

第二章 研究方法及原理

本論文的研究方法主要為 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年法，所有礦物均以和鉀長石一樣，利用傳統高溫爐加熱法分析(Conventional step-heating method)測定年齡，另外熱歷史的模擬則依據鉀長石多重擴散區間理論 (Lovera et al., 1989 ; 1991 ; 1993) 推演。

2.1 標本採集位置與特性

為系統性探討東久-米林斷裂帶活動歷史，本研究工作的採樣地點沿著剪切帶的北段、中段及南段三區域分布，共採集數十個樣品，選取其中具系統性之 10 個樣品，進行定年分析。這十個樣品的採集地點包括分布在東久-米林斷裂帶上的 8 個採樣點，詳細的採樣地點圖、岩石標本的種類及組成礦物，請參見圖 2-1 及表 2-1。

東久-米林斷裂帶上普遍分布著糜嶺岩化的片麻岩、角閃岩及片岩，本研究工作所使用之樣本均具明顯的剪切構造，也有些許偉晶岩及淡色花崗岩的小型岩脈入侵。詳細狀況描述如下：

2.1.1 剪切帶北段

本段從通麥到東久採集 T01 4 A B【N29.99, E94.87】及 T012【N29.94, E94.80】(圖 2-1)，T012 標本位置鄰近東久，是石榴子石-片麻岩，石榴子石為碎裂狀的變狀斑晶，其內含有包裹體藍晶石，岩石的葉裡方向為北 20°東，顯微鏡下發現有明顯的微褶皺構造 (Crenulation Cleavage)。T014 為最北邊的採樣點，這裡採集兩種不同岩性的標本，T014B 是角閃岩，在鏡下觀察主要是以三種不同顏色(黃綠、藍綠、草綠)的角閃石組成，應該是受剪切帶的活動變形而形成在不同時期的角閃石，而 T014A 也是含有石榴子石的片麻岩，薄片黑雲母有綠泥石化的

現象，有一部分蛻變為纖維狀的矽線石和相當明顯的鉀長石旋轉碎斑存在，這些現象顯示此區域複雜的地質構造演化。

2.1.2 剪切帶中段

此段採樣點包括 T009A【N29.63, E94.71】 T010【N29.65, E94.70】(圖 2-1)，T009A 和 T010 兩個糜嶺岩化的片麻岩樣品，為沿著東久往林芝路上的剖面所採集的，手標本上皆可見許多明顯大小不同的石榴子石。T009A 內含部分碎屑岩石應該是老的火成岩體變成變質岩殘留下來的，有一些組份因受擠壓形成橢圓或透鏡狀，被平行的雲母包圍，十分像眼睛的型態的眼球片麻狀構造 (Augen Gneiss Structure)。T010 位置為靠近雅魯藏布江的採樣點，這個樣本含有黑雲母、白雲母、鉀長石和楣石的糜嶺岩化片麻岩，透過薄片觀察礦物組成與 T009 的標本類似，但沒有石榴子石與矽線石，所受到的變形程度沒有那樣強烈，似乎糜嶺岩化作用在此區域較弱。

2.1.3 剪切帶南段

T017 B1、B2【N29.32, E94.35】 T018A【N29.19, E94.20】及 T019【N29.19, E94.19】(圖 2-1) 等樣品之採集點分布在剪切帶南端的米林附近，T017B1 及 T017B2 皆為變質玄武岩中的雲母片岩，黑雲母多沿著葉理面生長，長石和石英集合體組成的細晶岩脈也與葉理面方向相同，可能為受到同一期動力變質作用產生，形成同一葉理面方向。另外 T018A 及 T019 是為糜嶺岩化的片岩，糜嶺岩化作用強烈，T018A 的礦物組成有黑雲母、鉀長石、石榴子石及藍晶石，石榴子石礦物顆粒內存有許多裂隙，鉀長石非常大顆容易挑選所以可供定年用。白色雲母類礦物在 S1 上，葉理方向為 N27°E。T019 因為有多顆明顯的石榴子石與黑雲母及長石的出現，在研究工作中作為一個地質溫度計，用來測量估計東久-米林剪切帶糜嶺岩化作用發生時的變質環境。

