242,36	Ditto	M
41	48,10	228,80	48,55	242,35	Ditto	M
42	320,20	226,30	268,38	176, 7	Ditto	M

(參考 Lin et al., 1981, +: M = Microearthquake, A = Aftershock sequence, S = Microearthquake swarm)

表 7.2 平均 T 軸及 P 軸方向

Group Code	No. of Events	Mean P-Axis			Mean T-Axis		
		Azimuth	Plunge	H <sub>95</sub>	Azimuth	Plunge	H <sub>95</sub>
A	16	N 16° W	2°	25.5°			*
B	8	N 24° W	60°	18.3°	N 87° E	23°	25.6°
C	21	S 62° W	0°	13.3°	S 66° W	53°	11.0°
D	13	S 50° E	9°	17.2°	N 61° W	4°	27.5°
E	7	S 63° W	0°	19.5°			*

(參考 Lin et al., 1985, where \* represents H<sub>95</sub> > 30° after two cycles of rejection, no statistically meaningful mean T-axis)

表 7.3 觀測及預期之地震發生率 (每年次數)

資料時間		$M_b \geq 5$	$M_b \geq 6$	$M_b \geq 7$
	預期發生率	5.566	0.690	0.077
1983 ~ 1985	觀測發生率	8	2	0
	差 值	- 0.8	- 0.43	0.256
	預期發生率	18.555	2.29	0.256
1973 ~ 1982	觀測發生率	7	0	0
	差 值	1.15	0.229	0.0256

(負值表示預期值小於觀測值)

表 7.4 1978年7月23日發生於小蘭嶼附近之地震

---

時 間	14 時 42 分 38.2 秒 (格林威治)
震 央	北緯 $22^{\circ} 21.11'$ / 東經 $121^{\circ} 19.72'$
深 度	6.1 公里
震 度	$M_b$ 6.0 $M_L$ 6.6 Hsu 7.2

---

(參考 Lee et al., 1981)

## 8. 討論與結論

雖然在無人離島興建放射性核廢料處置場可能遭遇之社會溝通問題較少，但是處置場所在地的客觀條件仍應事先做好審慎的評估，以確保處置期間的安全性。一般而言，中、低放射性核廢料終極處置場的使用年限約為三百年至五百年。因此除了在客觀條件方面做好評估外，工程設施的堅固與耐久性也是相當重要的條件。以下就這次地質初勘與文獻蒐集所得到的資料提出下列幾點意見討論。

- (1) 小蘭嶼同蘭嶼一樣位在海洋板塊與大陸板塊碰撞帶的島弧構造之上，此區也是台灣附近地震較頻繁的東部地區，其地盤的穩定性不如西部地區，因此就大地構造而言，為一不利因素。
- (2) 就地形而言，小蘭嶼尚有少量平地面積，北面與南面有比較寬廣的平緩地形，若與火山口區域共同規劃平整，則可利用面積可增加甚多，應不難規劃處置場及港口設施。
- (3) 港口位置之選擇與沿岸之海底地形關係密切。根據這次調查的結果發現在有鵝卵石分佈的海岸，其附近的海底地形很淺，同時海底也散佈著許多大塊的卵石；而在峭壁地形附近的海岸（如東岸）其海底地形則較深。
- (4) 小蘭嶼孤懸在黑潮流域之中，因此其附近海流流速相當快速，約 $0.7\text{m/s}$ ，再加上夏季的西南季風與冬季的東北季風更加強了附近海流的速度，與海流的不穩定性，而港口位置之選擇，對於將來運輸船進港的安全顧慮關係甚鉅，因此有必要對附近海流之流況進行詳實的觀測與評估。
- (5) 小蘭嶼雖無氣象觀測站，但因與蘭嶼位置相近，因此其年平均降雨量採用蘭嶼的記錄，約為 $3070$ 公厘。此外，小蘭嶼孤懸海中，無任何屏障，每年除了受冬季與夏季季風吹襲外，亦常受颱風之襲擊。
- (6) 小蘭嶼之地質構造單純，是一個典型的火山島，位於兩個板塊碰撞所發生的島弧構造之上。島之周緣，在西岸偏北附近發現一具有輕微摺曲現象的破碎帶，在東岸海崖處發現疑似斷層的跡象。在這次調查中由於東北季風的關係，海流不穩定，船隻無法靠近，因此無法獲得更確實的資料。在東岸發現有一熔岩流向上噴出，而與集塊岩間形成明顯的接觸面。沿岸一帶由集塊岩或

