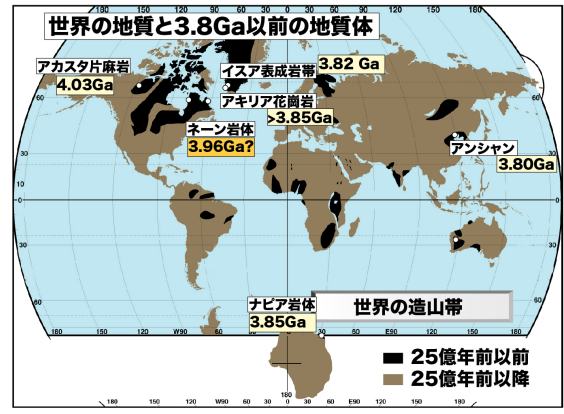
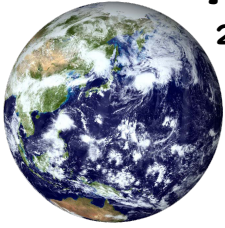


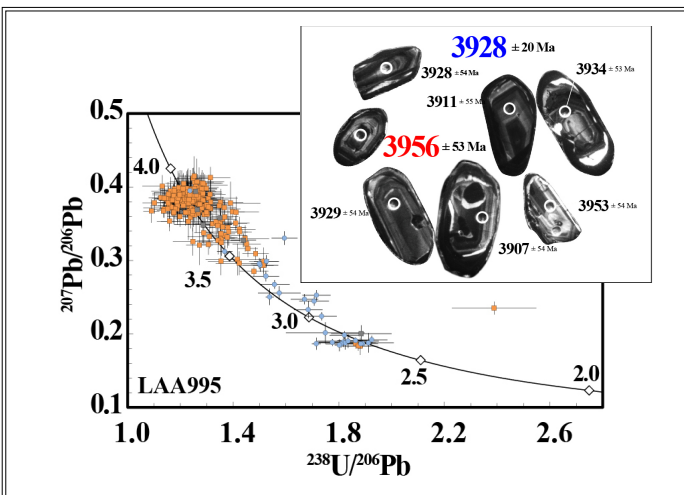
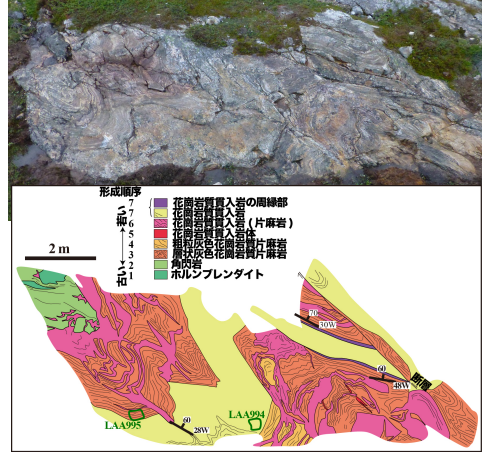
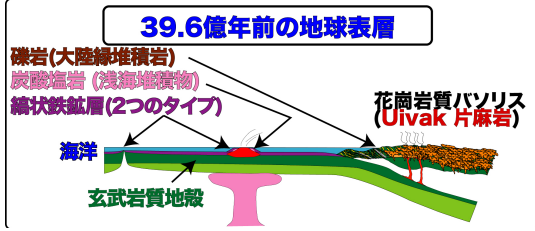
多文化共生・総合人間学演習V

「放射性同位体とその利用」

東京大学総合文化研究科：
小宮 剛 准教授
2014/11/12



39.6億年前(最古)の堆積岩



地質年代区分

時代	地質年代	生物年代	地質年代	生物年代	地質年代	生物年代
冥王代	4.0 Ga - 4.5 Ga		先カンブリア時代	4.5 Ga - 5.4 Ga	原生代	5.4 Ga - 2.5 Ga
太古代(始生代)	4.5 Ga - 2.5 Ga		中生代	2.5 Ga - 66 Ma	中生代	66 Ma - 2.5 Ma
			新生代	66 Ma - 0 Ma	新生代	66 Ma - 0 Ma
			第四紀	2.5 Ma - 0 Ma	第四紀	2.5 Ma - 0 Ma