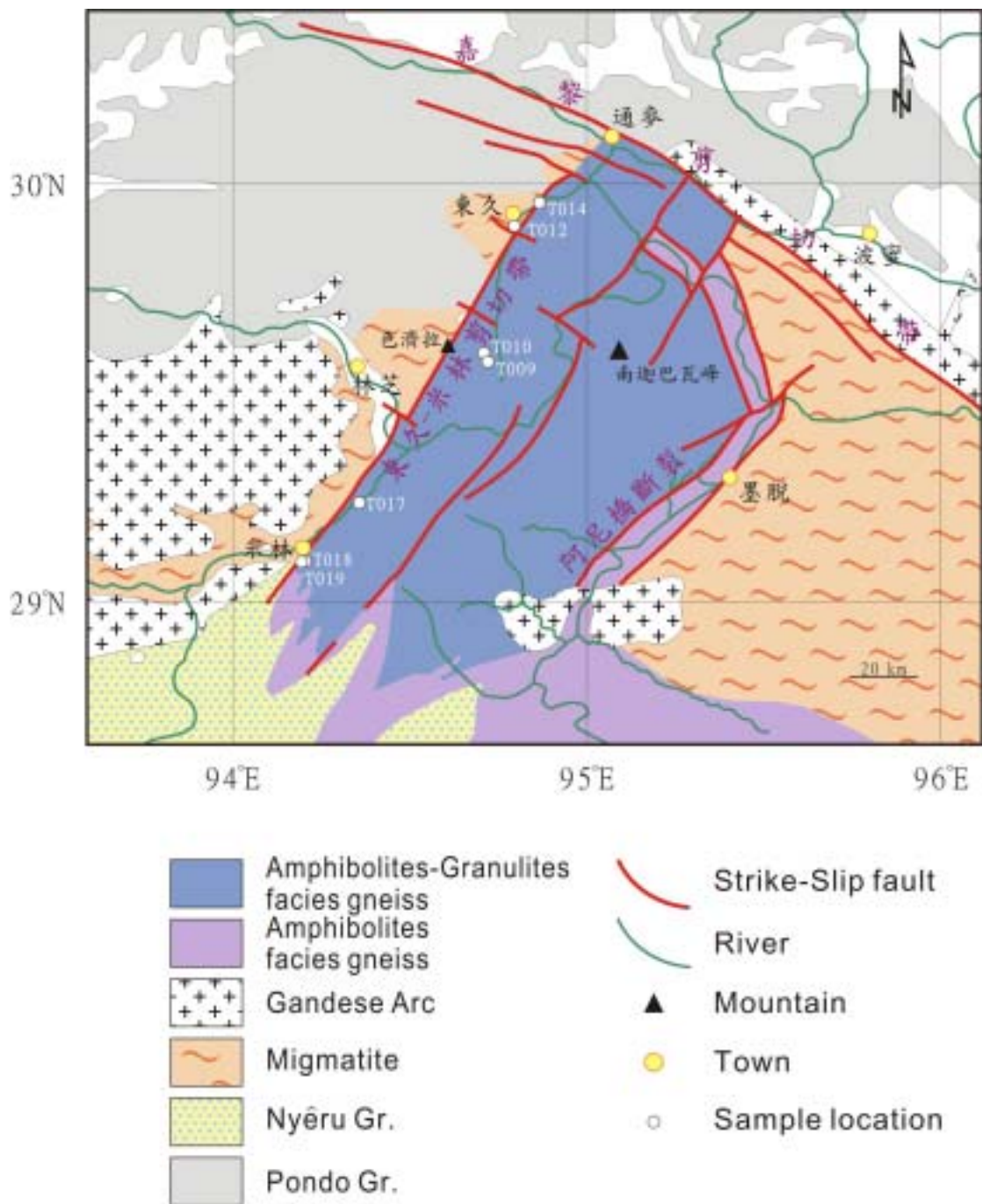


圖 2-1. 東久-米林剪切帶採樣點之地質簡圖

(修改自張進江, 2003)

表 2-1. 東久-米林剪切帶標本採集位置、岩性及礦物組成

Specimen		Location	Rock type	Minerals in thin section
T012		N29.94 E94.80	Gneiss	Biotite, Garnet, Sillimanite, Muscovite, Plagioclase, K-feldspar, Kyanite
T014	A	N29.99 E94.87	Gt.-Bt. Gneiss	Biotite, Sillimanite, Kyanite, K-feldspar, Garnet
	B		Amphibolite	Biotite, Hornblende, Plagioclase
T009	A	N29.63 E94.71	Gneiss	Biotite, Muscovite, K-feldspar, Garnet, Sillimanite, Illimanite
T010		N29.65 E94.70	Gneiss	Biotite, Muscovite, K-feldspar, Sphene
T017	B1	N29.32 E94.35	Bt. schist	Biotite, Hornblende, K-feldspar, Epidote
	B2		Bt. schist	Biotite, Hornblende, Kyanite
T018	A	N29.19 E94.20	Mica Schist	Biotite, Plagioclase, K-feldspar, Kyanite, Garnet, Calcite
T019		N29.19 E94.19	Mica Schist	Biotite, Muscovite, K-feldspar, Kyanite, Garnet, Sphene