安山岩構成的峭壁及陡坡解理發達，並經常可見因風化而剝落之岩塊堆積所形成的岩錐與散佈在滑落軌跡之中的岩屑。在島之東、西兩側可見到一、二個海蝕洞，但在西側的海蝕洞如今已被崩落之岩塊堵住。島中央為火山口之構造，其間有三個噴火口，概以東、西、南三個方位排列，各噴火口間以低窪鞍部地形隔開。

- (7) 小蘭嶼雖然與蘭嶼相距3海哩，但卻無隆起的珊瑚礁，也沒有海階地形，似顯示地殼隆起現象較不顯著。小蘭嶼島上卻沒有紅土層的分布，岩石也未受礦化作用及熱水換質之影響，而火成岩之基質組成礦物均保持完整。對於處置場址應是有利的條件。
- (8) 對小蘭嶼的岩石礦物進行鉀-氬定年分析，發現其年齡比蘭嶼年輕約二百萬年，而與綠島同屬於上新世至近代之火成活動產物。以鈷-鋇定年法所得之結果與鉀-氬定年的結果頗為一致。
- (9) 測量安山岩中鋇同位素初始值的比值 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )，所得結果與綠島一樣，均落在0.70478~0.70524之間，而與蘭嶼的輝石安山岩 (0.70472)亦頗相近。這個比值暗示著安山岩的形成不是與大量海水交換元素，就是混有大陸地殼物質。換言之，小蘭嶼的形成是發生在海底，海洋板塊與大陸板塊相互作用的結果。
- (10) 小蘭嶼之安山岩中常有包裹體，此包裹體主要是以基性岩為主，且未受礦化作用。其後期的火山岩流常為富含黑雲母斑晶之黑雲母-角閃石安山岩或含黑雲母角閃石安山岩。岩石中之鉀含量高於海岸山脈與蘭嶼，是屬於鈣鹼岩系的母岩漿。
- (11) 由岩石組成分析的結果顯示小蘭嶼安山岩的鐵、鎂含量均較蘭嶼為高，同時鐵元素所形成的氧化鐵對於鈷-60、鋇-90與銫-134的吸附能力均有加強的作用，因此小蘭嶼的地質也具有延滯核種遷移的能力。
- (12) 島上由於地形的關係，雖然在南、北兩邊有山谷的地形，但是卻完全乾涸，且都被綠色植物所佈滿。除了在島中央的火山口發現有雨水聚集，以及在島之南側海崖處發現有涓涓的泉水湧出外。在其他地方並未發現有明顯之水流。由於在北側之地表也沒有發現泉水或濕潤之土壤，因此認為在島之北側的

地下水位面與地表間仍有一段距離。從全島地形與火山口的觀察，可以知道火山口湖為島上地下水的主要補注區，且地下水流主要是向島之南方流出入海。這點對於將來地下水的監測與管制相當有利。

(13)在島之南側所採集之泉水水質與蘭嶼之水樣比較，發現在主要陰離子部分差異不大，但在主要陽離子部分則有明顯的不同。小蘭嶼的泉水組成以鈉、鉀離子為主，而蘭嶼者以鈣、鎂離子為主，其原因可能是蘭嶼安山岩中所含角閃石礦物較小蘭嶼者多，或是其他區域性因素使得小蘭嶼礦石中的一價元素（鈉與鉀）的溶解度大於蘭嶼者，相對地二價的鈣、鎂元素的溶解度又小於蘭嶼者。

(14)小蘭嶼為純粹由集塊岩與安山岩組成的火山島，島上尚無可供開採的礦產資源，人為干擾的顧慮不大。

由於大地構造的不利因素，在小蘭嶼設置高放射性核廢料處置場較難被接受。但是若考慮在小蘭嶼設置中、低放射性核廢料處置場。由於其安全時限約為三百年至五百年，且若為淺層處置，對耐震結構物的施工較易，因此較為可行。在小蘭嶼設置處置場的優點除了為無人島外，其周圍有黑潮經過，由於黑潮的流量相當大，因此，萬一不幸有輻射外洩的情況發生，大量且快速流動的海水可加以稀釋至安全程度，而應不致嚴重影響附近海域的生態環境。此外，小蘭嶼距離目前的蘭嶼貯存場只有約3海哩的航程，將來在運輸作業方面遭遇的風險甚小。同時，也比較符合可能對造成污染的設施應集中管制的原則。因此，預期在社會溝通方面所遭遇的阻力應比其他離島為單純。至於場址設置之地點，純就地質、地形與水文等觀點而言，島之南面或北面比較有利。處置場設在小蘭嶼較為不利的因素力地震，但此一缺點似可以工程方法加以補救。