年代測定の歴史

表1.1 近代的方法による年代測定の歴史

- 1927 放射性崩壊による年代測定(L. A. Lal and S. Walling)
- 1928 Rb-87の崩壊による年代測定(L. A. Lal and S. Walling)
- 1940 Ni-63の崩壊による年代測定(O. Nier)
- 1941 U-235の崩壊による年代測定(F. Danard et al.)
- 1942 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1943 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1944 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1945 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1946 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1947 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1948 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1949 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1950 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1951 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1952 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1953 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1954 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1955 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1956 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1957 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1958 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1959 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1960 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1961 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1962 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1963 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1964 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1965 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1966 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1967 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1968 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1969 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1970 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1971 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1972 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1973 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1974 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1975 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1976 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1977 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1978 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1979 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1980 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1981 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1982 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1983 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1984 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1985 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1986 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1987 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1988 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1989 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)
- 1990 K-Ar法による年代測定(H. H. Hess)

年代測定

①相対年代⇔絶対年代(数値年代)
②原理的に4つのタイプ

- 物理的原理: 放射年代
- 化学的原理: 水加法, ラセミ化年代
- 全地球的に共通して生じる現象の年代変化に基づく年代校正曲線と対比: 古地磁気や同位体層序

表1.2 年代測定で用いられる「年代」の主要区分

数値年代 (絶対年代)	1. 放射年代
同位体(比)年代	同位体(比)年代
宇宙線生成核種の壊変を反映した時代	宇宙線生成核種の壊変を反映した時代
放射壊変系列の平衡からのずれを反映した年代	放射壊変系列の平衡からのずれを反映した年代
放射線照射年代	放射線照射年代
宇宙線照射年代	宇宙線照射年代
消滅核種による壊変生成核種量を反映した年代	消滅核種による壊変生成核種量を反映した年代
化学反応現象を反映した年代	化学反応現象を反映した年代
天文現象を反映した年代	天文現象を反映した年代
年輪・年輪年代	年輪・年輪年代

相対年代

- 地質年代
- 化石年代
- 微化石年代
- 古地磁気年代
- 火山灰年代
- 同位体比層序年代

地質年代区分

Eonothem Era	System Period	Series Epoch	Stage Age	Age(Ma)	
Phanerozoic	Cenozoic	第四紀	完新世	0.0115	
			更新世	0.126	
		Pleistocene	Calabrian	0.781	
			Gelasian	1.806	
			2.588		
		鮮新世	Placenzian	3.600	
			Zanclean	5.332	
		Pliocene	Messinian	7.246	
			23.03		
		Mesozoic	新第三紀 Neogene	中新世	Tortonian
	Serravallian				13.65
	Miocene			15.97	
	Burdigalian			20.43	
	23.03				
	漸新世 Oligocene		Chattian	28.4±0.1	
			Rupelian	33.9±0.1	
			Prabonian	37.2±0.1	
			Bartonian	40.4±0.2	
			Lutetian	48.6±0.2	
	始新世 Eocene	Ypresian	55.8±0.2		
Thamnetian		58.7±0.2			
暁新世 Paleocene	Selandian	61.7±0.2			
	Danian	65.5±0.3			
Paleozoic	Upper	Mastutician	70.6±0.6		
		Campanian	83.5±0.7		
		Santonian	83.8±0.7		
		Coniacian	89.3±1.0		
		89.3±1.0			
	Lower	Turonian	93.5±0.8		
		Cenomanian	99.6±0.9		
		Albian	112.0±1.0		
		Aptian	125.0±1.0		
		125.0±1.0			
Permian	Baurerian	130.0±1.5			
	Hauterivian	136.4±2.0			
	Valanginian	140.2±3.0			
	Berrisian	145.5±4.0			
	145.5±4.0				

Eonothem Era	System Period	Series Epoch	Stage Age	Age(Ma)
Phanerozoic	Paleozoic	Silurian	Llandovery	439.0±1.8
			439.0±1.8	
		Devonian	Furongian	362.4±1.6
			362.4±1.6	
			362.4±1.6	
	Carboniferous	359.2±2.5		
		359.2±2.5		
	Mesozoic	Jurassic	Tithonian	145.5±4.0
			145.5±4.0	
		Cretaceous	150.8±4.0	
150.8±4.0				
150.8±4.0				
Paleogene	164.7±4.0			
	164.7±4.0			
Cenozoic	Eocene	167.7±3.5		
		167.7±3.5		
	Oligocene	171.6±3.0		
		171.6±3.0		
		171.6±3.0		