礦物縮寫：Bt.: Biotite, Gt.: Garnet

2.2 標本前處理

(1) 薄片觀察：

要進行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年的標本必須是新鮮、未受風化作用影響的岩樣，因此在決定定年樣本前，須先在顯微鏡下觀察薄片，主要的觀察要點包括：岩石中可供定年礦物的種類、粒徑、礦物中有無其他包體 (INCLUSION) 以及是否有不同期生成的情況，一般而言礦物顆粒大於 0.250 mm，挑選礦物時會較容易，否則難挑出足量的礦物，礦物中最好無其他包體或雜質存在，才不致對定年結果產生影響。另外，同一礦物若有不同期生成的顆粒，在進行定年時有可能得到一無意義的混合年代，也是需要考慮的。薄片觀察完成後，才能決定採用哪些樣本。

(2) 擊碎過篩：

首先將岩石切成塊狀，取適量岩塊以研鉢敲碎後並過篩，取 40 - 60 mesh 粒徑的顆粒即可。若粒徑過大礦物不易分離，太小則在進入原子爐照射後，容易產生輻射塵污染。

(3) 震盪洗淨：

將篩選出的礦物顆粒加入去離子水及丙酮，放入超音波震盪器內清洗，重複數次，一方面將附著的雜質及粉塵去除，一方面也可將不同的礦物顆粒震盪分離。之後置入烤箱烘烤，讓標本顆粒烘乾。

(4) 礦物挑選：

將洗淨乾燥後的標本顆粒，置立體顯微鏡下，挑取出欲定年的礦物，本研究的雲母類礦物均取 60 - 40mesh 粒徑，一方面是配合礦物的自然粒徑，另一方面也是因在此粒徑下，礦物顆粒分離較完全；鉀長石多採 40 mesh 粒度；角閃石 60 和 40 mesh 都有。在量方面，因採用階段加溫分析所需樣本量較多，一般在 300 mg 以上，鉀長石因加熱階數較多需在 350 mg 以上。

(5)中子照射：

將挑選完成的礦物，秤重包於鋁箔袋內，與 GA 1550 黑雲母國際標準礦物一同裝入內徑 0.8cm、長約 2.5cm 的石英玻璃管中，採用 4 個標樣監測中子通量，4 個標準樣品等間距分布於石英管中。標準礦物 (Standard mineral) GA1550 黑雲母的年齡取 $97.8 \pm 0.5 \text{ Ma}$ (Baksi et al., 1996)。石英管抽真空後密封，外部由 0.05mm 厚的銅皮包裹，以便屏蔽熱中子。送至北京中國原子能研究院原子爐照射 (Open Pool Reactor)，本研究的照射位置為 49-2 反應堆 H8 孔道，照射時間為 28.5 小時。照射後的樣本放置 2 個月，待其放射性強度減弱到安全範圍後，即可進行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年分析。

2.3 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年法基本原理

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年法衍生自 K-Ar 同位素定年法。在自然界中 ^{40}K 為一不穩定同位素，會隨著時間衰變為穩定之 $^{40}\text{Ar}^*$ ，如果這些衰變反應而來的 $^{40}\text{Ar}^*$ 能被封存於礦物內，則礦物中的 $^{40}\text{Ar}^*$ 同位素含量就會隨著時間而增加，其蛻變方程式為：

$$^{40}\text{Ar}^* = \frac{\lambda_e}{\lambda} ^{40}\text{K} (e^{\lambda t} - 1) \dots\dots\dots(1)$$

式 (1) 中， λ_e 及 λ 為 ^{40}K 之衰變常數 ($\lambda = 5.543 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$, $\lambda_e = 0.581 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$)， ^{40}K 及 $^{40}\text{Ar}^*$ 分別為礦物內衰變源 ^{40}K 及衰變產物 $^{40}\text{Ar}^*$ 的含量， ^{40}K 及 $^{40}\text{Ar}^*$ 可由實驗室量測得到， t 為樣品的年齡，代入 (1) 式即可推算樣品年齡。

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年法則利用原子爐內之快中子 (Fast neutron) 先將樣本中之穩定同位素 ^{39}K ，依 $^{39}\text{K} (n,p) ^{39}\text{Ar}$ 反應激發成不穩定態同位素 ^{39}Ar ，再將中子照射後之樣本置於氣態質譜儀內，一次同時完成分析樣本內之 ^{40}Ar 、 ^{39}Ar 、 ^{38}Ar 、 ^{37}Ar 、 ^{36}Ar 等氬同位素的含量，再由實驗室測得之 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 比值推算出 (1) 式中 $^{40}\text{Ar}^*/^{40}\text{K}$ 比值。

然而在中子照射的過程中， ^{39}Ar 與 ^{39}K 含量關係並非定值，常隨原子反應爐

內之中子流量而改變，因此在實際操作中，係利用已知年齡之礦物（即標準礦物（Standard mineral）），與欲測定年代之樣本一起放入原子爐中接受照射，以求得與快中子流有關的常數（J 值）。