## 9. 參考文獻

- 林朝榮 (1957) : 台灣省通志稿, 卷一, 土地志、地理篇第一冊、地形。台灣省文獻委員會出版。
- 李思根 (1983) : 蘭嶼地形之研究。花蓮師專學報, 第四期, p229-258。
- 李白華 (1983) : 台灣及附近強震資料整理及時空分佈研究, 行政院國家科學委員會 NSC72-0414-P052-01。
- 何春蓀 (1986) : 臺灣地區概論, 經濟部中央地質調查所。
- 林明德、劉文相、蔡義本 (1979) : 恆春、蘭嶼鄰近地區微震研究報告, 中央研究院地球科學研究所。
- 徐明同 (1988) : 地震工程, 中國工程師學會。
- 徐明同、蔡義本、茅聲燾 (1980) : 建築技術規則中震區劃分之修訂建議, 土木水利季刊, 6卷, 4期, 101-105。
- 俞錚嶸、王錦華 (1988) : 台灣遙記式地震觀測網地震資料之統計分析, 中央研究院地球科學研究所, 行政院國家科學委員會, NSC76-0202-M001-10、NSC77-0202-M001-047。
- 莊文星 (1988) : 台灣新生代晚期火山岩之定年與地球化學研究。國立台灣大學海洋研究所博士論文。
- 莊文星、羅俊光、劉文忠、陳聯燮 (1989) : 蘭嶼貯存場地下水與岩石調查及放射性核種吸附之模擬研究, 經濟部中央地質調查所彙刊, 第五號, 第81~100 頁。
- 溫國樑、葉永田、蔡義本 (1984) : 金山、國聖核能一、二廠廠址可能之地表最大水平瞬間加速度評估, 中央研究院地球科學研究所。
- 鄭世楠、葉永田 (1989) : 西元1604年至1988年台灣地區地震目錄, 中央研究院地球科學研究所, IES-R-661。
- Brunton, G.D. and McClain, W.C. (1977): Geological criteria for radioactive waste repositories, Y/OWI/TM-47, Office of Waste Isolation, Union carbide Corporation.

- Campbell, K.W. (1981): Near-source attenuation of peak horizontal acceleration, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 71, No. 6, 2039-2070.
- Cawthorn, R.G. and O'Hara, M.J. (1976) Amphibole fractionation in calc alkaline magma genesis. *Am. J. Sci.*, 276: 309-329.
- Chen, J.C. (1975) Geochemistry of andesites from the Coastal Range eastern Taiwan. *Proc. Geol. Soc. China* 18: 73-88.
- Chen, J.C. (1976) Geochemistry of Lanhsu andesites. *Acta Oceanogr. Taiwanica* 6: 77-87.
- Chen, J.C. and Huang, C.B. (1986) Geochemistry of late Cenozoic andesites from Taiwan. *Proc. Nat'l Sci. Council (R.O.C.)*, 10, 325-334.
- Chen, J.C. and Lin, F.J. (1980) Geochemistry of Lutao andesites. *Acta Oceanogr. Taiwanica* 11:49-69.
- Chi, W.R, Namson, J., and Suppe, J. (1981) Stratigraphic record of plate interactions in the Coastal Range of eastern Taiwan. *Mem. Geol. Soc. China*, 4, 155-194.
- Defant, M.J., Dario, J., Maury, R.C., Boer, J.D., and Joron, J.L. (1989) Geochemistry and tectonic setting of the Luzon arc, Philippines. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 101, P. 663-672.
- EIE (1984): Seismic hazard analysis of Taiwan Power company's nuclear power plant No. 2 at Kuosheng, report to AEC, R.O.C. Eastern International Engineers, Inc.
- Fisher, R.A. (1953): Dispersion a sphere. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A.*, 217, 295-305.
- Gutenberg, B. and C.F. Richter (1944): Frequency of earth-quakes in California, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 34, 185-188.
- Green, D.H. and Ringwood, A.E. (1967) The genesis of basaltic magmas.

