

萬有文庫

第二集七百種

王雲五主編

地球化學

(四)

弗那斯基著

譚勤餘任夢雲譯

商務印書館發行

211988

國立政治大學圖書館典藏

中華民國教育部
圖書館

登記號

31740

類別號

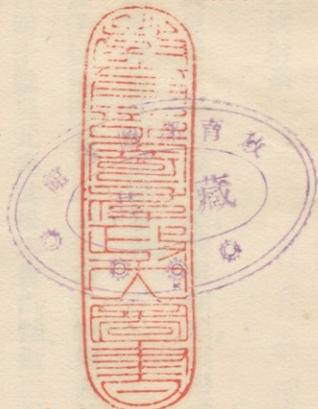
662
1.4

地 球 化 學

(四)

弗 那 斯 基 著

譚 勤 餘 任 夢 雲 譯



自 然 科 學 小 叢 書

育英藏
之
書

211988

第七章 地殼中之放射性元素

教育部圖書室藏書

五十八 鐳 釷 錒之放射系

教育部圖書館藏書

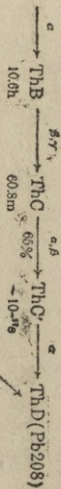
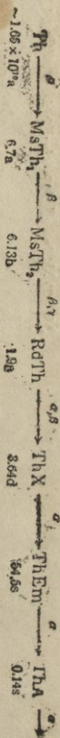
呈繳之圖書

化學元素之有強放射性者，其原子常起蛻變現象，放出能線，以形成新原子、新元素。此種元素蛻變之作用，與自然界其他任何能無關係。

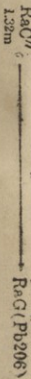
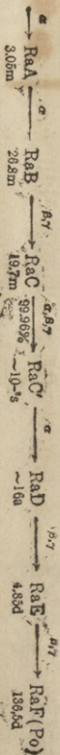
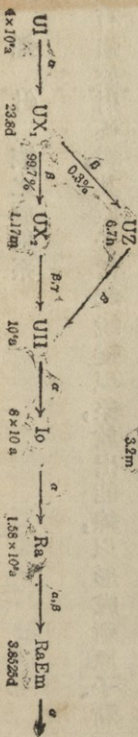
研究放射能作用，則放射性原子蛻變時，其生成新元素之蛻變系統，可以明瞭。現在已知者，有三種系統，包含四十餘種元素。其根本皆由鈾、釷二元素而來。此兩元素之蛻變系統如第十八表所示：

第十八表

(1)



(2)



(註) $a = \text{年}$; $d = \text{日}$; $h = \text{時}$; $m = \text{分}$; $s = \text{秒}$ 。 α, β, γ 表示

放射線之種類。其未記入者爲半蛻變時間。

上述放射系，尙未達完成之域，觀察不確實及空隙尙多。此表常由新觀察而加以改良，將來恐更有根本變化，亦未可知。例如將來是否能證明釷之成因，與鈾之同位素 (isotope) 有關係，不敢斷言。此種現象，今日雖不過僅爲一種思想，然吾人對於此現象所有之知識，不過僅得其大綱，不可不注意。故上表所列者，不能認爲最後一定不異之物也。

放射現象，一方面生成種種新化學元素之原子，同時發生有密切關係之放射線。放射線有三種： α 射線爲二重帶正電之氦原子 (helium atom)； β 射線爲電子 (electron)； γ 射線爲波長極小之光線，或謂其與能量子 (energiequant; energy quantum) 相當。

此方面之重要見解，對於說明鈾及釷之蛻變現象，大有進步者，爲英國之索狄 (F. Soddy) 羅素 (A. G. Russell) 及德國之法揚 (K. Faján) 等所發見，即放射一個 α 微粒子——一個帶正電之氦原子即二陽價氦離子——或放射一個 β 微粒子——一個陰電子——即可生成新原子。

前者生成之新原子，就週期表觀之，與該放射性元素同列，且在左方退後二位之新元素相當，此新元素與原來存在於該位置之元素無異，可視其爲此元素之同位素。後者則反是，其所生新元素之化學性質，與母元素前一位之新元素相當。

由此重要之變化定律，足以洞悉放射能之蛻變現象。即由母元素之原子核，放出二陽價之氦原子，及放出一陰價之電子，即起蛻變。

放射 γ 射線時，不生新元素。而放射電子時，幾常有 γ 射線隨之發生。據科發里克(A. Kovalevsk)最近研究， γ 射線與每個元素量子(elementar quantum)之放射相當云。

γ 射線實爲今日已知波長最短之「光波」。放射性物質之最短——即最硬——放射線之波長，僅爲 10^{-11} 釐米。其最短者，爲鐳C與鐳C' ($\text{RaC} + \text{RaC}'$) (Thiébaud 定爲 6.94×10^{-11} cm.) 及新釷第11 MsTh_2 (Jovanovic 定爲 1.55×10^{-11} cm.)。如此短之波長，除放射能之蛻變作用而外，不能得而實驗之。惟有宇宙根源之所謂「透過線」，其波長更短(10^{-12} cm.)，亦未可知也。

放射 γ 射線時，原子核不發生蛻變現象，依普通方法，是否可使其生成，實不可知。

第十八表所示之 γ 射線與最短之 X 射線其性狀大異

除上述種類而外，尚有與 α 射線同時放出之別種 β 射線及 γ 射線。此種 γ 射線比普通之 γ 射線稍「軟」；又 β 射線之速度亦比較小，可得而區別之（與光線速度大不同）。此等放射線之由來，自哈因（O. Hahn）之研究始，尤以邁特涅（L. Meitner）等近年之研究，漸至明瞭。

即上述電子及能之放出，與該原子核蛻變時之副現象相當，由其蛻變，不過在其影響範圍所惹起之變化而已。

即此二種放射線，雖隨原子蛻變而發生，然對於新元素之生成，無直接關係。

試觀鈾之蛻變系，自鈾 I（UI）至釷（Io, ionium）之間，有空隙存在。又鈾 Z（UZ）應屬於何元素，尙成疑問，似與鈾 II（UII）有關係。然此處或有至今未明之新元素存在亦未可知。鈾 Y（UY）與錒（第十九表 Pa）確有關係，大約與事實相近；錒爲錒系之第一位穩定元素，鈾與錒之比（U:Ac），據哈因研究，謂其常爲一定。

素等，亦出產於自然界。就中鈾及錒尚未發見穩定之同位素存在。

此外尚有一種元素，與此等放射性元素之成因有關係。即天然煤氣中之氦，當放射能蛻變時，常見其發生是也。 α 射線雖為二陽價之氦原子，然暫時之後，即失其電荷，或起中和作用而成電中性體，變成普通氦元素之狀。

放射性元素蛻變時，亦有生成帶電氦之可能。據馬斯敦 (E. Marsden) 及郎托柏利 (W. Lamboury) 研究，鐳 C 及鐳 A 之 α 射線，一部分為帶正電之氦原子，但其結果尚未確定。故現在主張氦可如是生成者，非確實定論。凡化學元素之有此等成因關係者，經過相當長久時間，不僅混存於同一礦床，且竟可混存於同一礦物中。

由化學見地而言，凡鈾礦概含有 U, Io (= Th), Po, Ra, He, Pb, Ac, Pa, Em, 等，恐尚含有氫。凡鈾礦概含有 Th, He, Rn, Th (= Ra), Pb, Em 等。

此等礦物所含諸元素之量，與各元素之壽命有關係。吾人由此可計算而知其量，所得結果，雖屬理論上之計算，然與事實上所含者頗相一致。

古時生成之放散性礦物中，其年齡與鈾及釷之半衰期 ($U:4 \times 10^9 a$, $Th:1.65 \times 10^{10} a$) 相近似者，所含此等元素之量達於最大，即已呈放射能的平衡狀態。

例如鈾中所含之鐳，其最大限度與鈾之 $3.4 \times 10^{-6} \%$ 相當；蓋一方面由鈾 II 蛻變之鐳原子以生鐳，一方面鐳又放出射氣而自行蛻變。其在鈾礦中存在之量達 $3.4 \times 10^{-6} \%$ 時，即鐳之生成作用與蛻變作用正相等，是所謂放射能平衡。

據刺德福 (E. Rutherford) 研究，古礦物中可得含放射性元素之最大限度，如第二十一表所示：

第二十一表 (對於鈾量之百分比)

鈾	系	釷	系
UII	$1.96 \times 10^{-2} \%$	$MsTh_1$	$4.2 \times 10^{-8} \%$
UY	$8. \times 10^{-11} \%$	$MsTh_2$	$5.2 \times 10^{-12} \%$
UX	$1.3 \times 10^{-9} \%$	$RdTh$	$1.5 \times 10^{-8} \%$

Io	$3.9 \times 10^{-4} \%$	ThX	$7.4 \times 10^{-11} \%$
Ro	$3.4 \times 10^{-5} \%$	ThEm	$1.2 \times 10^{-14} \%$
Rn	$5.0 \times 10^{-10} \%$	ThA	$3.1 \times 10^{-17} \%$
RaA	$3.1 \times 10^{-13} \%$	ThB	$8.5 \times 10^{-12} \%$
RaB	$2.7 \times 10^{-12} \%$	ThC'	$7.9 \times 10^{-13} \%$
RaC'	$2.0 \times 10^{-12} \%$	ThD(Pb)	$1.2 \times 10^{-14} \%$
RaD	$8.2 \times 10^{-1} \%$		
RaE	$7.1 \times 10^{-1} \%$		
RaF(Po)	$1.9 \times 10^{-3} \%$		

此種計算，屢屢與礦物中所發見者相同。由此等關係，可推知礦物之時代，吾人現在所見之礦物，其生成期至少在千萬世紀以前。

鈾礦中除含有上述諸元素之外，尚含錒系元素。然其量普通概少，例如鈾II原子之97%均見錒之蛻變系，而錒系則不過3%耳。錒系最重要之元素如釷，其最大限度，僅為鈾之 $1.29 \times 10^{-5} \%$

而已。

察礦物由一種熱力學分圈向他分圈移動時，必起變化，固不待言，即在同一分圈內，若外界之條件不同，亦有變化發生。此時，礦物所含之原子，亦起特殊之移動。此種移動現象，若為放射性礦物，則由其所含原子之內力而起。

由舊元素蛻變生成之新元素，其化學性及蛻變作用，即令在當時穩定狀態之礦物中，亦為引起新化學反應原因之一。此種新原子之化學性，常與母元素之化學性相異，可入於新地球化學之循環中，而與其他有成因關係之原子分離。

例如錳、鏷、鉛三原子，可成不含鈾之新物質，與鈾分子，又錳與鉛之新化合物，亦與鈾分離而存在。鏷為鈾之一種同位素，在鈾礦物中與此相當之成分，其化學性與他部分不同。即鏷已加入鈾之地球化學循環系。

此等新元素，由以後所起之化學作用，與其根源之鈾礦及鈾礦相去愈遠，而呈集中狀況。放射能甚強之元素，例如錳，在不含鈾或鈾之他種礦物中，其含量之百分比比較在鈾礦或鈾礦中時低，是

爲其特徵，蓋表示未達平衡狀態之意。至於非放射性新元素，如氫或鈦、鉛則反是，乃表示集中現象。誠如是，則吾人周圍之自然界，大放異彩，從前夢想不到之新科學觀，正方興未艾也。即礦物界有一部分經過一切地質時代—— 2×10^9 年以上——，任何方法均不能破壞之，其原子呈「靜止」狀態；第二部分已達不可再破壞之狀態——放射能平衡之意——，或恰如已達此狀態之物，即地質學所稱之古放射性礦物是也。第三部分爲不穩定平衡狀態之物，其變化僅可向一方進行（任何外力均不能改變之）；經過時間漸久，其變化則漸衰，漸漸接近平衡之狀態。