Eonothem Era	System Period	Series Epoch	Stage Age	Age(Ma)
Phanerozoic	Paleozoic	Silurian	Llandovery	439.0±1.8
			439.0±1.8	
		Devonian	Furongian	362.4±1.6
			362.4±1.6	
			362.4±1.6	
	Carboniferous	359.2±2.5		
		359.2±2.5		
	Mesozoic	Jurassic	Tithonian	145.5±4.0
			145.5±4.0	
		Cretaceous	150.8±4.0	
150.8±4.0				
150.8±4.0				
Paleogene	164.7±4.0			
	164.7±4.0			
Cenozoic	Eocene	167.7±3.5		
		167.7±3.5		
	Oligocene	171.6±3.0		
		171.6±3.0		
		171.6±3.0		

Gradstein et al. (2004)を改変

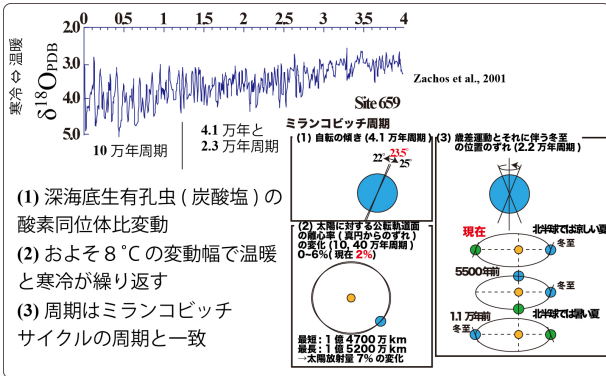
(1) 地質年代区分と年代層序区分

地質年代区分 (geochronologic classification: 地層が堆積した年代の名称): Eon (累代), Era (代), Period (紀), Epoch (世), Age (期)

年代層序区分 (chronostratigraphic classification: 年代ごとの地層の名称): Eonothem (累界), Erathem (界), System (系), Series (統), Stage (階)

(2) 地質年代区分の境界: 人為的なものと生物種の変化

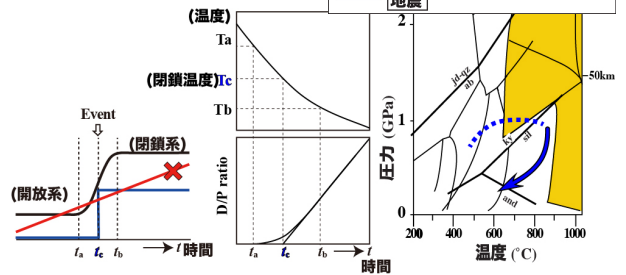
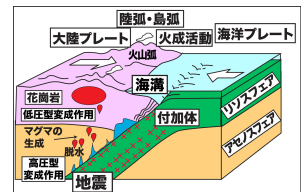
(3) 絶対年代と誤差: 誤差が表記されているものとされていないものの違い



- 深海底生有孔虫 (炭酸塩) の酸素同位体比変動
- およそ 8°C の変動幅で温暖と寒冷が繰り返す
- 周期はミランコビッチサイクルの周期と一致

放射年代測定法の仮定

- 放射壊変定数の不変性
- 年代変化を生じる現象の生成率が一定: ¹⁴C年代や放射線損傷年代等。初期値が得られる。△。
- 閉鎖系。
- 年代の起点が明確である。