- Contrib. Min. Petrol 15:103-190.
- Gill, J.B. (1981) Orogenic andesites and plate tectonics, Springer-Verlag, Berlin, 32-34.
- Hsu, M.T. (1971): Seismicity of Taiwan and some related problems, Bull. Intern. inst. Seis. Earthq. Eng., Vol.8, 41-60.
- Helz, R.T. (1973) Phase relations of basalts in their melting range at PH<sub>2</sub> = 5Kb as a function of oxygen fugacity. J. Petrol 14: 249-302.
- Heming, R.F. and Rankin, P.C. (1979) Ce-anomalous lavas from Rabaul Caldera, Papua New Guinea. G.C.A. 43: 1351-1355.
- Ho, C.S. (1988) An Introduction to the Geology of Taiwan: Explanatory Text of the Geologic Map of Taiwan. Second ed., C.G.S., MOEA pp.192.
- International Atomic Energy Agency (1983): Criteria for underground disposal of solid radioactive wastes. IAEA Safety Series, No.60.
- Lan, C.Y., Shen, J.S., and Lee, T. (1986) Rb-Sr isotopic study of andesites from Lu-Tao, Lan-Hsu, and Hsiao-Lan-Hsu: eruption ages and isotopic heterogeneity. Bull. Inst. Earth Sci., Academia Sinica, Vol.6, p.211-226.
- Lee, T.Q. (1983): Focal mechanism solutions and their tectonic implications in Taiwan region. Bull. IES, Vol.3, 37-54.
- Lee, T.Q. and Y.B. Tsai (1981): A study of the July 23, 1978 Lanhsu, Taiwan earthquake sequence. Bull. IES, Vol.1, 31-50.
- Liaw Z.S. and Y.B. Tsai (1981): Relation between the richter magnitude and total signal duration magnitude of Taiwan earthquakes. Bull. IES, Vol.1, 23-30.
- Lin, C.H., Y.H. Yeh and Y.B. Tsai (1985): Determination of regional principal stress directions in Taiwan from fault plan solution. Bull. IES, Vol.5, 67-85.

- Lin, M.T. and Y.B. Tsai (1981): Seismotectonics in Tawan-Luzon Area, Bull. IES. Vol.1,51-82.
- Menzie, M., Bhanchard, D., and Jacobs, J. (1977) Rare earth and trace element geochemistry of metabasalts from the Point Sal ophiolites, California. EPSL 37: 203-215.
- Pezzopane, S.K. and S.G. Wesnousky (1989): Large earthquakes and crustal deformation near Taiwan, J. Geophys. Res., 94(B6), 7250-7624.
- Richard, M., Bellon, H., Maury, R.C., Barrier, E. and Juang, W.S. (1986) Miocene to recent calc-alkalic volcanism in eastern Taiwan: K-Ar ages and petrography. Mem. Geol. Soc. China, 7, 369-382.
- Seno, T., T. moriyana, S. Stein, D.F. Woods, C. Demets, D. Argus, R. Gordon (1987): Redetermination of the Philippine Sea Plate motion (abstract), Eos Trans. AGU, 68, 1474, 1987.
- Tsai, Y.B., Z.S. Liaw and T.Q. Lee (1981): A statistical study of the Taiwan telemetered seismographic network data during 1973-1979. Bull. IES, Vol.1, 1-22.
- Tsai, C.C., C.H. Loh and Y.T. Yeh (1987): Analysis of earth-quake risk in Taiwan based on seismotectonic zones. Bull. IES, Vol.9, 413-446.
- Tsai, C.C., C.H. Loh and Y.T. Yeh (1987): Analysis of earth-quake risk in Taiwan based on seismotectonic zones. Memoir of the Geological Society of China. No.9, 413-446.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission (1986): Disposal of high-level radioactive wastes in geologic repositories, 10 CFR 60.
- U.S. Department of energy (1984): Nuclear Waste Policy Act of 1982/ General Guidelines for Recommendation of Sites for the Nuclear Waste Repositories: Final Siting Guide-lines, 10 CFR 960.
- Wang J.H., Y.B. Tsai and K.C. Chen (1983): Some aspects of seismicity

in Taiwan region. Bull. IES, Vol.3, 87-104.

Yeh, Y.T., K.L. Wen and Y.B. Tsai (1984): Seismic risk evaluation on the possible sites for Taiwan Power Company's base loading power plant, ASIIES-ER8417, pp.96.