由吾人現在對於無生物質之見解而言，上述礦物界，似可分成二種，有明顯之區別。其一種常有能放射而出，他一種則與此完全無關係。

蓋吾人之觀念，對於今日未曾經驗而偏於理論之放射現象，似尙難充分明瞭。

然放射現象，何故僅爲鈾及鈾之特性，殊覺費解。況此二元素，除此特性外，與普通化學元素決無稍異。自放射能被發見後，有人創一種假說（最初提議者爲路朋（G. Le Bon）），謂此種性能爲一切化學元素所共通，乃一般物質之通性云。是則鈾及鈾之放射能特性，亦有普遍化之意義存焉。

例如鉀及鈷現已確定其有 β 射線及 γ 射線然其放射之機構及其結果如何則尙未明又其他尙有數元素，例如某金屬，亦有認其呈放射蛻變之現象者。

鉀素在地殼中之分布頗廣，故其放射效應之總量，似應比鈷及鈦更多。然宜注意者，現今鉀及鈷尙未列入正常之放射性元素系中，故尙難斷定之。

至其他元素是否尙有放射蛻變現象，據研究結果，亦難證明其不存在。或其現象甚大，非吾人現在之方法所能認識，亦未可知。

由此種研究之經驗，遂成他種新假說之基礎，如刺德福所創者是也。其說謂：除放射性元素外，所有普通元素，可視爲往時已經蛻變完了之穩定殘骸。現在鈷及鈦蛻變系之各元素，亦可遺留鉛而歸消滅云。

上述兩種見解，可衍生人類之新思想，與原始思想之固執宇宙觀對立。久已忘懷之觀念，又有復興再現之況。

刺德福之假說，與熵（熱容量因子）之結論相似，可得相同之觀念（參考第五十二節）。即

化學元素，最後可達到內部穩定之狀態，乃不可避免之現象。

如是，則路朋所謂一切元素均有放射蛻變性一說，其當然之結果，應爲可逆反應——元素之合成作用。就此見解而言，預想合成元素，或不至絕望，大可鼓舞今後之研究與探求也。能斯特 (Nernst, W.) 及京斯 (T. Jeans) 曾舉巧妙之例，以證明應向何方探求此種合成法。據近時新科學觀察之結果，原子之內部現象，其領域更廣，可推定各原子之合成，或蛻變之關係。天體之宇宙領域，爲發現特殊能之源泉，已無疑問。赫斯 (T. Hess) 所創說之「透過線」或「貫穿線」——即如 γ 射線——恐卽由此而來，繼續不絕，以達於吾人之地球，其貫穿本領，遠在最硬之放射線以上。吾人於此，已漸接近自然界之神祕。現在放射蛻變之真相，恐亦將由此方面而獲其解決歟。

原子蛻變之理由，尙未明瞭。初由外力以求之，然至今日，任用何能，決不使此等蛻變影響起變化。故其原因，非謂放射性元素有特別之原子結構，卽認爲尙有未知之能存在，二者必居其一。數年以前，培林 (J. Perrin) 曾謂地球內部有貫穿力絕大之輻射線，其放射能可達於地面云。

地質學方面，言及地球內部問題，吾人之知識卽不充分，不過僅知其解答欠確實精細而已。然

地球之內部實有其存在，由可得觀察之現象，在地面上亦可表示而出之。培林之假說，有多數間接之證據，可謂完全合理。然再經檢討，遂至得否定之結果。蓋赫斯之貫穿線非由地球深部而來，實來自高空，且未大量集中，未足以使原子蛻變受其影響之程度。

五十九 地殼中之放射性元素

鈾及釷之地球化學，其不完全之點雖尚多，然已確定之事實亦不少。

此等元素分布於地球全部之量，均屬已知，且與多數普通元素比較，亦頗達精確之程度。蓋吾人已發見檢定放射性元素之方法，其量雖微，亦可由定量法以測定之故也。

鈾及釷位於第二表第五段，其量與地殼總量之 $n \times 10^{-8} \sim n \times 10^{-2}\%$ 相當，大約可達 $10^{14} \sim 10^{15}$ 公噸；但釷之分布比鈾更多。

就此兩元素之分布而言，最顯著之特徵，為其分散狀態。地球上任何物質，似莫不有鈾或釷蛻變物之痕跡存在。

一切岩石中，均可發見鈾之痕跡，尤以其集中於酸性火成岩中之量，比鹼性火成岩中者多。據和謨茲(A. Holmes)研究，各種岩石中所含鈾之平均量，其對於岩石之百分比，如次表所示：

酸性火成岩	$9.1 \times 10^{-4} \% U$
鹼性火成岩	$3.2 \times 10^{-4} \% U$
深成岩	$8.0 \times 10^{-4} \% U$
黏土質水成岩	$4.3 \times 10^{-4} \% U$
石灰岩	$2.6 \times 10^{-4} \% U$

就中酸性火成岩所含之量，恐稍過低，尤其是富於錳之岩石，未列入計算中。據精密之測定，知其值更大。例如阿爾卑斯山新普倫(Simplon)之酸性岩中，其含之鈾量，與 $2.2 \times 10^{-3} \sim 2.7 \times 10^{-3} \% U$ 相當。又阿爾卑山阿荷倫(Aarhorn)之花崗岩，據喜爾西(H. Hirschi)研究，約達 $4.7 \times 10^{-3} \% U$ ，而維蘇威火山岩中，則與 $3.7 \sim 3.8 \times 10^{-3} \% U$ 相當，皆較上表所列者大，不言而明也。

上述鈾量之測定法，皆以放射能化學為依據，測錳射氣而定之。然亦有由純化學分析法以行定量者，其法雖難謂比上法更精密，然其結果則與上述者大略相近。

鈾不僅分散於岩石中，各礦物中亦發見之。據斯特拉特 (R. Strutt) 用放射能化學方法之測定，各礦中所含之鈾量如次：

方鉛礦 (galena)

$0.8 \times 10^{-6} \% \text{ U}$

閃鋅礦 (zincblende)

$5.7 \times 10^{-5} \% \text{ U}$

錫石 (cassiterite)

$2.9 \times 10^{-4} \% \text{ U}$

又火成岩以外，如輝銻礦、班銅礦、天青石 (coelestine)、方解石等，各種礦物中，亦皆有鈾存在。生物質所含之鈾，尙未確定而知之。然動植物質中，約含有 $10^{-11} \%$ 之錳。若生物質中除錳以外，果有鈾存在，則其量應達 $10^{-4} \%$ 以上之程度。

鈾原子之蛻變，即令在高度分散狀態，猶繼續不息。故其周圍，有微量之剩餘放射性元素，成為附屬物而存在。此等元素之量，由放射能分解定律，可計算而知之。

且縱令岩石中含有 $4.7 \times 10^{-3}\%$ 以上之鈾，但其組成中並無鈾礦或鈾之初成化合物存在，可謂為特殊現象。又任何造岩礦物中，均不見鈾為其固形混合礦物之成分，亦可視為一種特徵。至於礦物含有之鈾，其集中度比普通岩石所含分散狀態之鈾更大者，惟限於含鈾之礦物，如獨居石、磷鉍礦 (xenotime)、方鈾石 (thorianite) 及鋰雲母 (lithiunglimmer) 等是也。然此等礦物所含之鈾量，非指火成岩中比較大之集中而言也。

故在岩石中成分散狀態之鈾，與造岩礦物無化學的關係，大略成自由狀態之原子，以分布於其中，或滲透地殼中所有一切物質，或溶解於岩石毛細管所吸收之水內，二者必居其一。

鈾原子分布於地殼中之狀態，不與鈾相同。

鈾素亦呈分散狀態，在一般火成岩、變成岩、水成岩等中，皆可發見其痕跡。普通岩石含有之鈾量，比含有之鈾量多，爵里氏謂火成岩含有 $2.6 \times 10^{-3}\%$ 之鈾，布郎克 (G. Blanc) 就羅馬附近之酸性火成岩研究，謂其含量更多，約與 $8.28 \times 10^{-3} \sim 1.45 \times 10^{-2}\%$ 鈾相當。和謨茲就酸性火成岩測定之結果，知其含 $2.9 \times 10^{-2}\%$ 之鈾，與爵里氏之結果相較，頗有差異。

爵里士又就玄武岩研究鈾及釷之量得新結果如次

U..... $3.4 \times 10^{-6}\%$

Th..... $7.7 \times 10^{-4}\%$

檢定釷量之法，除放射能化學法而外，亦可用普通化學分析法以測定之，兩法所得之結果大略相同。

釷與鈾之分布狀況，頗有差異；釷之分布於水成岩及土壤中者，其量比較多，而分布於酸性火成岩中者，則比較少。而造岩礦物（獨居石、褐簾石等），亦發見有所謂釷礦物及其同像混合礦物（參觀第六十一節）。如是，則釷之分布於岩石中，不如鈾之徹底分散可知也。

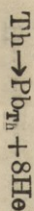
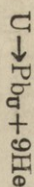
然釷之主要部分，實存在於分散狀態，尤其集中於初成礦物及分解物中。水溶液或溫泉之生成物中，所含分散狀態之釷量，甚形減少。單就分散狀態而言，鈾量比釷量多。蓋鈾蛻變物之定量法比較釷蛻變物之定量法更靈敏故也。

如下文所述，釷素有微量存於水溶液中，故可集中於生物圈，而成不溶性之物質，其一部分成

爲母物質之蛻變餘滓，及生成之新元素物而存在。

鈾及釷在地殼及全地球之分布狀況及集中情形，與其他元素不同，有特殊之意義存焉。即此二元素終蛻變成爲鉛及氦，鈾及釷漸消失，鉛及氦則隨之增加。又當其蛻變時，常呈放熱現象，此現象對於地球之熱經濟問題，有極重要之功用，觀後文可知之。釷原子若起一次蛻變（例如新釷 ${}_{90}\text{Th}$ ），則在比較短之時間內變成鉛。其半量變成鉛之時間約需 8.6 年，而鈾則非經過甚長久之年月不可。縱令自鈾 II 開始蛻變，其大部分原子變成鉛，約需 100,000 年，其小部分如錒系之變成鉛，亦需 10,000 年。其所以發生如斯差異者，蓋鈾在蛻變之中途，有長命之元素產生，例如一方面有鐳及錒，他一方面又有錒等存在，遂至蛻變之速度遲遲難於前進故也。

此時之反應，可用次式表之：



釷鉛 (Pb_{Th}) 是否爲釷原子蛻變之最後產物，換言之，此原子之蛻變，是否至鉛即完全停止，則

尙未決定。故或謂鉛更繼續蛻變而成鉍之同位素，其說亦遽難否定之。

其次宜考慮者，由鈾及鈾蛻變而生鉛及放熱，此兩元素是否集中於地球之局部，且其在地下深部之分布狀況如何？

據吾人現在之觀察，若物理學平衡及化學平衡果成立，則鈾及鈾不呈局部集中之現象，其事至明。若其不然，則平衡之穩定度殊難保持。

假定鈾及鈾能集中於地殼之同一處所，則愈集中而地殼之平衡愈被破壞。如後文第六十五節所述，觀此二元素之礦石（局部富於此二元素）特性，亦可知之。誠如是，則此二元素在地殼中成爲分散狀態之事實，其意義如何重要，思過半矣。

又事實上愈至地殼深部，放射性元素之量愈減少。其證據有二：第一，可分析鹼性深層火成岩而知之；第二，由放射性元素在地下所起之增溫率，可以斷定。若以放射能發生之熱量與地球全體之熱量相比較，則其對於一切地質時代之特殊意義，不難了解。