由中子照射所得到 ^{39}Ar 含量與礦物岩石內之 ^{39}K 含量、照射時間(Δ)、中子通量(Neutron flux, $Q(E)$)及截面積中子捕捉量(Neutron capture cross section, $\sigma(E)$) 有一定的關係，其關係可由下式表示：

$$^{39}\text{Ar}_k = ^{39}\text{K} \Delta \int Q(E)\sigma(E)dE \dots\dots\dots(2)$$

將（1）式除以（2）式，可得

$$\frac{^{40}\text{Ar}^*}{^{39}\text{Ar}_k} = \frac{\lambda_e \times ^{40}\text{K} \times (e^{\lambda t} - 1)}{\lambda \times ^{39}\text{K} \times \Delta \int Q(E)\sigma(E)dE} \dots\dots\dots(3)$$

對每次中子照射結果而言，如果總中子流量固定，則在(3)式中之

$$\frac{\lambda_e \times ^{40}\text{K}}{\lambda \times ^{39}\text{K} \times \Delta \int Q(E)\sigma(E)dE}$$

應為一常數，此常數定義為 J 值（J-value），

將 J 值代入（3）式，即可簡化為

$$\frac{^{40}\text{Ar}^*}{^{39}\text{Ar}_k} = \frac{e^{\lambda t} - 1}{J} \dots\dots\dots(4)$$

對同一次中子照射而言，J 值可由伴隨照射之已知年代的標準礦物依（4）式求得，因此欲測樣本之年齡可表示為：

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[1 + J \left(\frac{^{40}\text{Ar}^*}{^{39}\text{Ar}_k} \right) \right] \dots\dots\dots(5)$$

式（5）中，t 為年齡， $(^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k)$ 為欲測年齡岩石樣本之 $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k$ 值。

在 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年法中，由於部份氬同位素是於中子照射過程中由 Ca、Cl、K 之核反應所生成，所以產生所謂的干擾效應（Interference），影響到年代的準確度。而由這些來源所形成的氬氣量同樣與中子通量及截面積有關，所以我們可以利用與式(2)相同原理來推導這些干擾效應，而利用一些含氯、鈣、鉀等元素的鹽類如 CaSO_4 、 K_2SO_4 及 KCl 等，經中子照射來測量其所產生的干擾

效應，而予以適當的校正。

完成氬氣分析後，經過干擾校正、背景及照射時間校正就可以利用(5)式算出樣品年齡，在 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年法中，我們常以下列幾種方式，分析和表示樣品年齡及其可信度：

1. 坦原年代 (Plateau date): 其定義為：利用各相鄰溫度階 (Step) 之年代，其年代相互誤差不超過兩個標準差 (Standard deviation) 所連接而在圖上顯示出一”平坦階”，其所涵蓋的範圍超過 ^{39}Ar 總累積量的百分之五十以上，且須由大於或等於三個溫度階所組成，再以此平坦階內的 $^{40}\text{Ar}^*$ 總量及 ^{39}Ar 總量計算而得的年代。而此年代的算法可以避免標本內氬氣分佈不均所造成的超氬氣成分或氬氣減損的現象，相對於總和年代較為準確，但是對於標本內部氬氣的放氣來源卻無法瞭解，若標本當時形成時所包裹的氬氣與現今大氣成分並不相同，那麼所計算出來的年代必定與真實的年代產生某程度的誤差。所以我們可借助反等時線圖 (Inverse isochron or Corrchron diagram) 來進一步討論氬氣的放氣過程。

2. 總和年代 (Integrated date): 這是以各階段加溫所得到放射源氬氣 ($^{40}\text{Ar}^*$) 的總量及經中子照射而產生 ^{39}Ar 總量來計算年代，理論上如果沒有回彈效應 (Recoil effect) 的話，其得到的年代結果應與 K/Ar 定年法所得到的年代相同。

3. 反等時線年代 (Inverse isochron or Corrchron date): 把分析所得到的資料點放入以 $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 為縱座標， $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 為橫座標的圖中，若其資料點成線性 (Linear array)，則將其各點做線性回歸而得一線性關係式：

$$\frac{^{36}\text{Ar}}{^{40}\text{Ar}} = a + b \times \frac{^{39}\text{Ar}}{^{40}\text{Ar}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

我們以縱軸截距 a 的倒數 $\frac{1}{a} = \left(\frac{^{40}\text{Ar}}{^{36}\text{Ar}} \right)_0$ 代表標本內所包裹非放射來源的同位素比值，此比值並可用來驗證與正常大氣成分是否相同，藉此來確認總和年代及坦原年代的準確度及標本內所包裹的氬氣為大氣成分的假設是否正確。並且將橫軸 ($^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$) 截距的值代入方程式(1)中，則可得到由縱軸氬氣初始值校正後