Zen, E. and Hammarstrom, J.M. (1984) Magmatic epidote and its petrologic significance. *Geology* 12: 515-518.

## 誌 謝

本研究之順利完成，首要感謝核能研究所林賢一先生及曾水營先生協助野外調查、王大琛先生協助繪圖、賀超亞先生、李文成先生、黃萬芬小姐及鍾玉霞小姐等協助行政及印刷工作與邱紹華小姐、黃清香小姐及林汝倩小姐等協助文稿之繕打亦併此誌謝。

本研究執行期間感謝顧問何春蓀教授及田沛霖教授等之指導。亦感謝台灣電力公司核能廢料管理處錢處長北辰、陳副處長方顯、李課長清山等之支持與鼓勵，及李忠正先生、黃添煌先生、楊騰芳先生及林鴻旭先生提供寶貴意見。報告完稿蒙原振維博士、王鑫博士、謝敬義先生及羅崇魯先生提供之審查意見，使本研究成果更趨完美。

最後感謝原子能委員會核能研究所周所長仁章、王副所長唯科、陳副所長宜彬、化工組陳組長勝朗、何故組長英礎及洪副組長錦雄精神上鼓勵及政策上之支持，使得執行期間研究同仁順利達成任務。

## 附錄A

	頁次
照片 1 小蘭嶼北岸與西岸全景。	A - 2
照片 2 小蘭嶼東北側海岸。	A - 2
照片 3 小蘭嶼北側地形。	A - 3
照片 4 島之南側山谷地形。	A - 3
照片 5 火山口。	A - 4
照片 6 安山岩薄片；小蘭嶼西側No.18。	A - 4
照片 7 安山岩薄片；小蘭嶼西南側No.1。	A - 5
照片 8 安山岩與包裹體。	A - 5
照片 9 南向水系之山谷地形。	A - 6
照片 10 島之南側谷口沖積層。	A - 6
照片 11 小蘭嶼西北側呈暗紅色之安山岩露頭。	A - 7
照片 12 東側偏南之安山岩海岸。	A - 7
照片 13 島之西側集塊岩結構。	A - 8
照片 14 小蘭嶼西北角海岸邊之斷層。	A - 8
照片 15 黑雲母角閃石安山岩薄片；小蘭嶼西南側No.14。	A - 9
照片 16 島之南側泉水滲流情況。	A - 9
照片 17 島中央之火口湖。	A -10