放射性核種の親核種と娘核種の比を用いる年代測定

① アイソクロン年代

親核種 P → 娘核種 D 壊変定数 λ (半減期 $\tau = \frac{\ln 2}{\lambda}$)

$$\frac{dP}{dt} = -\lambda P$$

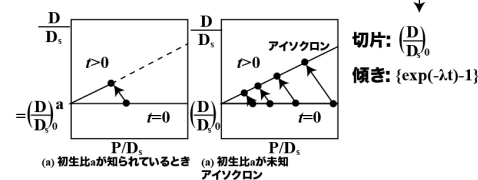
$$P = P_0 \exp(-\lambda t) \quad \text{増加分} \quad P_0 = P \exp(\lambda t)$$

$$D = D_0 + (P_0 - P) \quad \text{増加分}$$

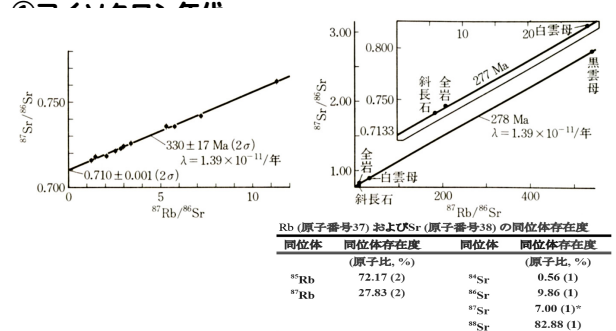
$$D = D_0 + P \{ \exp(\lambda t) - 1 \}$$

安定同位体 D_s で割る (比の方が精度良く分析できるので)。

$$\left(\frac{D}{D_s} \right) = \left(\frac{D}{D_s} \right)_0 + \left(\frac{P}{D_s} \right) \{ \exp(\lambda t) - 1 \} \rightarrow y = a + bx$$



放射性核種の親核種と娘核種の比を用いる年代測定



注1) この表中に示された値は、実験室内で一般的に用いられている数値と異なるもの。

注2) 年代測定の対象となる地質学的試料では、カッコ内の数値で示される不確定性よりもさらに大きい変動を示す、特に*印をつけた放射性超額⁸⁷Srを含む、Srの同位体存在度は試料の年代やRb/Srによって大きく変動するが、その変動の大きさが年代測定に利用される。

放射性核種の親核種と娘核種の比を用いる年代測定 ①アイソクロン年代

表2.2 放射性核種の親核種と娘核種の比を利用する年代測定法

方法	P	D	Ds	(D/Ds) ₀	衰変形式	半減期(年)
K-Ar (Ar-Ar)	⁴⁰ K	⁴⁰ Ar	³⁶ Ar	=295.5	電子捕獲(EC)	1.25 x 10 ⁹ *
Rb-Sr	⁸⁷ Rb	⁸⁷ Sr	⁸⁶ Sr	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) ₀	β	4.88 x 10 ¹⁰
U-Pb (Pb-Pb)	²³⁵ U	²⁰⁶ Pb	²⁰⁴ Pb	(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) ₀	α, β	4.47 x 10 ⁹
Th-Pb	²³² Th	²⁰⁶ Pb	²⁰⁴ Pb	(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) ₀	α, β	7.04 x 10 ⁸
Sm-Nd	¹⁴⁷ Sm	¹⁴³ Nd	¹⁴⁴ Nd	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) ₀	α	1.06 x 10 ¹¹
Lu-Hf	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Hf	¹⁷⁷ Hf	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) ₀	β	3.57 x 10 ¹⁰
La-Ce	¹³⁸ La	¹³⁸ Ce	¹⁴² Ce	(¹³⁸ Ce/ ¹⁴² Ce) ₀	α, β	9.87 x 10 ^{10**}
La-Ba	¹³⁸ La	¹³⁸ Ba	¹³⁷ Ba	(¹³⁸ Ba/ ¹³⁷ Ba) ₀	電子捕獲(EC)	
Re-Os	¹⁸⁷ Re	¹⁸⁷ Os	¹⁸⁶ Os	(¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁶ Os) ₀	β	4.23 x 10 ¹⁰

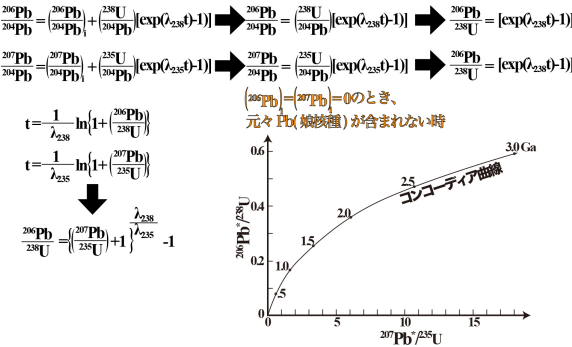
*⁴⁰Kとしての半減期, ⁴⁰Kは電子捕獲のほかβ崩壊して⁴⁰Caを生成するので, ⁴⁰K-⁴⁰Ca系を利用した年代測定も原理的には可能である。しかし、天然の⁴⁰Caの存在割合が多いので放射性超額⁴⁰Caとの区別が困難なので、Kに言んだ特殊な試料以外には試みられていない。