的年代，由此可以較容易判別氬氣的來源及成分，而探討非放射性源氬氣所造成的影響，也因此較能準確地估計標本的年代。另外，其回歸點的採用標準，可以用一重要的參數（Mean squares of weighted deviates, MSWD）為標準，代表所採用的資料點呈線性的程度，MSWD 的值越小，則代表資料點呈線性的程度越好，且當 MSWD 的值大於 2.5 時，利用此反等時線所得到的年代不予考慮，亦即 MSWD 的值須在個位數範圍之內。但在實際資料點的落點位置常不成一線性，所以通常在資料點的選擇上常與坦原年代譜中所選的資料點相同，而對於那些誤差很大的資料點不予考慮。

2.4 鉀長石多重擴散區間理論及其在 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 熱定年學上的應用

對氬同位素而言，各種適用於 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年的礦物，其封存溫度分布範圍很廣，而且廣泛地出現在不同的岩石內，因此可以有效運用在各種地質事件中。基本上， $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年中所使用的進階式加熱法（incremental step heating），是為了解析氬同位素系統在礦物內部的擴散方式所設計，鉀長石可以直接提供各個獨立鉀長石的氬同位素系統的擴散特性，並利用體積擴散理論和阿瑞尼士圖（Arrhenius plot），求得各項參數，進而求得封存溫度。

自 1973 年 Dodson 提出封存溫度（Closure temperature）的概念後，我們了解到同位素絕對定年工作所得到的年代，大致就代表這種同位素系統封閉至今的時間，這觀念使 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年法進入了熱定年學（Thermochronology）時代。以同一岩體中不同礦物的定年結果，配合各種礦物之封存溫度，得到數個溫度和年代的對應點，進而推估岩體所經歷的熱歷史。

但長久以來，Dodson 用來計算封存溫度所使用的的單一擴散區間模式（Single diffusion domain），卻始終無法合理解釋鉀長石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年結果，主要的歧異點有二：其一是鉀長石的年代譜常出現不規則的年代變化，基本上是一個年代由低溫至高溫年代漸增的型態。雖然出現在緩慢冷卻岩體中的低溫型鉀

長石(如 microcline), 也可能依據體積擴散區間模式的理論表現出年代漸增的年代譜型態, 但是在許多的情形下不論以礦物的平均粒徑、常態分布粒徑或混合不同粒徑的樣本作為擴散區間, 仍常無法解釋實驗所得的年代譜型態。事實上, Harrison (1983) 就提出鉀長石多變的年代譜型態, 是難以用礦物顆粒大小作為擴散區間來討論其年代譜的變異。其二是在描述擴散行為的阿瑞尼士圖 (Arrhenius plot) 上。鉀長石的樣本資料點常出現非單一直線的關係, 但若具有單一擴散區間的樣本, 根據阿瑞尼士方程式 (Arrhenius equation) 的描述進行氬同位素擴散時, 在阿瑞尼士圖上必定存在單一的線性關係, 而多數觀察到的情形卻是在中高溫的加熱階段中, 原有的線性關係出現轉折的現象。

為了解氬同位素在鉀長石中的擴散行為, Lovera 等人自 1989 年開始開始一連串的研究, 嘗試對此現象提出合理的解釋模式, 最後發展出多重擴散區間的理論 (Multiple diffusion domain theory) (圖 2-3), 一方面用以解釋在鉀長石實驗中觀察到的種種現象, 另一方面則據此建立一套模擬程序, 試著找出鉀長石多重擴散區間的各项擴散參數, 並經由與年代譜之間相互獨立卻又相關的部分進行比對, 以推估礦物所經歷的熱歷史。

多重擴散區間的理論基礎在於認定礦物內部的擴散區間不只一個, 在此架構下, 鉀長石樣本在 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年分析中所表現的各種特殊現象, 都可獲得良好解釋。基本上, 固態物質內部的擴散過程是受熱活化的, 以簡單的阿瑞尼士方程式來描述:

$$D = D_0 \exp (-E / RT) \dots\dots\dots (8)$$

其中 D 為擴散係數 (Diffusion coefficient); D_0 為頻率係數 (Frequency factor);

E 為活化能 (Activation energy); R 是氣體常數 (Gas constant);

T 為絕對溫度 (Absolute temperature)。

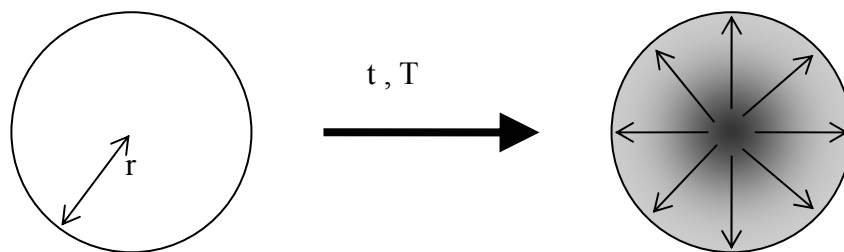
(8) 式除以擴散半徑 r 的平方後, 將等式兩邊同取對數可得:

$$\ln\left(\frac{D}{r^2}\right) = -\frac{E}{RT} + \ln\left(\frac{D_0}{r^2}\right) \dots\dots\dots (9)$$