地球之熱經濟問題，如前所述，觀鈾及鈾之量，距地面不遠即驟然減少，可以領會之。

上所述者，不過得其大綱。欲求滿足現代科學之要求，解決其數量問題，則所有計算數字，多嫌不充分。然就地殼之一定區域而言，例如在火成岩中，精密檢定此二元素之量，實爲吾人地球之重要恆星常數。此常數及其在地殼中之分布狀況，對於地球之熱力學，有深意存焉。

然觀吾人現在所有不充分之材料，亦可知酸性及鹼性火成岩所含之放射性元素量，尙有大差。即酸性岩中所含者，約爲鹼性岩所含者之數千倍，或在此以上。至如橄欖岩等鹼性岩石，則所含鈾及鈾之量更微。

地殼深部，大多由鹼性岩以構成。大洋底之鹼性岩，則接近地面部分。故鈾及鈾之集中，在地殼深層或大洋底附近部分，不如地殼表面多，尤其在陸地區域更甚。

由此事實而言，放射性元素所發之熱，依地位而不同，在地面及陸地較多，在大洋底及下層岩石則較少。

鈾之出產狀態，至不一律。酸性岩，尤其是花崗岩中所見之鈾礦及其同像混合物，在鹼性岩中則完全無之，僅有分散狀態之鈾存在。

鈾素亦然，與鹼岩有關係之礦物決不存在。吾人已知鈾礦及鈇礦之局部集積（即所謂礦床），常限於酸性岩，尤其僅存在於花崗岩狀之岩石中。

鹽基性岩中所含鈾及鈇之質量雖微，然由此所發生之能量則甚鉅。據雷里計算，玄武岩中所含之鈾及鈇，在 2.7×10^9 年間所發之熱，足以熔融其全岩層。此種問題，姑容後第六十三節再詳述之。

然此等鹽基性岩，如由地球之熱經濟考察，已知其領未達地球之深處。在此鹼性岩圈下部，有更缺少鈾及鈇之超鹽基性岩存在。地球深部之溫度，比由超鹼性岩所含之鈾及鈇，計算而得者甚低。

鈾及鈇二元素，雖成分散狀態而存在，然實如上述，多集中於地球最外部之薄皮圈中。且地球及其熱經濟之研究日有進展，而此種皮圈之厚度日有減少之傾向。

斯特拉特及和謨茲二氏，最初認放射性元素集中於表地圈之厚度，約與 10 仟米相當。然其後經和謨茲再研究，發見鉀及鈷之放射性（一九二六年），遂不得不推定其厚度為 200 仟米。

此種分布之原因如何，尙成爲未完全解決之謎。在當時一般人對於化學元素尙未了解之際，認爲原子量最大之鈾原子，當然集中於地球內部，保孟卽爲此主張之一人。

當元素之放射性被發見時，對於地球如何生成一問題，曾發生一種新學說，與上述觀念有連帶關係。然此等學說，皆無甚重要之意義。

鈾及釷（及鉀）僅集中於地球表面之現象，其理由雖不可解，然可認爲已經證明之事實。此種現象，恐爲宇宙的原因，須俟原子在宇宙間分布之規律闡明以後，或可以解決之。就天體外皮之化學構成特徵而言，已略知其一二。故鈾、釷及鉀（恐釷亦在其中）等在地球上之分布狀況，或同屬於此現象亦未可知。

鈾及釷之分布，與鉛之地球化學史有關係，幾無疑問。

吾人對於此等問題，雖所見所聞不甚充分，然此二元素之蛻變系，最終成爲鉛之同位素，則確屬事實，故上述關係，實不可否認。

此問題第一可疑之點，卽普通之鉛從何而來？察普通鉛之原子量爲 207.2，是否可認其爲釷

鉛（原子量 208）、鈾鉛（原子量 206）及釷鉛（原子量 210）之混合物，雖難直接證明，然間接之證明不能不認為滿足。

先須認鉛有同位素存在，若視普通鉛為鈾鉛（ $PbTh$ 或 ThD ）與鈾鉛（ PbU 或 RaE ）之混合物，則其性狀是否與鈾鈦之比例（ $U:Th$ ）相當，可計算而知之。又此種混合比例，雖假定其與地殼中之 $U:Th$ 相當，亦無不可。且假定岩漿狀態生成岩石以前，即岩漿凝固以前，已有此兩種鉛之混合物。

此種鉛在岩石中，僅發見其成分散狀態。據最近測定，則酸性岩中含有 $2 \times 10^{-3}\%$ 之鉛。蓋鉛之礦床，即其局部的集中現象，概與岩漿有關係也。

更由數量方面詳考之，據赫尼士密特（O. Hönigschmidt）研究，錫蘭島產方鈦石中所含之鉛，其原子量與 207.2 相當，遂決定與普通之鉛相同（鈾鉛為 206.0，鈦鉛為 208.0）。而此鉛之由來，則為方鈦石中 68.9% 之鈦及 11% 之鈾所構成。但其中尚含有鉛之第三同位素鐳 D（ RaD ），其半衰期為十六年。再經二百年後，則此等同位素完全消失，於是方鈦石中之鉛，已與普通鉛無

異矣，依上述假說計算自然界，尤其是地殼中鈾與鈾之比量，得結果如次：

$$\text{Th} : \text{U} = 6.27 : 1$$

然事實上吾人與鈾相遇之機會遠大於鈾，故兩者之差，或過大超過上列之比例。故上列之比例，對於地殼中鈾及鈾之實況，殊難有所解決。據阿斯通之新研究，曾就普通鉛以決定其各種同位素之比量，即普通鉛中含原子量 207.0 之鉛最多，恐尚有原子量 209 之鉛存在；然對於鈾鉛及鈾鉛之關係，則殊難說明。但據阿氏實驗之結果，固明明知普通鉛由三種同位素所組成，即含多量 208 原子量之同位素，與少量 206 原子量之同位素，及非放射蛻變系所產 207 原子量之同位素是也。

觀上述事實，則可知在地面之條件下，新成之鈾鉛及鈾鉛，漸至成互相混合之狀態。此種作用，蓋由數量以求其與放射蛻變平衡相一致之意歟。然鈾鉛之壽命如何，尙未決定；又鉛之組成，單由鈾及鈾（鈾不在內）之關係，則不能證明之。

因同位素之問題尙未解決，近年來大引起學者之興趣。一方面，大多數化學元素，由多數同位

素混合而成，固可以決定；但他一方面，完全爲不同之共生狀態，猶如隕石等來源完全相異時，其化學元素之原子量又常相同。誠如是，則可得一結論，即自然界有一種作用，與此等特殊同位素之混合有關係，而與地面上諸條件則無關。察原子量爲一定不變之常數一層，對於一切原子，尙不能絕對確定證明之，例如生物體內所含元素之原子量如何，則未曾見有人測定。分布於生物質內之元素，是否與其他狀態之元素有所區別，就某觀察點而言，亦非不可能。據推論，謂：生物質中有一種能力，可使原子之種類（同位素）一一分離而存在。除上述特殊之例而外，次述事實，已可決定無疑，即無論地球上之無生物界或隕星環境中，同位素決不起分離現象是也。

就各個元素研究，以求證明其特殊同位素之混合現象者，今日尙付缺如。故吾人對於此等問題，不過憑極少數之經驗事實以論之而已。

新成原子之狀態形類如何？一切均不明瞭。至於新成之鉛，謂其爲自由狀態之原子，未與他物（或其他鉛原子）結合，亦有相當理由存焉。

要之，吾人對於此種新奇領域，可謂彷徨歧路，尙不知其何所底止也。

六十 鈾礦及鈾礦之化學性

此兩元素之礦物化學，研究尚不充分。其組成甚形複雜，而其分析亦有極大之困難。同時此二元素自身之化學性質，亦未達充分說明其礦物之程度。

其主要礦物，屬於初成及變成種類，其生成條件，與吾人實驗室中所行者完全不同。

例如鈾之氧化物，若在實驗室之熱力學條件下，即在常溫常壓之下，其作用猶如鹼質，可生硫酸鈾及硝酸鈾等鹽類。但天然礦物之二氧化鈾 (ThO_2) 與 SiO_2 、 ZrO_2 或 TiO_2 相同，其作用猶如酸酐，其生成條件如何，非實驗室所可得而行之。此等礦物非為鈾鹽，乃形成複合無水酸鹽之狀態。若在生物圈之溫度及壓力下，處理此等物質，不惟難以認識鈾之化學性，且此等礦物在生物圈內亦呈不穩固之狀態，故二氧化鈾之化學性，似依熱力學條件而有顯著之變化，此固可推而知之。

鈾之性狀更形複雜，凡實驗室中所研究之鈾素化合物，其性狀與大部分鈾礦及全部初成鈾

礦迥異。尤以物理性之比較，相差甚鉅。人工合成之鈾鹽，概呈黃色或綠色，其結晶透明，而有玻璃光。天然鈾礦，雖亦有呈如此性狀者，然主要之鈾礦則完全不同，呈紅褐色而不透明，帶金屬光，幾成黑色之狀態。其生成條件，大概為缺少氧素之高溫環境。其化學結構，亦與黃綠鈾礦大異。察實驗室中合成之鈾鹽及一部分天然產鈾礦，或以三氧化鈾 (UO_3) 為鹼質之鹽，或為酸酐三氧化鈾 (UO_3) 之鹽，二者必居其一。然鈾之主要礦物（如瀝青鈾礦等），形成 PuO_8qUO_3 之鹽，或為酸酐二氧化鈾 (UO_2)，或為 TiO_2 , Ob_2O_5 , Ta_2O_5 等與 UO_2 之複合無水物，其化學結構及化學性，均尚未明。此時， UO_2 與 SiO_2 , CeO_2 , ThO_2 等有某種類似之點。氧化鈾不特呈酸酐之形狀，且其化合物亦呈金屬或半金屬之性質，例如重金屬之硫化物，及硫代某酸鹽（如 H_2AsS_3 , H_2SbS_2 , H_2AsS_4 ）等，即與鈾有類似之結構，同時出產於礦脈中。蓋熱力學條件不同，則鈾化合物之分子結構亦起顯著之變化，其向金屬狀移動之原因，恐與其原子羣之電子排列有關係。其天然礦物，究竟呈金屬狀態，抑呈介體（dielectric）狀態，不可不注意；此等性狀對於該化合物之歷史及其地球化學現象，雖有重要意義，然此處不能詳述，故略之。

現在吾人對於鈾礦及釷礦，所得而研究者，不過表面的知識而已。此種研究論文頗多，已知之鈾礦，在百種以上。然其化學式之稍較精確者，尙未達五分之一。最初製出鐳素之主要鈾礦，例如瀝青鈾礦羣之礦物，現已漸引起學者之注意，從事研究其分類法。蓋歷來所稱之瀝青鈾礦，實有種種化合物包含於其中。

釷礦亦然。已見諸記載者，約有五十餘種。然其正確之化學成分尙不明，而其化學式亦與分析結果不一致。缺釷之某種同像混合礦物，如方釷石等，恐其 ThSiO_4 化合物，成爲固溶體而混在其中。此 ThSiO_4 乃已知正確化學式之唯一天然產釷化合物也。

上述化學及礦物學之各種知識，對於下文所述者，皆極重要，須常注意勿忘。

鈾及釷之化合物，常以氧化物爲主，可視爲其特徵。至最近爲止，尙未發見其氧化物以外之礦物。

此等含氧礦物，據吾人所知，其在高溫亦呈穩固狀態，可由岩漿或熱水作用以分離而出。自一九二七至一九二九年以來，自然界中鈾釷化合物之新種漸被發見。在坎拿大之偉晶花崗岩中，久

已知其存在，但一九二七年以後，研究始詳，且在奧羅涅次 (Ononetz) 之 Karelien，亦發見其類似物。其化學性雖尙未明，然其屬於鈾及釷化合物之新種則無疑，其最重要者，乃在其新生成方法一點。此新礦物爲含鈾及鈾釷之石炭，吸收有多量之氣體（有40%以上之 CO_2 ， H_2O 等）。其所含之氧素量雖尙不確知，然恐完全未含氧。其生成原因，乃爲氣及水作用之產物無疑，而偉晶花崗中產出此種礦物，亦與事實不相矛盾。