照片1 小蘭嶼北岸（照片左邊）與西岸全景。



照片2 小蘭嶼東北側海岸，地形陡峭，此處所見為安山岩露頭。



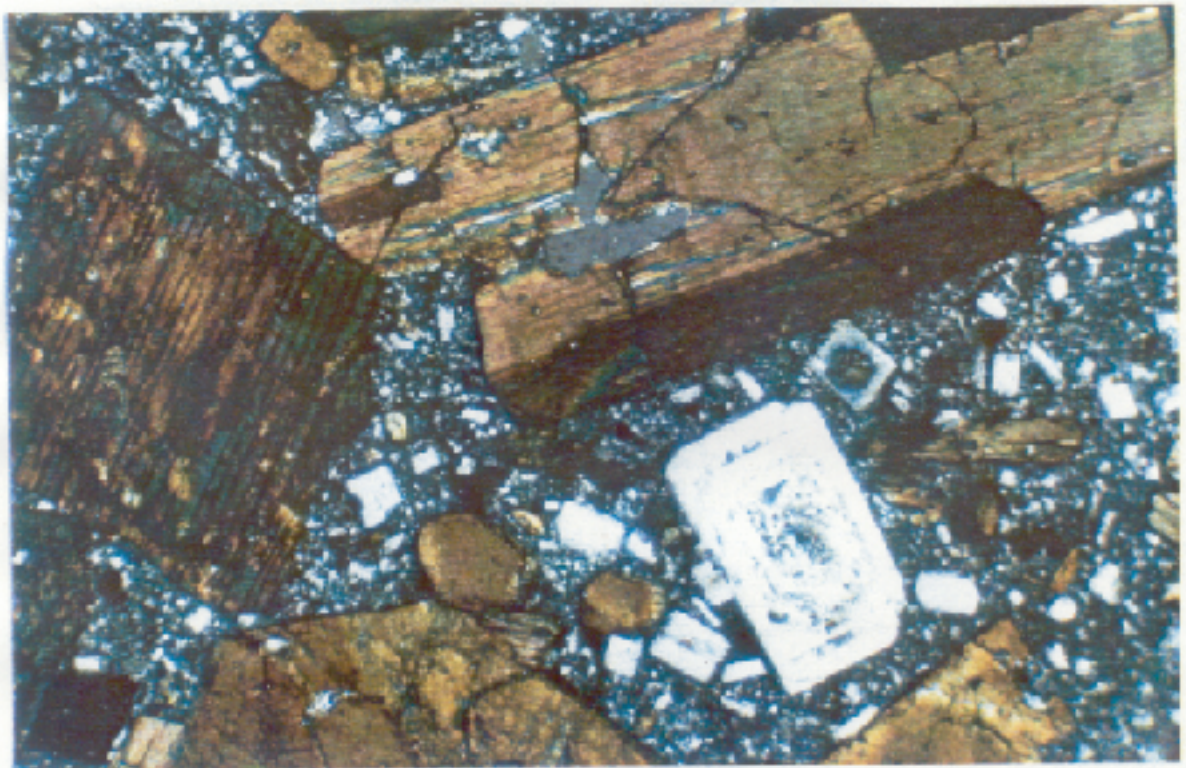
照片3 小蘭嶼北側（與蘭嶼貯存場相望）為一平緩的坡地。似可規劃為處置場



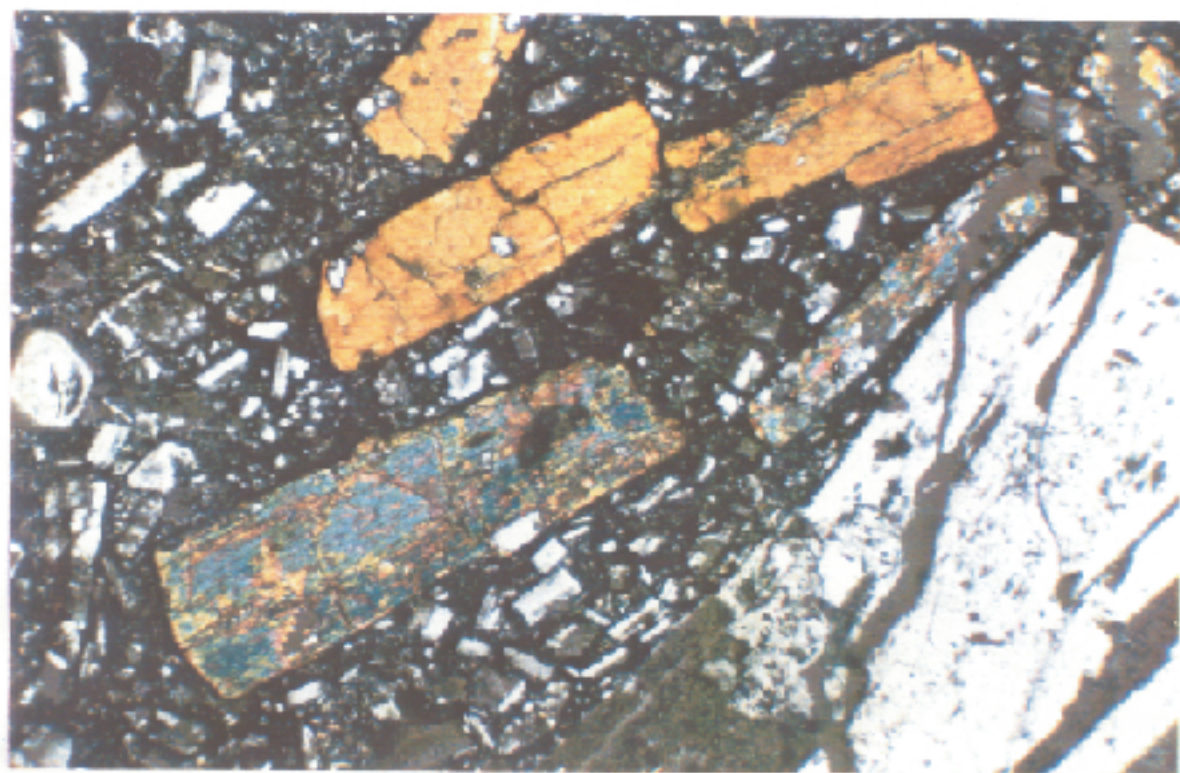
照片4 島之南側山谷地形。有地下水沿沉積層面流出。



照片5 火山口；小蘭嶼中央地帶兩個並列火山口呈橢圓形已無發生火山作用。



照片6 正交偏光下觀察之安山岩薄片（含輝石類、角閃石、斜長石及黑雲母等礦物）照片範圍 $2.6 \times 1.6\text{mm}$ ；岩石採樣點在小蘭嶼西側No.18。