**¹³⁸Laとしての半減期

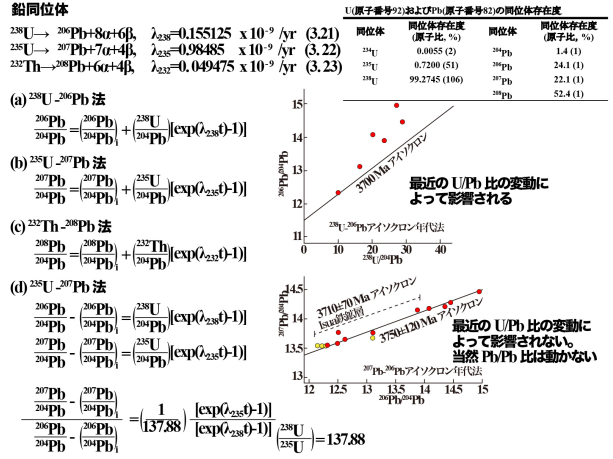
一致年代、不一致年代

²³⁸U-²⁰⁶Pb法, ²³⁵U-²⁰⁷Pb法, ²⁰⁷Pb-²⁰⁶Pb法, (²³²Th-²⁰⁶Pb法) から得られた年代が一致することを一致年代 (concordant age) とする。一方、一致しない場合を不一致年代 (discordant age) という。

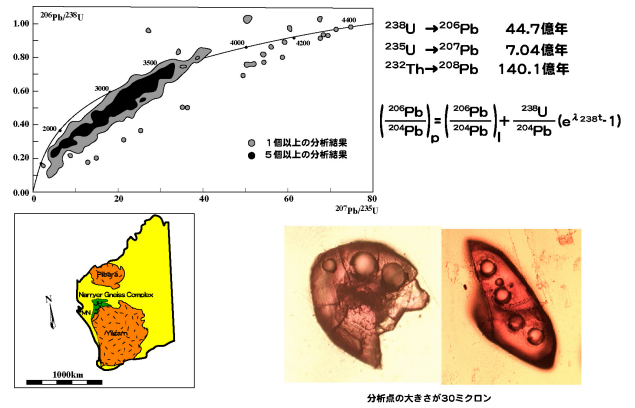
(a) U-Pb年代



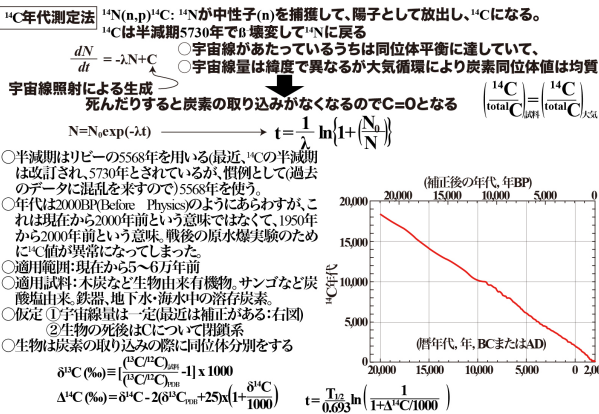
鉛同位体



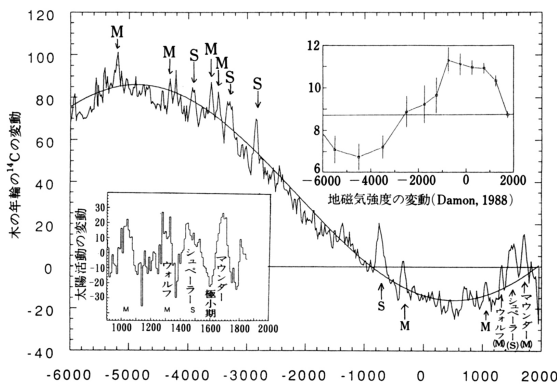
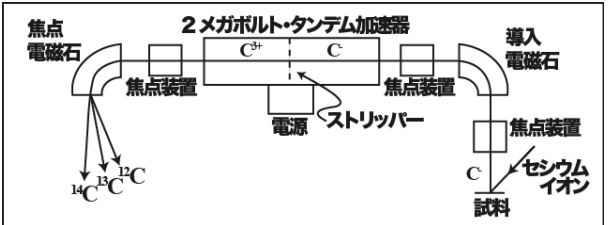
最古の鉱物