由此種產出狀態以推定鈾釷礦之成因，對於地殼中所有鈾及鈾之歷史，有深意存焉。

六十一 地殼中之鈾

鈾之地球化學史特徵有二種：（1）無表成礦物存在；（2）其天然化合物不溶於地面附近之天然水。

就海洋水中所含之鈾而言，其成爲何種狀態（溶液、膠溶液或浮游生物？）須加研究，且其含有之量如何？亦有再檢定之必要。至於溫泉中，不過知其有痕跡而已。

普通溫泉（礦泉），無鈦素存在。又地面水中，亦不見之。即就含有鈦之變成礦物而言，恐亦爲初成礦之變質物。

鈦在火成岩中，成爲三種狀態（參考第五十九節）。第一種成爲造岩礦物之同像混合物，含有鈦族之稀土金屬元素，又更分爲二羣。其一羣爲磷酸鈦（即獨居石）與磷酸鈷（即磷鈷礦〔*xenotime*〕）等；他一羣爲綠簾石屬之褐簾石（*orthite*）等，爲有高嶺土結構之矽酸鈦。此等礦物，常在岩漿中結晶，其結成各個微晶後，分散於全岩中。是即所謂岩石之副成分，其對於全岩之百分比，普通甚小。獨居石與褐簾石各存在於花崗岩中，兩者之分布狀態，猶如互相補償之狀。

第二種出產狀態，爲一切造岩礦物中所含鈦之痕跡。此即爲分散狀態之鈦，不成局部集中，且無可認識之鈦化合物存在。此種分散狀態，外觀上固常相同，然鈦究竟是否成爲氧化物？抑或爲自由狀態之原子而存在？則尙未明瞭。大部分之鈦，即呈此種分散狀態，以存在於地殼中，其分散度屢屢甚高（參考第五十九節）。在中性及鹽基性火山岩中，僅以分散狀態爲主。

第三種出產狀態，僅存於酸性岩中，尤以偉晶花崗岩爲主。此等偉晶花崗岩更分爲二種：其一

種或完全不含鈾礦，或僅含少量鈾之礦物，如鈾酸鈦、鈾酸鈷（或鈾酸鉍）等；他一種偉晶花崗岩，則僅集中鈾礦及鈦礦。前者之鈦成爲同像混合礦物之形式，混存於獨居石及褐簾石等；後者則成鈦鈾礦而集中。此等礦又各分爲鈾系與鈦系，皆由矽酸鹽、鈦鈷酸鹽、鈦鉍酸鹽及氧化物而成。氧化鈦，普通與類似之氧化物形成同像混合物。此種礦物，在生物圈極其穩固，雖不起變化，然在變成圈則由水化作用而變質。此時，一部分鈾雖被運至他處，而鈦則概遺留不動。此種變成物容易受機械的作用，鈾被水運搬而去，鈦則集中成不溶性餘滓。此時生成之矽酸鈦，其本質究屬於表成礦物？抑由上述變成圈變質作用所生之產物？則尙未確定。而此種鈦礦，則屢屢帶膠狀性質。

生物圈中局部集中狀態之鈦，吾人所已知者，唯有機械的生成物一種。是即所謂砂礦床，蓋鈦礦在原岩中，其理化學的抵抗性比較其他礦物爲大，結局，其遺留於砂中之量較多，遂形成此種礦床。

形成砂礦床之主要鈦礦，乃富於稀土元素之礦物，如獨居石及褐簾石等，原爲花崗岩之初成分，在生物圈內，亦呈穩固狀態。此等礦物當花崗岩風化時，成爲剩餘破碎物而集中，遂至形成富於

獨居石及褐簾石之砂；其利用之方法，最近始發明。

上所述者，雖僅稱爲花崗岩，然真花崗岩及由其變質而成之片麻岩（正片麻岩），並無區別，蓋獨居石等礦物，雖經此種變質現象，亦不受何影響而變化也。

鉅量之花崗岩類，隨地質時代之經過而風化剝蝕，則分布其中，或集中於偉晶花崗岩中之獨居石不起變化，遂形成大量之砂礦床。普通富於偉晶花崗岩脈之岩石，其所含獨居石之量亦多。

此種砂礦床，隨時代之經過，由流水之作用，其細粒及可溶性成分漸被除去，則獨居石更成集中現象。至於巴西全海岸，由巴伊阿之馬藍央（Maranhao, Bahia）至里約熱內盧（Rio de Janeiro）之砂礦床，則爲海浪潮汐等之作用，使獨居石更成爲第二次之集中現象者也。

此種砂礦床，甚富於獨居石，其含量屢在75%以上。其生成原因，乃鉅量之花崗岩，經各地質時代之霉爛風化等作用所致，其所含之鈾，亦屬達百分之幾以上，實可謂其有集中原子活性能之功用。

純粹獨居石所含之鈾，鮮有達5%者，其最大限度亦不過10%左右。至於褐簾石，則含5%以

上之鈇者極少。普通含 $\frac{3}{100}$ 以上之鈇者，即可稱爲富於鈇素之礦物。由同一花崗岩塊所生之砂礦床，有時含 2×10^6 公噸或此以上之獨居石，如南印度之特拉凡科（Travancore）海岸，即屬此例。此種獨居石（或褐簾石亦然）之砂礦床，在一切鈇礦床中，爲最豐富之部分，然其集中，非由化學作用而來，乃因此種鈇礦之特性，對於風化腐蝕等之抵抗力甚強所致，不外爲地質現象之結果。任何地質時代，即現在亦有偉大之地質現象——岩石之風化腐爛——，由此種現象，遂使鈇之集積得以實現。就人類之實用見地觀之，此種礦物之來源，實無窮盡。

現在市場上所售之鈇，其主要產地爲印度及巴西之砂礦床。北美之科羅拉多，亦有砂礦，其含鈇量不在此等礦床之下；雖曾有人至該地採取，然因經濟關係（並非採盡），現呈停頓狀態。其他如西伯利亞等地之砂礦床，則尙未至開採之時期。

此種大量之局部集積，由地球化學見地而言，亦不過認其爲次重要。其全量乃成爲分散狀態，恐成爲原子狀態而存在，亦未可知。

鈇素之地球化學，如次列第二十二表所示之狀：

六十二 鈾之分布

鈾之地球化學，其本質與釷之地球化學迥異。亦有二大特徵：（1）其氧化物有數級，各級之化學性各不同；（2）在生物圈及變成圈上帶，易溶於水，成爲無數之天然化合物。同時，鈾在岩漿礦物中，不形成同像混合物，其存在以分散狀態爲主。

大部分之鈾，亦成高度之分散狀態，與釷正同。

鈾原子滲透入地殼之一切物質中，事實上，任至何處，均可見其痕跡，然其存在之狀態如何？則尙未明。又鈾之集中現象，除含鈾岩石之風化及溶解等地質作用而外，其由純化學作用而集中者，今尙未發見。如此風化之最後產物，卽爲水成岩，其含鈾之量亦甚微。故一部分之鈾原子，在某處成局部的集中，形成一定之化合物，遂至成爲鈾礦，固不待言（參考次節）。然其大部分之原子，經過遠久無窮之長年月，由地質作用，而常保持其分散狀態。

鈾與釷不同，常存在於液體中，尤其常分布於天然水中。其所含之量雖極稀少，然任何處之天

然水中，皆可見其存在之痕跡。

凡一切天然水，幾常有放射性。此放射性不僅由鐳而來，如上述可溶性之鈾化合物，廣布於生物圈內，易溶於天然水，則必有關係存焉。惜水中之鈾，現在尚無直接檢出之方法，惟由其表成礦物之普通存在及性狀考之，可謂其含有鈾無疑也。

海水中溶解而存在之鈾，可視其達數億公噸。礦泉水及溫泉水中所含者，其量亦與此相埒；數萬個溫泉，由地下深部運出此元素，以達於地面。然此時欲測定其所含鈾之量，則除用放射能化學方法而外，別無良法，故其值可認爲表示最大之限度。蓋此等溫泉及礦泉之放射性，因一部分有鐳存在故也。由化學方面而言，鐳與鈾異，各能溶解於水，無互相之關係。而上述者，尤其僅在含鐳之礦泉見之。故用放射計測定礦泉之放射能，恐僅有小部分起因於鈾，大部則由無關係之鐳而來也。此種實例，如俄國北部烏岐塔(Uchta)河邊所鑿之井可見之，其所含之鐳量，有與鈾結合者之數十倍。此時一部分之鐳，或與鈾分離而存在，亦未可知。

由此種新研究，根據放射能以測定天然水中之鈾量，其結果未免失之過當。蓋天然水所含之

鈾，約達 $10^{-4}\%$ 或比此更低，亦未可知。

然鈾化合物在地殼內之可溶性甚大，及由水溶液析出無數之礦物（尤其由變成圈析出者）等事實，對於鈾之歷史，其原子仍甚重要。此等原子溶於礦水，運達生物圈，繼續不絕。

鈾之溶解於地殼深層礦水而達於地面者，其量比溶於海水中者甚大，已無容疑。

然海洋水之總量，與全地殼中所含水之半量相當，故在某一定時間觀察時，比較同時存在之礦水（湧出地面者）量更大，亦不待言。但海洋水所含之鈾，其百分比甚低，且與其周圍之交換作用亦極微。其水分子不過僅在表面或底面有所出入，故溶於海水中之鈾原子，幾不移動，常保持不變之狀態。

礦泉水則反是，活潑移動，繼續不絕，其蒸發既速，而他一方面又添加新鈾原子。如是川流不息，經過年月不久，其含鈾之量必漸增加，與海洋水比較，其相差愈大。故鈾原子在礦泉水中移動之速度，決非海洋水中所含者可與之比擬。又其在礦泉中移動之速度，比鈾之移動速度大。

鈾在一切天然水中分布之事實，即足以證明其在地殼中移動之迅速。又研究其礦石及礦床，

亦得同樣之結論。

六十三 鈾及釷有三種出產狀態

鈾之出產狀態（即原子之集合），可分為三類。各類皆含有特殊化學特徵之礦物。而此等礦物，或有水存在，或由水蒸氣作用以生成者也。其三類礦物如次：

（1）為酸性岩中偉晶花崗岩脈之礦物。

（2）由比較高溫之熱水作用，生成於礦脈之礦物。

（3）在生物圈或水成岩帶，溫度不高之地方，由鈾溶液析出之礦物。

就第一類偉晶花崗岩而言，鈾礦明明與其母岩有化學的關係。即發見鈾礦之偉晶花崗岩，常以富於鈾、釷等稀土元素，及其他鈾、釷、釷或鈦等，而缺少鎳、鈷、鉍及磷者為限。

此種偉晶花崗岩脈，乃花崗岩凝固時，由剩餘岩漿之最後凝固而成。而此種剩餘岩漿，實為揮發性及易溶於水之物質之集合體。偉晶花崗岩脈礦物，在大部分母岩已凝固之後，達 $150^{\circ} \sim 700^{\circ}$ 。

○溫度時，始結晶而出，集中於母岩塊容積變化時所生之小空隙間。此礦物之特徵，乃受一切氣水之作用，在氣相及含水矽酸鹽岩漿中而生成。鈾及鈦之氧化物，即令在實驗室中合成時之外界條件下，亦不呈揮發性。其在天然界，恐大部分亦不成氣態，或存在於含水矽酸之熔融物中。但此等作用之機構如何，尙無詳細之研究報告。