(9) 式以 $\ln(D/r^2)$ 為縱軸， $1/T$ 為橫軸做圖，即是阿瑞尼士圖。

在礦物並未發生結構變化的前提之下，實驗室的氬同位素分析可視為一種擴散實驗，每一個加溫階段所釋出的氣體量視不同的擴散幾何型態 (Diffusion geometry), 而與擴散係數(D) 時間(t)和擴散區間的大小有一定的關係(Crank, 1975)。

Single Diffusion Domain



Multiple Diffusion Domain

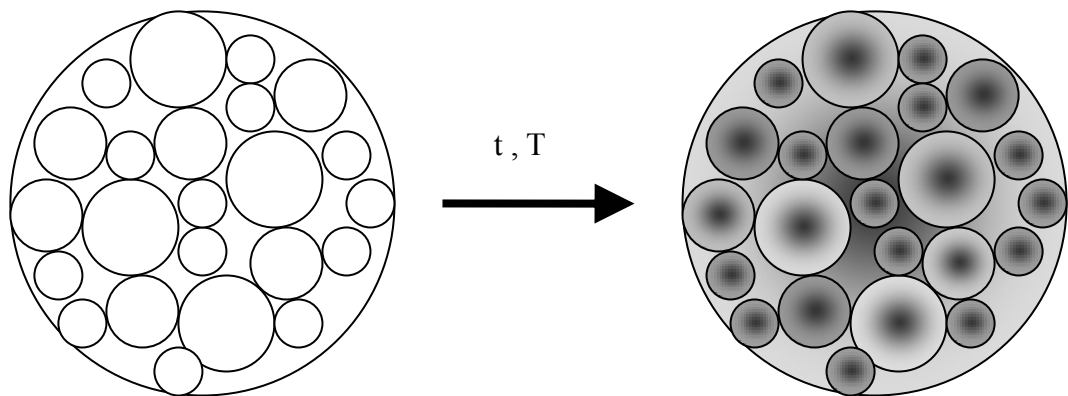


圖 2-3. 多重擴散區間理論之示意圖，圖中顯示鉀長石內可能存在著大小不同、所佔比例不同的擴散區間。(摘自王珮玲, 1998)

為了確定所謂的多重擴散區間，是否只是樣本處理過程中敲擊的步驟造成的粒徑變化，或是真實存在於礦物內部的不同擴散區間，Lovera et al. (1991) 以同樣的加熱程序分析一個單顆粒的鉀長石樣本，結果發現即使是單顆粒礦物也會表現出多重擴散區間特性，與敲碎後再一起加熱的樣本並無不同。這表示鉀長石所具有的多重擴散區間特性是本質上的 (Intrinsic property)，而不會受到敲碎礦物時所選擇的粒徑不同有所改變。

基於鉀長石中多重擴散區間存在的強烈可能性，Lovera et al. (1991) 發展出一套模擬岩體熱歷史的程序，即提出實際能影響冷卻曲線的是年代譜的型態，鉀長石的年代譜型態是實驗室加溫與自然界冷卻歷史的綜合結果。由於 ^{39}Ar 是由 ^{39}K 經過中子照射而來， ^{39}K 原本均勻的分布在鉀長石中，而實驗室的加熱是唯一使其擴散出的人為熱事件，所以可由 ^{39}Ar 的釋出求得鉀長石的擴散參數，而礦物在自然界經歷的熱歷史造成 ^{40}Ar 在鉀長石中的擴散分布，再經由實驗室的加熱釋放出來，所得 ^{40}Ar 、 ^{39}Ar 比值的變化，即形成了年代譜的型態。而多重擴散區間最後的模擬就是選擇適合的冷卻曲線，以符合實驗所得的年代譜型態，也就是說擴散參數的取得與冷卻歷史的模擬分別控制在兩個獨立的過程，冷卻歷史的決定受控於年代譜的型態，而年代譜的型態則是礦物經歷自然界熱變動的產物，因此多重擴散區間模擬所得的冷卻曲線在表現礦物所經歷的熱歷史時，有相當好的準確度與可信度 (Richter et al., 1991)。