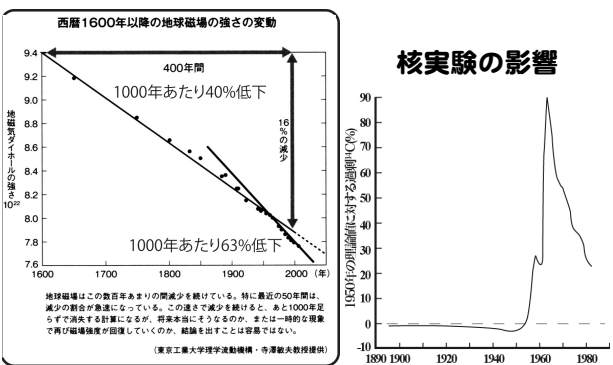
宇宙線生成放射核種を利用する年代測定



宇宙線生成放射核種を利用する年代測定



環境(気候)の周期(地球磁場の変動)



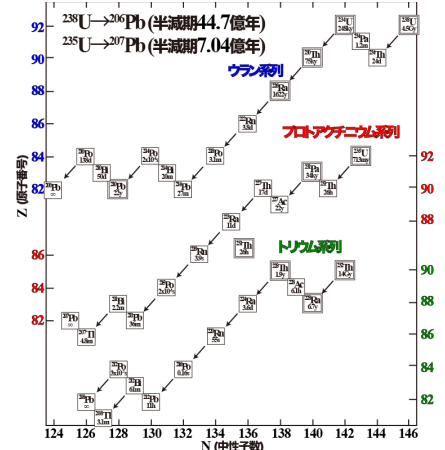
宇宙線生成放射核種を利用する年代測定

表2.3 宇宙線により生成した核種を利用する年代測定法

方法	P	P ₀	減衰後の核種	半減期(年)
¹⁴ C	¹⁴ C	¹⁴ Cが大気中で一定	¹⁴ N	5.73 x10 ³
¹⁰ Be	¹⁰ Be	¹⁰ Beの生成率が一定	¹⁰ B	1.51 x10 ⁶
²⁶ Al	²⁶ Al	²⁶ Alの生成率が一定	²⁶ Mg	7.16 x10 ⁵
³ H	³ H	³ Hが大気中で一定	³ He	1.24 x10 ¹⁰
³² Si	³² Si	³² Siの生成率が一定	³² P→β→ ³² S (14.3d)	1.05 x10 ²
³⁶ Cl	³⁶ Cl	³⁶ Clの生成率が一定	³⁶ Ar	3.01 x10 ⁵
⁴¹ Ca	⁴¹ Ca	⁴¹ Caの生成率が一定	⁴¹ K	1.03 x10 ⁵
⁵³ Mn	⁵³ Mn	⁵³ Mnの生成率が一定	⁵³ Cr	3.7 x10 ⁶
¹²⁹ I	¹²⁹ I	¹²⁹ Iの生成率が一定	¹²⁹ Xe	1.57 x10 ⁷
³⁹ Ar	³⁹ Ar	³⁹ Arの生成率が一定	³⁹ K	2.69 x10 ²
⁸¹ Kr	⁸¹ Kr	⁸¹ Krの生成率が一定	⁸¹ Br	2.13 x10 ⁵