二氧化鈦之熔度甚高，人所盡知。故此礦物，或由某種化學作用，由未知之鈦化合物以變成。在實驗室中，尙難達其生成之條件，故吾人之推論，乃根據天然礦物之集合狀態，即以共成礦物之觀察爲根據者也。

就偉晶花崗岩脈而言，鈾常隨鈦而共存於同一礦物中。此等礦物中之鈾，非爲三氧化鈾或二氧化鈾之狀態，概爲有金屬光之黑色結晶質，其細粉呈綠褐色或紅褐色。此等礦物之化學抵抗甚強，故在生物圈中，亦不起變化，不受風化之影響。依據上述事實，可推定鈾及鈦之結合物，在風化帶仍不互相分離。

然在地下深層及變成圈，由水或水蒸氣之影響，此等礦物必大有變化。而由此變質作用生成

之產物，在生物圈則易被分解。

此等礦物之化學性甚穩定，硬度及比重均高，是即為集中成砂礦床之所以然；如錫蘭島之方鈦石礦床即其例也。

至如獨居石、褐簾石等砂礦床之大規模局部集中，其他礦床皆莫與倫比；而偉晶花崗岩脈之礦床，則不過與其母岩塊之一小部分相當。

普通存在於花崗岩中之礦物，約可分為二羣：

A. 含多量鈦及鈾之礦物。

B. 含少量鈦之礦物。其本質為鈾礦。

B 羣礦物與鈦酸鈾、鈷酸鈾或鉍酸鈾等相當，然其結構複雜，尙未充分明瞭。有時亦有與鈣鹽相當者。鈾原子雖可成複雜之酸酐狀態（若果如此，則鈦原子亦然），然在地下深層，受水之作用，即由偉晶花崗岩生成時之最後級可行之作用，屢屢使其變質。

此種變質礦物之所以呈黃色或綠色者，蓋為富於鈣素之含水鈦鈷酸鈾（*uranitronio-*

Betafite 如馬達加斯加之 *Betafite* 卽其例也。成分與此相同之無水礦物，其物理性則完全不同。東部西伯利亞外拜喀勒省之偉晶花崗岩所產 *mendelejeffite* 石，卽與此相當，有黑色金屬光輝，其粉則呈黑褐色。

蓋鈦鈾酸鹽變質之際，鈾化合物之化學結構亦起大變化。恐 $PuO_2 \cdot qCb_2O_6$ 之分解，與 UO_2 之部分氧化（成爲 UO_3 ）有關係，遂至生二氧化鈾或三氧化鈾之鹽。此等礦物，卽呈綠色或黃色。鈾之產量，在此種礦物之集中，可達最大限度，*mendelejeffite* 約含 27% 之鈾，*betafite* 所含者則達 25% 以上。其他一切礦物，例如鈾鈾鈾礦（*samarskite*）、鈾鈦鍺礦（*euxenite*）等所含之鈾量更少（12~13%）。至於含鈾之量，一般概低，約爲 5~6%，如 *bromstrandin* 卽屬於此例。然在此系礦物中，尙有未充分明瞭之種類，其含鈾較多，而含鈾反少者。例如 *tschewkinite* 及 *äschyrite* 等含 19~20% 之鈾，而含鈾則不過 1~2% 已耳。

B 羣之偉晶花崗岩脈中所產天然礦物，卽鈾礦中所含之鈾及鈾，其量甚多。此羣礦物含有方鈾石及鈾礦等，而鈾、鈾、鈾等金屬氧化物則甚少，且鹼質量亦甚少。稀土元素中，如釷在 *creveite* 則

成爲 $(Y)_2O_3$ 之形式，約達 $11 \sim 12\%$ ；在 α 方鈦石則成 $(YCe)_2O_3$ 之形式，其量亦相同。此等礦物，大部分由鈦及鈾之氧化物而成，形成 $(Th, U)O_2$ 與 (U_2, UO_3) 之同像混合物。此等礦物之成分，似由簡單之 ThO_2 或 $(Th, U)O_2$ 以至複雜之 (rUO_2qUO_3) 及 $(rThO_2qUO_3)$ 等，皆可視爲游離之酸酐。而此等簡單酸酐之同像混合物 $(Th, U)O_2$ ，即爲溶解複雜酸酐 pUO_2qThO_3 等溶媒之主成分。此種溶媒之量，爲礦物總量之 95% 以上。

此等礦物皆爲黑色，有金屬光輝，且呈黑褐或紅褐色之條痕。此等性質爲鈾原子，鈾之氧化物，及鈾鈦化合物之特徵，縱其量不多，而其特徵亦頗顯著。人工合成之二氧化鈦，雖爲無色透明，但與天然產者同屬於一結晶系，形成方鈦石特徵之六面晶體（含 93% 以上之鈦），兩者實可視爲一物。

此等礦物所含之鈾量，有超過 $72\% UO_2$ 者，如 α 及 β 鈾鈷鹽 (α -, β -uranoniobate) 即屬於此例。而方鈦石所含之鈦量，則達 93% 左右。

A 羣礦物，在地殼上不形成大規模之鈾及鈦礦床，一般概散在於偉晶花崗岩中。無論富於偉

晶花崗岩脈之地方，或天然選擇所成之砂礦床，均無此等礦物大量存在。即令在著名之錫蘭島砂礦床中，其所含A羣礦物之量亦甚少。

加之，就偉晶花崗岩脈全體，或僅就大花崗岩塊中之礦脈區域觀之，其所含之鑷量及鈾量均甚少。其含鑷總量達10克（與30~40公噸之鈾相當）之礦床，實不多見；而大部分之鈾，在花崗岩中成分散狀態，其達於偉晶花崗岩脈者，不過一小部分而已。

如此存在於偉晶花崗岩中之鈾量，若與全岩漿中所含者比較，其比率實極微小。

多量之鈾，恐在岩漿凝固之前後，於偉晶花崗岩脈生成以前，成爲水溶液而被除去。此種鈾屢屢遠離原岩（達數仟米），而沈澱於交代礦脈或結核狀（填充）礦脈中，然其生成皆與花崗岩有關係。此種礦脈，有由同一母岩漿而來之金屬，如銅、鐵、鉛、鋅等混存於其中，尤以硫化物最爲豐富。如此生成之鈾礦，含有多量之鈾。此等礦物，或於 $(U,Th)O_2$ 中，或於 $PuO_2 \cdot q(UO_2, ThO_2)$ 中含

有少量之鈾，或竟不含之，往往呈結晶性。一般則反是，成爲非結晶性之膠狀塊，例如瀝青鈾礦，隨第二次作用之經過，又漸成再結晶之狀態。波希米亞有名之約阿喜謨斯塔(Joachimstal)瀝青鈾礦，

即爲居禮伉儷初發見鐳時之物，其大部分爲非結晶質；又礦山工人所稱之「鈾黑」(uranschwarz)，其研究尙不充分，亦非結晶性。所謂鈾黑，恐爲非結晶質之鈾酸酐，屬於同羣之鈾化合物。

此等礦物，由 $150^{\circ} \sim 200^{\circ} \text{C}$. 以內之熱溶液析出，其所含鈷量不多，不過僅有 $1 \sim 2\%$ ，此外尙含有鈾之同位素。[U, Th] O_2 混合物之富於鈾者，不特可溶性小，且亦不甚穩固，與同礦物之富於鈷者大不同。其不穩固之性質，與游離氧素有關係，故其變質，僅生物圈可見之。同樣，鈾礦所起之變質，僅限於地表氧素帶之深層，而 UO_2 生成含鈾基 (UO_2) 之礦物，以代氧化鈾。

礦脈上部之瀝青鈾礦，常變成二次的鈾礦物。此種二次作用，往往達於相當深處。礦床愈接近地面，則游離氧素愈多，距生物質之境界亦愈近，故此種作用亦愈強。

此礦脈中雖有種種礦物存在，然礦脈之上邊，有綠色或黃色之鈾鹽，或見有含 UO_2 之新礦物發生。

此等新礦物之最普通者，爲鈣、銅、鋇等與鈾基所成之複鹽。此等礦物，屢屢形成鈾礦床之全體，如葡萄牙之 Guardia 及英國之 Cornwall 等礦床，即屬於此例，磷鈾鈣礦 (autunite $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2$)

$P_2O_5 + 8H_2O$] 磷鈾銅礦 [torbernite, $Cu(UO_2)_2P_2O_8 + 8H_2O$] 磷鈾銀礦 [uranocircite, $Ba(UO_2)_2P_2O_8 + 8H_2O$] 等，即形成其主要之礦物。

但他一方面，又發見**砷酸鈳**、**碳酸鈳**、**矽酸**等之鈾基鹽類，其數已在十種以上，而他種礦物猶多，故由礦物學而言，甚有新發展之希望。

蓋鈾礦床中尙有新礦物發見，而美國之猶他省 (Utah)、科羅拉多省及土耳其之斐加那省 (Fergana) 等地之礦床，尙含多數未知之礦物，如**鈳鈾鉀礦 (carnotite, $K_2O \cdot UO_2 \cdot Y_2O_3 \cdot 3H_2O$)** 及**鈳鈾礦 (ferghanite, $U_2V_2O_6 \cdot 6H_2O$)** 等是也。瑟普 (Schoep) 氏最近就比利時之岡果 (Cango) 礦床研究，遂發見多數有趣之新礦物。鈾在地面上有如此不穩定之化學活性，乃極有興趣之特殊事實，此事實恐與原子能學之活動性有關係。

鈾之集中於此種礦床者，其量比偉晶花崗岩脈所含之量更鉅。例如約阿喜謨斯塔礦脈，即有數百公噸之鈾存在。比利時岡果之新礦床，亦與約阿喜謨斯塔類似，其含量亦相埒。

一方面鈾成如此集中之狀態，他一方面，似與鈳之減少有關係。鈳原子不生此等可溶性物，僅

殘留於花崗岩塊或其附近之偉晶花崗岩脈中，然鈾原子則形成結核礦脈 (Konkretionsgängen)。此種礦床所產之鈾礦，常少含鈇素。

普通鈾礦，每溶解一次而成新水溶液，則純粹度愈增，而含鈇之量愈減，終至與鈇分離。同樣，凡化學性與鈾相異之新成諸元素，如錳、鎳、鉛等，亦起相同之現象，可使此等元素之大部分與鈾分離。

在此種礦脈礦床之表層部分，更生新鈾礦，其溶解度比上述諸礦更大。此種事實，對於鈾之歷史，有重要關係，而如此生成之新礦物，不留存於原地，由循環水之作用，以擴散於其周圍。又岩石之已受變質作用，而含有初成及變成礦物之鈾礦脈者，其受風化作用時，亦起同樣之現象。

如此稀薄之水溶液，固適合於鈾之分散條件，然在某種物理條件之下，由此水溶液亦可形成二次礦床。此種礦床，雖屢使鈾及錳形成最大規模之集中，然其生成機構如何，則尙未明。

然由地面上生物圈（一部分爲水成岩帶）之地面水，事實上有不溶性或難溶性種種酸之鈾基鹽，形成局部集中之礦床者。即吾人僅對於如此作用之結果，可得而觀察之。

在生物圈各種條件之下，最穩定者爲鈳酸鈾基鹽類。地面上之鈾，當鈳及鈾之含氧離子存在時，可見其起集中現象。

一切地面水中，皆有鈾離子存在，已如前述，但鈳原子之歷史，則與此迥異。故生物圈中鈾原子之歷史，實受鈳原子所支配。

鈳原子在初成礦床中，成爲礬土矽酸鹽，以三價原子之資格，形成同像混合礦物，但在生物圈，則常呈五價原子之作用。

鈳礦之出產狀態，可分爲三種：

(1) 在熱水生成之礦脈中，普通由地面水集中之鈳礦，常存在於地面附近之金屬二次集中帶。

(2) 與石油生成有關係之地瀝青中，常有鈳礦存在。石油漸化成瀝青，其含量之百分比亦漸增加。

(3) 第三種集中於陸成或海成之堆積岩中，又含銅、鋅、鎳等重金屬之砂中亦有之。

上述沈積作用，可在常溫之下進行，其大部分由生物質而來，甚與事實相近（其他金屬亦同），事實上，在某種生物中，可發見多量鈳之集中現象。

假定此等鈳礦床之地面水（變成圈之水）含有鈳時，則可生成多種不穩定之鈳酸鈳基化合物。此等化合物，概為含鉀、鈣或鋇之鈳酸鈳基複鹽。

此等礦物，在上述三種礦床中皆見其存在，然以第三種之水成岩中最多。此種礦物亦常含有他種鈳鹽，且呈現鈳之顯著特性，而鈳之特性則不顯明。即此時之鈳，不過鈳酸鹽從極稀薄溶液以吸收而來者也。