2.5 鉀長石多重擴散區間理論的分析方法

本研究鉀長石氬同位素比值的測定是利用高溫爐階段加熱法分析，主要的儀器為北京中國科學院地質與地球物理研究所氬氬同位素定年設備，主要配置包括鉬高溫爐 (Molybdenum furnace)、氬氣純化系統與 MM5400 質譜儀。操作過程係將中子照射後的鉀長石裝進鉬包裝中，置入高溫爐中以約 $50^\circ\text{C}/30\text{ min.}$ 之階段加熱，起始溫度一般訂在 450°C ，最高溫為 1400°C ，加熱後釋出的氣體利用 2

個鋯鋁泵 (Zr-Al Alloy Getters) 純化，其中一個工作溫度為室溫，目的在於去除 H_2 ；另一個工作溫度為 350 ，去除 N_2 、 O_2 、 CO_2 等。純化後的氣體導入質譜儀量測 Ar 同位素比值，採用 Farady 接收器測定。所得數據經過儀器質量歧視校正、放射性衰變校正和 Ca、K 同位素反應校正後，利用實驗室軟體計算年代、 Cl/K 、 Ca/K 比值。Ca、K 同位素反應校正參數為： $(^{36}Ar/^{37}Ar)_{Ca}=2.609\times 10^{-4}\pm 1.148\times 10^{-5}$ ， $(^{39}Ar/^{37}Ar)_{Ca}=7.236\times 10^{-4}\pm 2.814\times 10^{-5}$ ， $(^{40}Ar/^{39}Ar)_{Ca}=2.648\times 10^{-2}\pm 2.254\times 10^{-5}$ 。由於本系統之背景信號小於樣品信號 (^{40}Ar) 的千分之一，且其 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 比值近似於大氣比值，因此測定數據沒有進行背景校正。

至於鉀長石多重擴散區間理論的原理及分析流程可以用圖 2-4 來表示，以下將各步驟的實際操作方法做一簡單敘述：

一. 設計適當的加熱程序：一般所採用的加熱程序包括數個階段加溫、降溫或等溫持續長時間重複加熱過程，總階數越多越好，其目的在於使鉀長石能在熔融前將大部分的氬氣釋放出來，同時能清楚的描述阿瑞尼士圖、 $\log(r/r_0)$ 圖及年代譜的變化形態。詳細的溫階與加溫時間如附錄 A 至附錄 D 所載。

二. 由阿瑞尼士圖求出最小擴散區間的擴散參數：經由上述的加熱程序可得到每一加熱階段的 ^{39}Ar 放氣比例，即可作出鉀長石樣本之阿瑞尼士圖，將圖中由低溫開始的第一條線性關係視為由最小的擴散區間放氣所形成，線性回歸後可求得最小擴散區間的各项擴散參數 (E 值、 $\log(D_0/r_0^2)$)。理論上用於回歸的資料點是必須在統計上具有線性意義的，其線性回歸原則簡單來說就是先取最低溫的三個點做回歸，然後逐一增加回歸的點數，當回歸線的斜率突然增加時，表示有其他大小的擴散區間加入放氣行為，因此必須選擇上一次的回歸結果作為最小擴散區間的擴散參數。

三. 由 $\log(r/r_0)$ 做圖，求得可能的擴散區間之相對關係：將每一放氣步驟的 $\log(D/r^2)$ 值除以前一步驟所求得的 $\log(D_0/r_0^2)$ ，即可得到 $\log(r/r_0)$ ，將其值為縱軸； ^{39}Ar 累積量為橫軸作圖，即是 $\log(r/r_0)$ 圖。圖中接近坦原的部分可

視為由特定的一個擴散區間放氣而來，依此原則推測可能存在的擴散區間數目、其相對大小與所各區間佔的比例。

四. 由推測的各擴散區間的相對關係，計算出這組參數造成的阿瑞尼士圖和 $\log(r/r_0)$ 圖，若不符合實驗所得到的結果，調整各擴散區間的相對關係，一直到可以配合實驗所得數值為止，此時的參數就代表鉀長石內部所具有的多重擴散區間特性。

五. 根據前兩步驟所得的擴散參數，配合適當的冷卻曲線模擬年代譜：由年代譜的型態假設一條冷卻曲線，配合之前求得的各個擴散區間的擴散參數，以推知樣本經歷假設的冷卻歷史後， ^{40}Ar 的產生及分布情形，進一步求得鉀長石樣本經過中子照射，在實驗室加溫時所應釋出的 ^{40}Ar 、 ^{39}Ar 的比例，即可計算出一個基於多重擴散區間理論的模擬年代譜，將模擬年代譜與實驗室所得的年代譜做比對，若不符合，調整假設的冷卻曲線，一直到兩個年代譜的型態一致為止，此時的冷卻曲線即可認定為鉀長石樣本所經歷的冷卻歷史。