表中にあげた方法のほか、これらの核種を組み合わせた年代測定法なども開発されている。
(例) ³H/³He, ²⁶Al/¹⁰Be, ¹⁰Be/³⁶Clなど。

放射平衡からのずれを利用した年代測定



²³⁴U-²³⁸U法

²³⁸N: ²³⁸Uの原子数 λ_{238} : ²³⁸Uの崩壊定数 $\frac{d^{238}N}{dt} = -\lambda_{238}^{238}N$: ²³⁸Uの放射能
²³⁴N: ²³⁴Uの原子数 λ_{234} : ²³⁴Uの崩壊定数
²³⁰N: ²³⁰Thの原子数 λ_{230} : ²³⁰Thの崩壊定数 $\frac{d^{230}N}{dt} = -\lambda_{230}^{230}N$: ²³⁰Thの放射能

$\frac{d^{230}N}{dt} = -\lambda_{230}^{230}N$ $\frac{d^{234}N}{dt} = -\lambda_{234}^{234}N + \lambda_{238}^{238}N$ $\frac{d^{234}A}{dt} = -\lambda_{234}^{234}A + \lambda_{238}^{238}N$ $\frac{d^{230}A}{dt} = -\lambda_{230}^{230}A + \lambda_{234}^{234}N$

$^{230}N = ^{230}N_0 \exp(-\lambda_{230}t)$

$^{234}N = \frac{\lambda_{238}}{\lambda_{234} - \lambda_{238}} ^{238}N_0 (\exp(-\lambda_{238}t) - \exp(-\lambda_{234}t)) + ^{234}N_0 \exp(-\lambda_{234}t)$

$\frac{^{234}A}{^{238}A} = \frac{\lambda_{234}}{\lambda_{238}} \frac{^{234}N}{^{238}N}$

$\frac{^{234}A}{^{238}A} = \frac{\lambda_{234}}{\lambda_{238}} \frac{\lambda_{238}}{\lambda_{234} - \lambda_{238}} ^{238}N_0 (\exp(-\lambda_{238}t) - \exp(-\lambda_{234}t)) + \lambda_{234} ^{234}N_0 \exp(-\lambda_{234}t) - \lambda_{230} ^{230}N_0 \exp(-\lambda_{230}t)$

$= \frac{\lambda_{234}}{\lambda_{234} - \lambda_{238}} [1 - \exp\{-(\lambda_{234} - \lambda_{238})t\}] + \frac{\lambda_{234}}{\lambda_{238}} \exp\{-(\lambda_{234} - \lambda_{238})t\}$

$= [1 - \exp(-\lambda_{234}t)] + \frac{\lambda_{234}}{\lambda_{238}} \exp(-\lambda_{234}t)$

$= 1 + \frac{\lambda_{234}}{\lambda_{238}} - 1 \exp(-\lambda_{234}t)$

²³⁰Th-²³⁴U法

²³⁸N: ²³⁸Uの原子数 λ_{238} : ²³⁸Uの崩壊定数 $\frac{d^{238}N}{dt} = -\lambda_{238}^{238}N$: ²³⁸Uの放射能
²³⁴N: ²³⁴Uの原子数 λ_{234} : ²³⁴Uの崩壊定数
²³⁰N: ²³⁰Thの原子数 λ_{230} : ²³⁰Thの崩壊定数 $\frac{d^{230}N}{dt} = -\lambda_{230}^{230}N$: ²³⁰Thの放射能

$\frac{d^{230}N}{dt} = -\lambda_{230}^{230}N$ $\frac{d^{234}N}{dt} = -\lambda_{234}^{234}N + \lambda_{238}^{238}N$ $\frac{d^{234}A}{dt} = -\lambda_{234}^{234}A + \lambda_{238}^{238}N$ $\frac{d^{230}A}{dt} = -\lambda_{230}^{230}A + \lambda_{234}^{234}N$

$^{230}N = ^{230}N_0 \exp(-\lambda_{230}t)$

$^{234}N = \frac{\lambda_{238}}{\lambda_{234} - \lambda_{238}} ^{238}N_0 (\exp(-\lambda_{238}t) - \exp(-\lambda_{234}t)) + ^{234}N_0 \exp(-\lambda_{234}t)$

$^{230}N = \frac{\lambda_{234}}{\lambda_{230} - \lambda_{234}} ^{234}N_0 (\exp(-\lambda_{234}t) - \exp(-\lambda_{230}t)) + ^{230}N_0 \exp(-\lambda_{230}t)$