如上所述，鈳鈳礦之礦床，固可分為熱水（礦脈）類、地瀝青類及沈積類三種；然其成因互相關連，且有互相漸次轉移之現象。

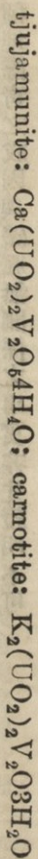
「熱水類」即礦脈類，其接近地面者，可以鈳鈳鈣礦（*tujamunit*）為代表。此乃斐加那省

Tjuja Mujun 所產之鈳酸鈳基鈣 $[\text{CaO}(\text{UO}_2)\text{V}_2\text{O}_6\text{H}_2\text{O}]$ 依克洛咁（*W. Chlopin*）法，可由此

礦床以精製得數克鈳素。

「地瀝青類」爲最近猶他省滕普爾山脈 (Temple Mountain) 所發見之鈳鈾基瀝青；在地面上觀之，其主成分可視爲鈳酸鈾基，卽鈳鈾礦 (uvanite, $2UO_2 \cdot 3V_2O_5 \cdot H_2O$)。

「沈積類」鈳鈾礦之大礦床，發見於北美科羅拉多省及猶他省，其鈳成爲鉀或鈣之鈳酸鈾基鹽而存在，其式如次：



隨此礦床而存在者，尙有鈾之硫酸鹽、碳酸鹽、磷酸鹽等。此等礦物呈黃色，爲粉狀或片狀結晶，或非結晶質，成爲圖案式之砂岩膠結物，屢屢含有機物、木片、植物性炭化物、骨片等。卽此等堆積岩，與陸岸附近淺水體所生之水成岩相當，其面積達數千平方仟米。就中富於鈾之岩層，呈3~15米厚之透鏡形狀，其長廣未超過35米，而最大面積大約與300平方仟米相當。約含有1~2%之鈾。

此礦床之成因如何尙未明瞭。自其特徵觀之，似與銅、鉻、鉛、鈳、鋅、銀、鎳、鈷、鉬等金屬之共生水成礦床，應屬同類，尤妙者，此等金屬之水成礦床，其成因亦有多點未明。吾人所知者，惟此等礦床，概由生物圈地面，或接近陸地之淺水體中，所有大陸或島嶼物質之風化生成物而來，則已無疑問。此等

金屬化合物之析出，多起於氧素不存在之地方，或氧素甚缺少之環境，於此可見嫌氣性生物之重要作用。此種金屬礦床，以不含鈾及釷爲普通，而其存在，寧謂爲例外。

據詳細考察之結果，知此等礦床，可由相同自然地理條件而生成，決非偶然。但此種自然地理環境之研究，今不過漸有端倪，尙未達完成之域。故上述者，恰如腐泥及瀝青生成之狀，與氧素帶下界所起變質作用之特例相當。然同時觀其無多量有機物之堆積一點，則其作用，與乾燥氣候——如沙漠地方之氣候——似有關係。惟此種見解，現在尙難認爲確實之觀察也。

其富於有機物，固不待言，然其成因之一，應視爲一種釷化合物，此物與地瀝青有關係。誠如是，則此種地瀝青之成因，與礦脈無關係之事實，非先證明不可。

此種礦床所含之金屬，其由來不必常同。其一部分由含此等金屬之岩石風化而來，或由溶液沈澱以生成，然普通則由生物生存或死後之作用，致集中此等金屬之現象爲較多。此作用可互相補償，生物在富於此等金屬之環境中，吸收此等金屬之量甚多，及生物死後，由外界之微生物活動，可得同樣之結果。

在此種礦床中，常含有機物及生物餘滓，到處可見。其大部分之鈳，由生物集中而來，乃不可掩之事實。

赫斯曾證明生物分解時，其所生之有機物，對於鈳酸鈳基物之生成，有甚重要之關係。如 *carb-* note 及 *tujanarait* 11種礦石，常集中於生物餘滓之周圍，又被碳質物以圍繞之。

故鈳在稀薄溶液中所起之沈澱作用，須有機物存在而後實現，實屬合理之現象。

生物有如此作用，對於分散狀態之金屬歷史，有甚重要之關係。此時所起之變化，可視如毛細管力（表面張力）之一種接觸作用。

尤以鈳、鈳及硫（或磷）等之沈澱，多與生物質有關係，已屬肯定之事實。

有時，鈳及鈳可與數種金屬共存於地瀝青中。又泥煤中，有時亦發見鈳與銅或其他礦物所形成之化合物。例如馬達加斯加泥煤質砂岩中，有由浸透偉晶花崗岩脈（富於鈳）而來之水，即見其析出磷酸鈳基鹽（磷鈳鈣礦）。

生物質有如此集中鈳之作用，其對於鈳素之地球化學，大有影響。何則？蓋其他一切作用，據吾

人所知，皆適合於其分散狀態故也。故就鈾之表成礦床而言，生物質可爲其化合物析出之主要原因，幾無疑問。又在生物圈中，其成因與生物有密切關係之碳酸鈣，亦可使釩酸鈾基鹽由溶液沈澱而出。此種事實，可以說明某種鈾礦之成因。

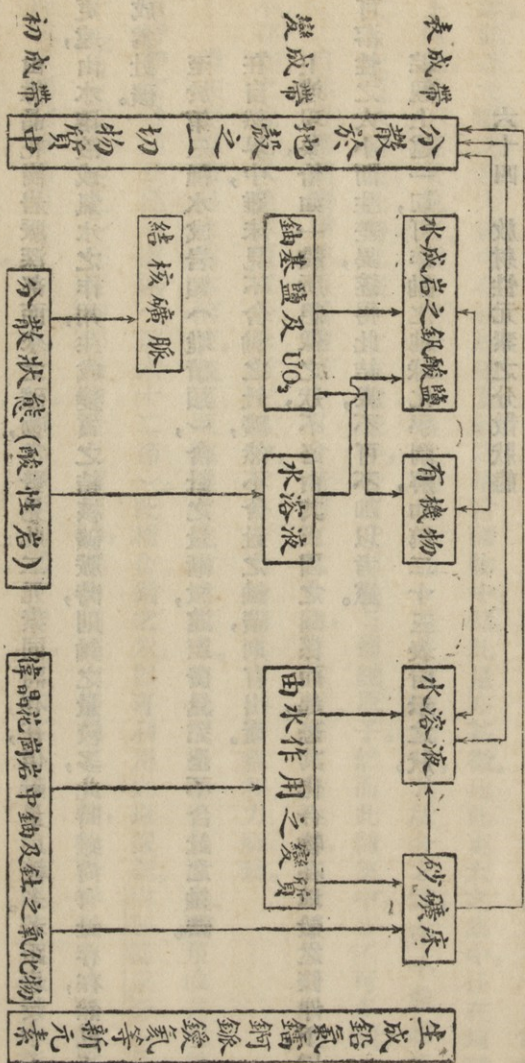
鉅量之鈾，由此等作用，僅集中於水成礦床。例如就科羅拉多及猶他之礦床而言，其集中率雖低，然亦達數千公噸以上。

上述諸礦床，一見似甚顯著，然就鈾之地球化學史概觀之，亦不過表示二次的重要關係而已。實則存在於地殼中之鈾，達 $10^{18} \sim 10^{14}$ 公噸，其大部分成爲分散狀態，其成爲鈾礦者，僅極微小之部分耳。

鈾素亦然，乃以分散狀態爲特徵。蓋鈾及鈾之原子，在分散狀態時，互相密接，不能分離，以共存於地殼之各物質中。

然此二元素雖同在分散之狀態，仍有顯然不同之區別。當其由水溶液起再結晶現象時，鈾之集中量比鈾之集中量甚少，且有時甚至於全無鈾之二次集中現象。

第二十三表 鈾之地球化學



此問題雖有再研究之必要，然愈接近生物圈，此兩元素愈易起分離作用，已無容疑矣。

由偉晶花崗岩脈深部而來之礦物，常發見此二元素同時存在，但鈦量則較多。若距岩漿中心更遠，由水溶液或氣水之作用，生成變質之結核礦脈時，則鈾之量較多，此時雖尚有鈦存在，然已不成爲鈦礦。

至於第三種水成岩類（堆積類），含鈦之量漸微，遂至發見完全不含鈦之鈾礦。

在自然界中，雖未見不含鈾之鈦礦，然不含鈦之鈾礦，則有出產。

上述現象，恰如一般所想像之狀，不必由其成因之關係而起，恐其化合物在地殼之條件下，因可溶性之大小而生差異，遂得此結果，不可不加以考慮。

綜觀上述一切，可作鈾之地球化學圖解，如第二十三表所示之狀。

六十四 放射性元素之分散狀態

分散狀態，爲鈾及鈦元素出產狀態最顯著的特徵。尤以強放射性元素釷、錒、釷、鐳、錒、鐳等，此特

徵更明顯。

此等元素，不特未形成礦物，即在礦物以外，亦不見其有原子集中之現象。如前第五十九節所述，此等元素之最大量，可存在於鈾及釷之最古礦物中，然此量亦甚微。比此更大之集中，任在地球上何處，均不能發見之。礦物中含最大量之鈾者（如 α 及 β 鈾酸鈾），其所含之鐳，亦不能超過 $2.5 \times 10^{-6}\%$ 以上。此時，此礦一立方釐米中，含有 6.7×10^{15} 個鈾原子。然而此種集中，亦不可多觀。

自然界無鐳礦存在。但實驗室中可合成鐳之化合物，故其不穩定之性質，不能認為天然鈾礦不存在之理由。又鐳非遺留於母礦中之物，故亦非對於母元素鈾無親和力所致。

鐳在變質帶，易成爲水溶液，被運至遠離其生地之他處。由此深層湧出之溫泉、礦泉或井水等，有時即富於鐳分，已如前述（第六十二節）。此種含鐳之水，即可利用之以採鐳。內那德丘奇（A. Nenadkewitsch）在斐加那最初發見鐳床時，察明鐳在水作用之上帶，特單獨集中於重晶石，而成所謂鐳重晶石（radio-barite）。就此礦床注意詳考之，可知其遠離原母礦漂流而來之途徑，即其移動現象，可以明瞭。

然此種現象，恐爲鈾及鐳之共通狀態，亦未可知。

在上述環境中，可發見不含鈾而僅含鐳之天然礦物。當鈾被水移動時，可與鐳分離，已如前述（第六十二節）。鐳則隨他元素以集中於重晶石或綠鉛礦（pyromorphite, $\text{ClPb}_2\text{P}_3\text{O}_{12}$ ）此種事實，蓋亦服從同像混合定律，當鉛及鋇化合物結晶時，其空間格子（raumgitter）所取之位置，可視其足以由溶液採取鐳。惟此時所集中之鐳，仍不比原母體鈾化合物中所存在者之多。實則其量甚微；例如不含鈾之綠鉛礦，其所含之鐳，最多不過 $1 \times 10^{-7}\%$ 耳。惟 Tjuja Mujun 所產之鐳重晶石，勉強含有 $1 \times 10^{-6}\%$ 之鐳。