由上述的五個步驟除了加熱程序需要使用者自行設計外，其餘都有電腦程式進行模擬，步驟一至四可使用 Autoarr 程式 (Lovera, 1996)，程式會自動決定最適合的多重擴散區間參數。至於步驟五雖有自動程式 (Autoage, Lovera, 1996)，但因此程式仍在試用階段，且其程式運算相當耗力費時，一般個人電腦難以負荷，因此本論文仍使用 Agesme 程式 (Lovera, 1992)，此程式必須由使用者自行嘗試設定冷卻曲線，並自行比對模擬年代譜與實際年代譜是否一致，因此在某種程度上似乎有人為主觀因素存在，但由 Richter 等人 (1991) 的研究可知，冷卻曲線的細微變化就會造成完全不同型態的模擬年代譜，因此即使有人為主觀因素存在，影響也是非常有限的。

Multi-Domain Diffusion Theory

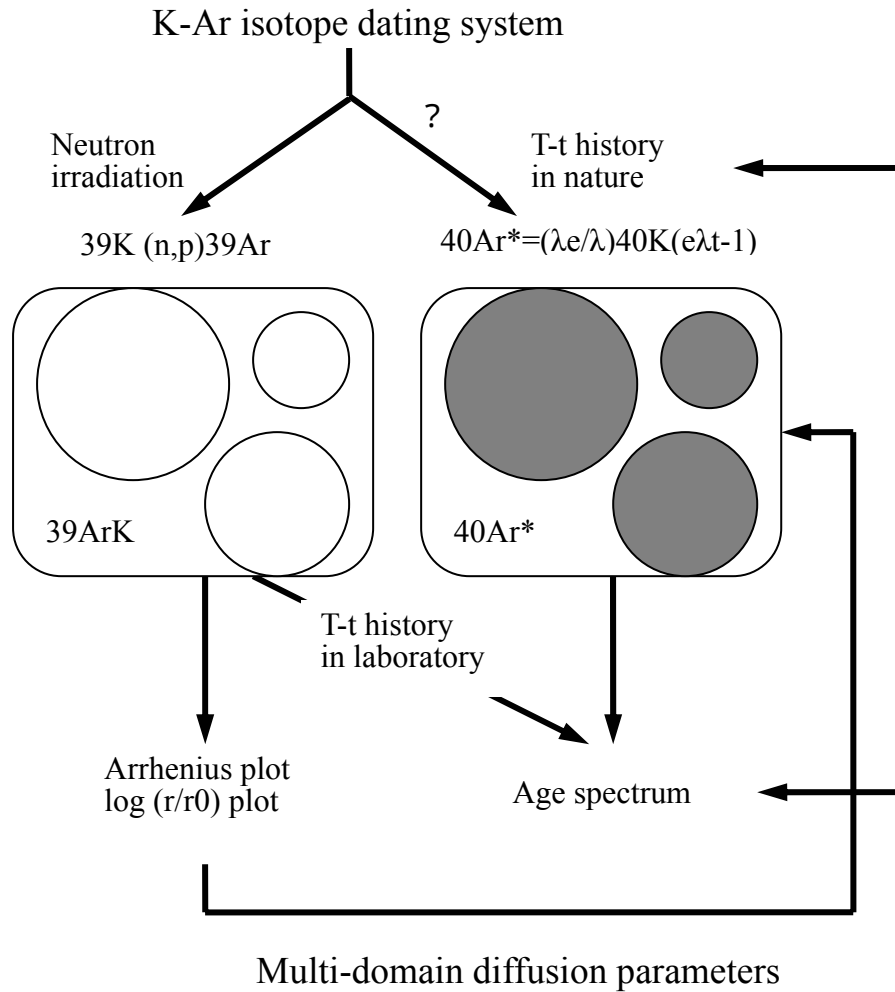


圖 2-4. 鉀長石多重擴散區間理論模擬的原理與分析流程

(摘自王珮玲, 1998)

2.6 礦物化學成分分析

本研究的礦物化學成分分析，係借用經濟部中央地質調查所 APL SEMQ 型電子微探儀分析，分析時之加速電壓為 15 keV，標本表面電流為 15 nA。電子束之大小為 2 微米。分析 T019 岩石樣品內的礦物包括黑雲母、白雲母及石榴子石，其中黑雲母和鉀長石單礦物是利用測出的 Fe、Mg 比值做為計算封存溫度的依據，石榴子石-黑雲母礦物的化學成分則用來作為石榴子石-黑雲母鐵鎂交換地質溫度計，詳細的分析結果與討論請參閱第四章節內容。

中央地調所的電子微探分析儀組成為掃描式電子顯微鏡儀器有電子控制、真空系統、鏡體構造及訊號接收器。首先，將要探測的標本置於儀器內，等待儀器抽氣為真空狀況，即可開始量測。我們挑選一顆石榴子石及石榴子石旁的黑雲母及白雲母作化學分析，得到的結果運用變質泥岩中的礦物相化學成分理論，來算出地質溫度。