$\frac{^{230}A}{^{234}A} = \frac{\lambda_{230}}{\lambda_{234} - \lambda_{230}} [1 - \exp(-\lambda_{230}t)] + \frac{\lambda_{230}}{\lambda_{234} - \lambda_{230}} (-1) [1 - \exp\{-(\lambda_{234} - \lambda_{230})t\}]$

表2.4 放射崩壊系列における放射平衡からのずれを利用した年代測定法

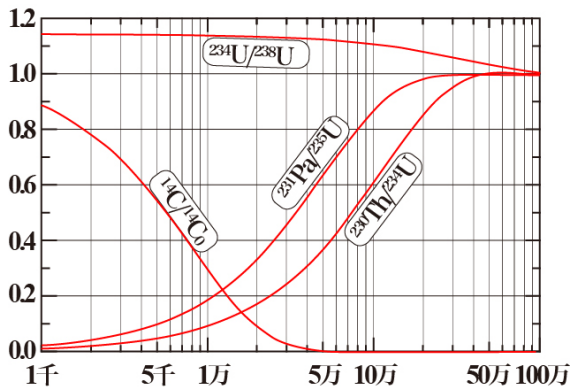
方法	原理	半減期(年)
²³⁰ Th(¹⁰) - ²³⁴ U	²³⁰ Th/ ²³⁴ Uの年代変化を利用	²³⁰ Th: 7.54 x10 ⁴ ²³⁴ U: 2.48 x10 ⁵
²³¹ Pa - ²³⁵ U	²³¹ Pa/ ²³⁵ Uの年代変化を利用	²³¹ Pa: 3.28 x10 ⁴ ²³⁵ U: 7.04 x10 ⁸
²²⁶ Ra - ²³⁸ U	²²⁶ Ra/ ²³⁸ Uの年代変化を利用	²²⁶ Ra: 1.60 x10 ³ ²³⁸ U: 4.47 x10 ⁹
²³⁴ U - ²³⁸ U	²³⁴ U/ ²³⁸ Uの年代変化を利用	
²³⁰ Th(¹⁰)	過剰 ²³⁰ Thの存在を利用	
²³¹ Pa	過剰 ²³¹ Paの存在を利用	
²¹⁰ Pb	過剰 ²¹⁰ Pbの存在を利用	²¹⁰ Pb: 2.23 x10
²³⁰ Th(¹⁰) - ²³² Th	過剰 ²³⁰ Th/ ²³² Thの存在を利用	²³² Th: 1.41 x10 ¹⁰
²³¹ Pa - ²³⁰ Th(¹⁰)	過剰 ²³¹ Pa/過剰 ²³⁰ Thの存在を利用	

これらの方法は、主として大気や海水中などのように平衡状態になりやすい系に多く用いられるが、一部の方法は地下のマグマなどに関連した現象にも用いられている

表2.5 放射線損傷を利用した年代測定法

方法	原理	関連する核種の半減期(年)
FT (フิชジョン・トラック)	²³⁸ Uの自発核分裂の際に生じる飛跡の数が、年代とU含有量の関数であることを利用	²³⁸ Uの自発核分裂反応 (0.8-1) x10 ¹⁶
TL (熱ルミネッセンス)	放射性核種の崩壊の際に放出されるエネルギーにより励起された遊離電子としての捕獲電子数が年代の関数になり、加熱による発光現象を測定に利用	²³⁸ U: 4.47 x10 ⁹ ²³⁵ U: 7.04 x10 ⁸ ²³² Th: 1.41 x10 ¹⁰ ⁴⁰ K: 1.25 x10 ¹⁰ など
ESR (電子スピン共鳴)	放射性核種の崩壊の際の放出されるエネルギーにより生じる不対電子数が年代の関数となり、その量を電子スピン共鳴として測定	TLの場合と同様

*²³⁵Uの自発核分裂反応に関する半減期の値は測定方法などにより系統的な差があり、まだ統一された値は報告されていない。



14C/14C₀, ²³⁴U/²³⁸U, ²³¹Pa/²³⁵U, ²³⁰Th/²³⁴Uの経年変化
(²³⁴U/²³⁸U, ²³¹Pa/²³⁵U, ²³⁰Th/²³⁴Uは放射能比)

各種絶対年代法の適用年代一覧表