至於古鈾礦物中，雖曾含 $2.7 \times 10^{-6}\%$ 之鐳，然現今未曾發見有礦物堪與之匹敵。

蓋上述現象，與原子蛻變無關係。對於鐳之放射性狀及地殼歷史，欲得精確之決定，則確實測定此種數值，甚屬重要。

鐳之各個原子，在地殼上所見之熱力學條件下，可視其爲自由能之根源。


此種能之量，與鐳原子之數成正比。例如索狄氏謂：若使 500 克純鐳射氣密集時，則其發生

之高熱，足以溶化地上一切物質，均變爲原子，全部揮發而去云。考大氣中所有射氣之量，約達 500 克之六倍以上，就重量之比而言，約在 5×10^{-15} 以上。然鐳射氣在大氣中之密度甚小，每一立方釐米，不過有 1.7×10^8 個原子存在，實爲地球上最高之分現狀態，任何物質均莫與倫比。一切物質，其所以免受鐳射氣之破壞作用者，即因其分布極稀少故也。

凡放射性元素在任意媒質中成局部集中現象時，必攪亂其平衡狀態，而發生變化，乃不可避免之事實。然在此種集積環境中，各起物理學作用及化學作用，結局其局部之集中，亦不能成立，放射性元素再擴散於廣大之範圍，仍復其分散狀態之舊觀。

吾人於此，可發見一種普遍重要之現象。即地殼之力學平衡狀態，屢被內外夾攻之能源攪亂，反復變化而維持其舊觀。太陽之能被生物吸收，可代表平衡系外之能源；而鐳原子之局部集中，與其內部力源相當。地殼遇此二種能源，其能之均勻性遂被破壞。

凡一切地球化學作用，其進行方向，常欲使全系之自由能減縮至最低限度，或竟欲消滅之。與此等自由能相當之功若告完成，則可達此系之最後穩定平衡狀態矣。



原子爲運搬自由能之工具，其在媒質中達所謂穩定平衡狀態者，卽一切原子在可能範圍內，平均一樣分布於空間，任在空間何部，原子分布之能成爲最小限度之狀態。此種原子之分布，卽爲強放射性元素之極大分散，亦卽各個原子達到可能範圍內之最大隔離狀態是也。

除原子能以外，在理想上若無他種能存在時，則一切強放射性元素（鈾及釷亦在內），亦必達高度之分散狀態，與鐳、釷、錒、鐳及鐳等亦相同。

此種結論，對於鈾及釷之全量，雖與事實不一致，然最少亦有大部分與事實相符，已如前述。上述兩原子，其形成礦物，而集中於礦床者，不過爲極微小之部分。欲明瞭地球上此兩元素之地球化學，則確定此微小部分之數量，甚爲重要。然在今日，此種確定法尙不可能，不過僅知其比率，恐與脫離可逆循環之碳素比率相似而已。蓋此問題之研究不易進行者，乃吾人所有物質分散狀態之知識，卽對於克魯克斯（Crookes）所謂「輻射物質」之知識不充分故也。

故現在對於上述由經驗而決定之事實，不得不表示滿足。察分子式或結晶格子，不能將地球上一切物質完全表現而出，無論定立何種化學式，亦不將地球上一切原子完全包括於其中，不過

如描寫物質之半身肖像而已。在此種化學式所包含原子之中間及外部，此種物質之每立方釐米，尚不知有幾千億自由原子存在。此等自由原子之存在狀態如何，尚不確知，且其對於此等結合狀態之原子羣有何關係，亦未明瞭；惟其存在狀態，與普通一般不活性元素之單體不同，則為確定之事實。

原子之存在狀態，如為放射蛻變者，可視其為發散大原子能之中心。

此種原子對於吾人周圍所起之作用，有何意義，將與年俱進，或可漸露曙光歟？

原子能對於分散元素之分布，若其關係得以明瞭，則地殼機構之特徵，可根本決定矣。

六十五 地殼中之氦

放射性元素揭穿大自然之祕密，而其可驚可奇之特性中，最為顯著者，即為其放出輕質氦氣之現象。

此種氦之生成，為放射性元素蛻變時之副現象。放射性元素漸蛻變而失其一部分質量，同時

生成極穩定之新原子，其存在期間，較地球之壽命更長。

在如此長年月間（ 2×10^9 年）消失之放射性元素量，決不可忽視。例如存在於 5×10^8 年間之鐳，約有 $\frac{1}{2}$ 變化成他種元素。

當其蛻變時所生新元素之內，其壽命較地球之年齡更長者，爲氦、鉛或氫之同位素。又在蛻變期間，鈾及鈾之一部分，不絕變成新元素，遂脫離此二元素之地球化學循環軌道，而加入完全不同之其他地球化學史。

鉛之地球化學史，不過僅知其大概。其所起之可逆循環現象，與鎂、錳等所起者相同。然其類似之處，亦不過大綱，而其同位素之歷史，則各有特徵。其在地面時，與生物質有關係，而在地殼深部，則與岩漿有關，但此等性質，不在本書範圍內，故略之。

至於無化學活性之氦元素，在地球化學史則與上異，可表現地殼之新性狀。其質量可隨地質時代之經過而增加，且隨放射化學之變化，常生成而不絕，成爲穩定之狀態。察一個鈾原子經過地質時代而蛻變成鉛之同位素鐳 G 時，同時可生九十個氦原子。同樣，一個鈾原子蛻變成鉛之同位

素鈾D時可生七原子之氦；銅系之同樣蛻變，其生成之氦原子亦不下八個。此外尚有其他未知之方法，亦可生成氦；蓋地殼中有某種氦之成因，難以鈾或鈾為母體而說明之。如綠柱石中有氦存在，即其一例。

因氦在實用上為有價值之物，故對於氦礦及天然出產之氣態氦，研究甚形踴躍，而其分布亦廣，除普通分散狀態之外，亦有成局部集中者。據勒培普 (A. Lepape) 及莫魯 (Mouren C.) 研究，由礦泉發散之氦氣，達容量之10%以上。[法國山托內 (Santonay) 礦泉則達11.16% vol.] 而由石炭層發生之氣體中，往往不少此氣存在。又在富於氮素及甲烷之天然煤氣中，有時最多含3%容之氦；如美國堪薩斯及愛達和 (Idaho) 之天然煤氣井，含1%之氦，每年之產量甚鉅，殊可貴也。

按天然煤氣井含0.1%容之氦者，已可稱為豐富，而有經濟之價值。普通與煤氣井及礦泉有關係之天然煤氣，雖不稀少，然其分布則限於地殼之少數區域。

誠如是，則放散於大氣中之氦量甚鉅，可以知之。多數煤氣井（尤其是礦泉），在幾百千年之間，實有不絕放出氦氣之現象。

此種集中氦之煤氣井，其分布僅限於地殼受強構造變動之區域，與氮素及甲烷之放出有密切關係，似已近於事實。在此等區域，雖明明有氦成局部集中現象，然其原因現尚完全不明。普通地殼之一切氣體中，皆有微量之氦存在，然其量不過在百分之一以下。

氦素特別出產於地殼之一定區域，此種區域似與母體鈾及釷多量存在之地殼相當；然據最近北美油井之研究結果，氦之有無，與石油或天然煤氣之放射性無關係；故此種假說，殊難成立。至於與氦素相混而存在之其他氣體，如氮氣、碳化氫或二氧化碳等，則可想像其由化學作用以生成。氦素不參與任何化學反應，故為可貴之氣體。

然氦之局部集中，何故僅限於地殼之強變動區域？則完全不明；恐事實上不受此種限定，亦未可知。

若果此等含多量氦之區域，與鈾及釷之主要初成或變成礦床有關係，即與其在地下之大局部集中有關係，則上述現象乃當然之結果。在此等地方，不僅有多量之氦放出，且鈾及釷之熱作用亦顯著，有發生地質變動機會之可能性。誠如是，則事實上，在地殼變動特劇之區域，可得觀察氦，且

可見其尙未達平衡之狀態。

上述見解，若果能與事實一致，則在地殼之岩漿區域，應可見鈾及釷之局部集中現象矣。

然此等關係之真相如何，其說明惟有俟諸將來。現在分布於地殼中之氦，尙非普遍現象，其特別出產於強地殼變動之區域，則不得不認爲比較可信之說明（但此種說明亦未必與事實相符，蓋火山氣中少有氦，可爲一種反證）。

現在存在於地球上之氦量，各學者均信其比存在於地殼中之釷及鈾（或鐳）之相當量更大。莫魯及勒培普曾主張地球上所集中之氦，乃由以前地球之宇宙時代以來成爲「化石」之氦而來。然此種假說，殊鮮根據，寧謂鈾及釷之半蛻變壽命（ 10^{10} 年），可與最古之地質時代（太古代——原始代）以來之時間（ $10^9 \sim 10^{10}$ 年）相比較，或可認爲確實。在此長年月間，地殼中之鈾及釷量，大約有一半消失，同時生成多量之氦。

而此時期中生成之氦量，恐與現今存在於地球上者大略相等。此量與蛻變消失之釷及鈾相當；而現在地球上所有之釷及鈾，其總量大約爲 $\Pi \times 10^{14} \sim \Pi \times 10^{15}$ 公噸。由此二元素，約可生成

$n \times 10^{13} \sim n \times 10^{14}$ 公噸氦，是則與第二表第六級（與氫同級）之元素相當。然而如此鉅量之氦如何分布？現在尚無確定之根據。

氦素之量，雖現在根據之材料不充分，然如第二表所示，可視其與第九級之數量（ $10^{10} \sim 10^{12}$ 公噸）相當。今後縱令再發現新材料，然其量未必能超過 $10^8 \sim 10^4$ 倍。縱令或昇至第八級，但恐不能再增。

此種結論，與莫魯及勒培普所主張者正相反，現今存在之氦量甚小，殊堪驚異，僅由鈾、釷及釷系生成者，勉強與之相等。

由帶電之 α 粒子析出氦分子，其後變成中性之氦原子，此種事實，與氦原子核之一定結構有密切關係。然則原子核內部是否已含有氦質子（helium proton）？尚不敢遽加推想。惟除鈾及釷以外，尚有其他方法可生成氦，乃可能之事實，故不可漠然視之。

例如某原子含氦時，其原子核內部，若起改造變化，即有生氦之可能性。據推測謂鉀及銣放射 β 射線，可蛻變出鈣及鐳之同位素，亦非不合理。若果如是，則生成鈣之同位素時，亦可發生氦。此種

推論雖逸出精確之觀察範圍外，然頗有思考之價值。且他一方面，實有此種作用發生，不過因其速度甚小，故縱令同時有 α 粒子放射而出，非現在所有儀器可以測定，是亦為合理之現象。

所宜注意者，用現在之科學方法，僅能觀察速度在每秒 20,000 仟米以上之 α 粒子。至於速度比此稍小之 α 粒子，即帶正電荷之氦原子，已不能認識之。

假若所有氦原子皆能留存於地球上，且放射化學現象，經各地質時代，繼續進行，以成今日之狀況，則可得而觀察之氦，應比現在實存之量更多，是成為完全不同之結果。

吾人於此，對於地殼之研究，又逢不可解之謎。即氦之量何故如此小？其餘之氦向何處去？此種過少之現象，不僅限於地球，即全宇宙亦有過小之況。假若新氦原子（及氫原子）不絕生成，不再變化，則其量比由星界觀測所得之結果甚多。於是則此元素是否可再變？或可被同化？實有探究之必要。近年來據能斯特之主張，謂宇宙以太中，即有如此變化之可能云。同樣，就宇宙星雲而言，亦可如此想像之。