照片7 正交偏光下觀察之安山岩薄片，照片範圍 $2.6 \times 1.6\text{mm}$ ；採樣點在小蘭嶼



照片8 安山岩之包裹體；沒有超基性捕獲岩的發現。



照片9 位於島之南側呈南向水系之山谷地形。



照片10 島之南側谷口沖積層；小蘭嶼南向水系出口處覆蓋著薄層沖積層及崩移岩錐堆積。



照片11 小蘭嶼西北側呈暗紅色之安山岩露頭。



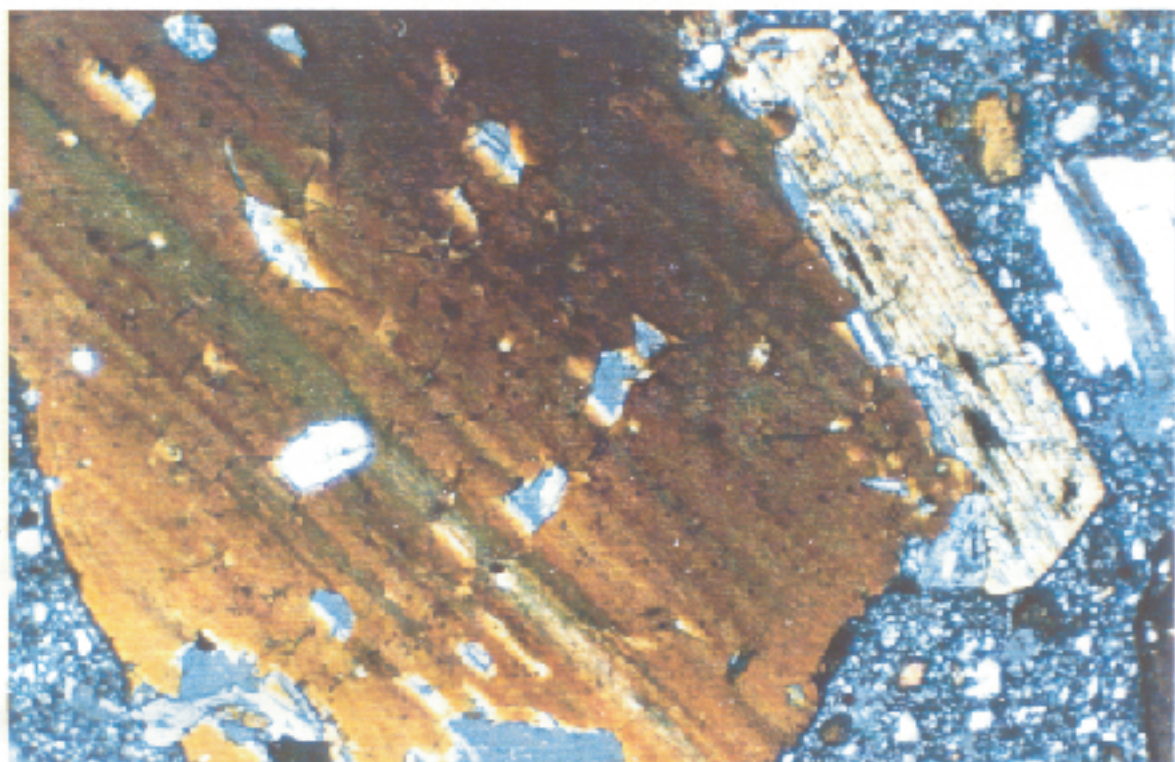
照片12 東側偏南之安山岩海岸。



照片13 島之西側動力筏登陸地點，露現為集塊岩，由玄武岩質，安山岩質等，火山碎屑及角礫膠結而成。



照片14 小蘭嶼西北角海岸邊的斷層現象。



照片15 正交偏光下觀察之黑雲母角閃石安山岩薄片，照片範圍 $2.6 \times 1.6\text{mm}$ ；採樣位置在小蘭嶼西南側No. 14。



照片16 島之南側泉水流情況。



照片17 島中央之火山口底部。積水處為炸彈坑。