據培林主張，謂氦起變體時，同時有一種消失作用，氦原子在氣圈之高層及臭氧層之上半，可

蛻變成原子量較小之他種原子云。依此說，則太陽之輻射線，有使氦分裂而成氫之能力。

最後試就地球之機構，觀察此二輕元素之共通現象。蓋地面上方之成層圈及更高之氣層，此兩元素集中於自由狀態之空氣區域，乃明顯之事實（觀第八表可知）。然其原子之運動，可使其愈去愈遠，終有脫離地球領域之可能，以分布於宇宙之大空。但他一方面，氦（及氫）由宇宙大空以逆行而達於地球，亦屬可能。

存在於地球上之氦量常過小；由此事實，可知其在地殼上不增加總量者，或呈力學平衡狀態（地球與宇宙間之平衡）——由地球化學全部事實觀之，此實近似於真理——，或氦之量常有減少，二者必居其一。此外，氦有成爲化合物之可能性（參考第三節），亦不可置之度外。

就氦之地球化學而言，其所表示之新性狀，極其重要。蓋地球與宇宙空間，決非完全絕緣，其中核心與宇宙大空，常起物質之交換現象。

此種事實，乃成爲從來科學未曾接觸之新問題。

六十六 地殼與放射性元素

地殼中有放射性元素存在，可發現根本之地質現象。其作用與生物圈中之太陽能比較，決不遜色。

放射性元素對於地球之熱經濟問題，有重要關係，乃二十年以前，始由爵里氏闡明。彼計算放射性元素所放出之熱，知其爲量甚鉅；如熔融狀態之矽酸岩漿，可達 1000°C 以上之高溫，以及火山、溫泉、地殼之造山運動及構造運動等強大之地質現象，皆由此放射熱以說明之。

十六、十七世紀以來，尤其自十八世紀末至二十世紀初期，以爲此等地質現象，其原因在地球內部所貯藏之熱，爲唯一之說明。即謂地球初呈白熱熔融狀態，漸漸變冷，經過多數地質時代，以至今日，其變冷現象尙未終止云。

此種概念，深入吾人之科學的宇宙觀，幾成固定之狀況。此觀念成爲多數宇宙觀假說之出發點，前世紀固不待言，即至現代，其勢力尙大。

爾里最初倡說地球自身之物質中，有熱源存在；其後三年（一九〇六年），英國物理學者斯特拉特，及更後之累力等，又創一假說，謂原子放射蛻變時，其放出之熱量，對於地球保存宇宙熱之一切現象，可充分明白解釋之。

斯特拉特之研究，對於地殼之構造問題，更爲重要。卽就較易接近吾人之岩石觀察時，放射性元素分布之比率，與地殼全厚中所分布者不同。假定鈾、釷及其他由此二元素蛻變成之一切放射性元素，分布於全地殼中之比率與地表面層相同，則地球表面之溫度必與現狀異，地球將成爲白熱狀態，或化爲熔體，亦未可知。故依斯特拉特之觀察，則地面下數百公里（例如300千米）以上之深部，應無放射性元素存在。

斯特拉特之研究，非由假說而來，乃以事實爲根據。此種事實，不能否認，惟留修訂之必要而已。據斯特拉特之研究，謂原子蛻變時所放之熱，悉成輻射熱以增加其周圍之溫度。然其實在情形如何，殊難想像，故斯特拉特之見解，亦有修訂之必要。惟其推定之結果，非以假設爲根據，故雖修訂，亦不能動搖其說。

惜其發見之正確事實多未受科學界歡迎未集中充分之注意。蓋十七世紀以來至十九世紀為止，諸學者所主張之宇宙構造科學，有牢不可破之成見故也。

一九一五年和謨茲發表計算；彼根據新事實材料，不僅確定斯特拉特之推想，且闡明地球之溫度，由此更大有增加。據此計算，則在直接接近吾人之岩石中，雖可發見放射性元素之集中量 $(\mu \times 10^{-9} \sim \mu \times 10^{-10} \% \text{ Ra})$ ，但在地下深度超過 50 ~ 60 仟米以上，即不見其存在。

其後約經過千年，此思想遂侵入今日之科學界，且從來之地質學觀念，亦將因此而根本改變，已成不可避免之勢。

此種結果，除放射性元素之研究而外，其有賴於地球化學之新研究，地殼構造及造山現象觀念之改變等者實多。

據爵里和謨茲及羅孫 (R. LAWSON) 等之新研究，放射性原子蛻變時加與地球之熱量，比以前所想像者更大。

和謨茲及羅孫修訂斯特拉特之結果，乃以鉀之放射能為根據，謂放射現象使地殼增加之熱

量，應比從前所推算者大28.2%以上云。更觀彼等之研究，其採用地殼含鈾量之數字，有過小之嫌，則事實上之總熱量，比上述者必更大。若再訂正此鈾量，則將更有1%以上之增加。

一九二六年，和謨茲及羅孫發表之常數，乃以克卡(gram calorie)表示一克元素在一年間發生之熱量，其結果如次：

U	7900×10^{-4} cal.
Th	2300×10^{-4} cal.
Rb	2.38×10^{-4} cal.
K	1.24×10^{-4} cal.

火成岩一克，每年發生之熱，平均為 11.4×10^{-6} 卡，蓋與鈾之 4.74×10^{-6} 卡，釷之 3.45×10^{-6} 卡，鉀之 3.22×10^{-6} 卡之總和相當。

地殼所含鈾系及釷系之界限，依上述研究，更有縮小之必要。此界限大約位於地殼之表層（地面下約16仟米之深度），其平均化學成分已大概明瞭，自此以下，則已無此二系之放射性元

素存在。同樣，鉀及鈾之存在界限，亦可適用此結論。

此種放射熱之分布狀況，與地殼之物理學及化學構成相一致。由地質事實觀之，地面下不甚深之處，早已不見花崗岩，其下即為玄武岩殼，乃由鹼性岩以構成之地球分圈。花崗岩殼之厚度，大陸下面與海洋下面相異，大洋底下之玄武岩殼接近於表面，而大陸下之玄武岩殼，則距地面約為 8~16 仟米。故地殼之構造，實成爲不對稱之形勢。普通大洋底，不惟無花崗岩存在，即變成圈與堆積圈（水成岩圈、成層岩圈），亦均缺之。如此不對稱之地殼構造，對於地質學、地球化學、礦物學之影響甚大，其待研究之問題正多。據地殼均衡說（*isostasy*），謂此種不均勻之分布狀況，實爲地殼與地球自身間起均衡現象之結果，故大洋及大陸之分布，即屬於其構成上之基礎性狀，普通不認其爲甚大之變化。至於大規模之變化，足以攪亂地殼之構造者甚少，且不過隔長遠之地質期間，偶然發生而已。

地殼上之熱經濟問題，大陸與大洋不同，玄武岩帶之岩石一克，每年放射之熱量，平均爲 3.9×10^{-6} 卡（此爲大規模玄武岩迸發區域之熱量），而花崗岩帶所放射者爲 15.9×10^{-6} 卡，故前

者比較甚小。

由地面漸至下層，即由花崗殼漸至玄武岩殼，愈深而放射性元素之量愈少。據研究推算，每岩石一立方釐米中，含有之放射性原子數如次：

(岩石)

(鈾)

(釷)

花崗石

$$6.7 \times 10^{14} \text{ U}$$

$$1.5 \times 10^{15} \text{ Th}$$

玄武岩

$$1.8 \times 10^{14} \text{ U}$$

$$0.43 \times 10^{15} \text{ Th}$$

爵里及和謨茲根據此種地殼構造，得次述之推定。即上述岩石所有熱效應之差異，若承認地殼構造之均衡說，則足以說明過去地質時代所起大規模之地殼運動。

吾人對於地球之歷史，不過僅與新展望相接觸，固不待言。而此新展望，不過漸形成其輪廓，可謂為新事實材料之建設初期，故吾人之新概念，將來之改變必尙多。

故據種種研究，在地面下16仟米之深層，放射性元素之濃度減小甚速，不得不加以肯定。就地殼構造而言，如一九二五年爵里所主張之週期地質現象，即其重要特性之一。如地質活動交互增

滅火山及造山作用及海浸現象等即屬之。在過去地質時代之範圍內（約10⁹年）地球上決無專事冷卻，或專有增溫之現象。

此見解與最近地質學之發展極相吻合，自太古代（始原代）以來，可發見週期六回，在每回強大之地質活動以後，即為靜止期，反覆變化而來者也。

上述梗概，對於普通地球冷卻之複雜地質現象，難於完全說明，固不待言。然此新概念，其說明之程度比較可信，且使大洋大陸之分布，地殼之均衡，酸性岩與鹼性岩中放射能之差異，造山作用之盛衰等等事實，皆互相發生關係；若恃舊假說，焉能有此成就。

最後所當注意者，此等說明方法，乃以放射能作用所發生熱之事實為根據，而所謂地球之宇宙熱（天體熱），其見解則由創成宇宙之假說而來也。

故地球冷卻之舊假說，對於已經證明之實在熱源（放射能說），今已失其效用，實可廢棄，無待躊躇。

然依爾里及和謨茲等之說明，其決定之熱平衡現狀，尙未達完成之域，以後與時俱進，必有種

種改良，或竟有根本修定之必要。

彼等計算時所注意者，僅爲熱之輻射，由輻射熱所使上昇之溫度，以及深層岩之熔融潛熱與凝固熱之關係等而已。然除此等現象而外，恐尙有大規模之現象，可消費多量之能，亦甚爲重要。如地殼所起之力學作用，卽屬於此例。又初成圈所起新礦物之生成作用，亦非放熱現象。蓋根據勒沙忒利原則，實應有吸熱現象存在。

察分布最廣而最普通之鋁矽酸鹽，其基本體之高嶺土核，卽以自由氧化物作材料而生成，消費多量之熱。

同樣，在地殼高溫區域生成之初成礦物，亦完全爲吸熱現象。惜此等化合物之熱化學問題，幾未曾有人研究，殊屬憾事。

此等礦物所消費之熱量，雖無詳細研究，然其量必相當大，無容置疑，其足以使從來計算之地熱發生影響，彰彰明也。

由是言之，地球深部尙有放射性元素存在一說，亦不必絕對否定之。蓋其蛻變時發生之熱，立

卽在原地消費而去，常保持深地層之熱平衡狀態故也。

此等問題，將來或有更詳細之說明。然事實上，原子之自由能侵透地殼之全物質，則已根本決定矣。

此種原子能分布於各地球分圈內，殆成均勻狀態，其局部之集中，不致使地面發生大影響。且寧謂局部集中現象之生成，乃一時的過渡狀態。

大部分之原子能，非結合於分子或結晶體，乃由分散狀態之原子以發出。

此種原子能，足以說明地面下有 1200°C . 高溫之溶岩漿存在；而吸熱性初成礦物之生成，亦可由此得其解說焉。

又地殼中一切化學元素之可逆循環作用，得原子能而後可以支持，且助成各原子之廣汎循環移動。

茲將本書所述一切現象，作一概觀之結論如次：

地殼之機構，由構成地殼之原子性質，而可以決定。地殼之化學組成，決非偶然而生。

卡 限 期

Date Due



地 球 化 學

大部分之物質，不絕移動（即地球化學的移動），且成可逆之循環作用（即地球化學的循

一切作用之主動力；地

地面發生大變化，其

能性？不得而知也。

微細反映現象而已；

國 立 政 治 大 學 圖 書 館

著者 () 弗那斯基書碼 553.3
Author Call No. 062
1.4

書名 地球化學
Title

登錄號碼 211988
Accession No.

月日	借閱者	月日	借閱者
Date	Borrower's Name	Date	Borrower's Name
5/10	曹祥	05/10/88	

國立政治大學圖書館

書碼 553.3
062
1.4
登錄號碼 211988

2375





* A211988 *