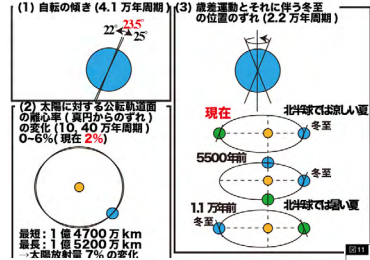


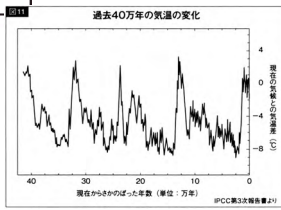




ミランコビッチ周期



- 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



前期更新世と中期更新世の境界 (約77万年前)  
チバニアン候補

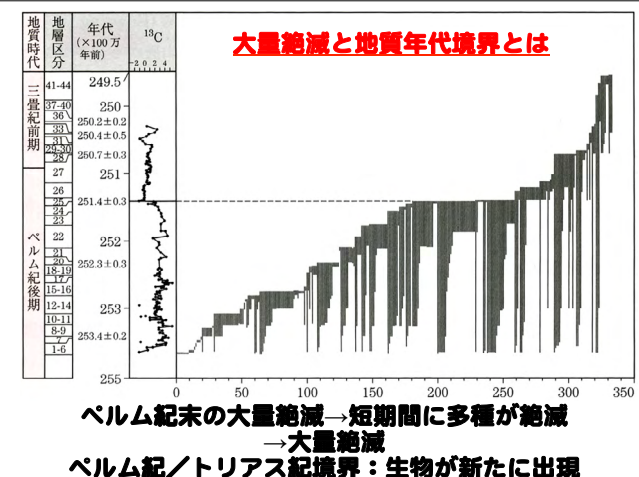
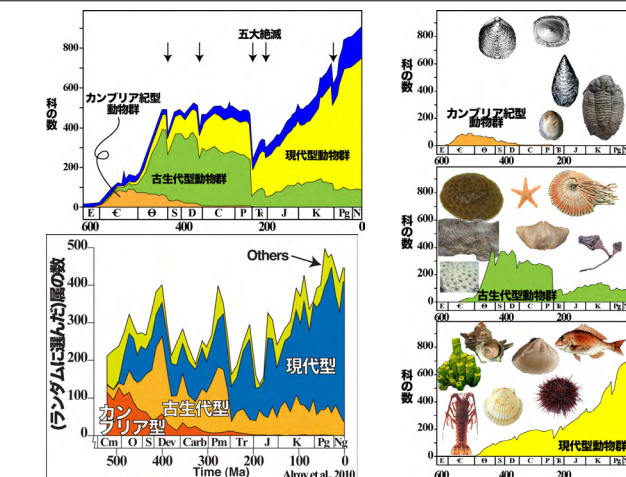
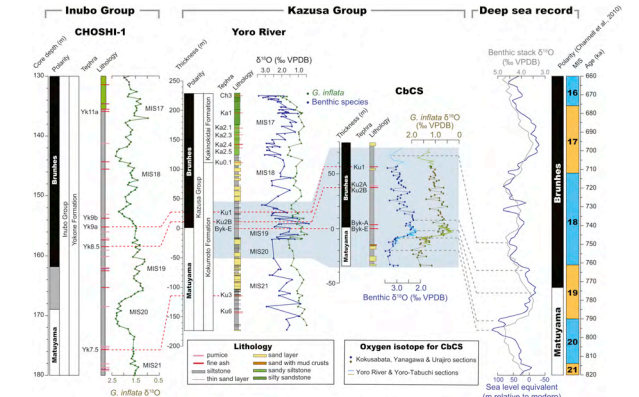


前期更新世と中期更新世の境界 (約77万年前)  
チバニアン候補日本の基準地候補と地質年代

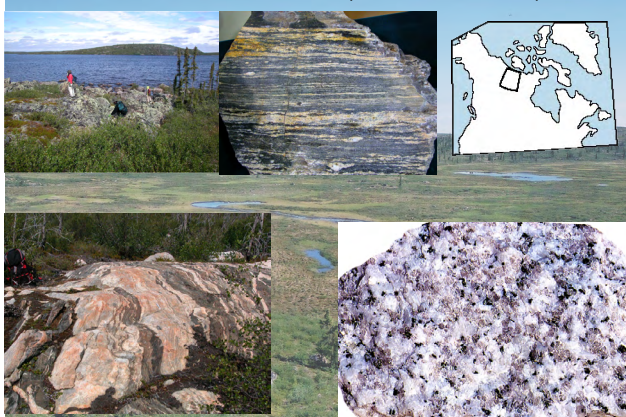
- 古地磁気層序
- 数値年代
- 化学層序
- 化石層序



前期更新世と中期更新世の境界 (約77万年前)  
チバニアン候補



カナダ アカスタ片麻岩(40.3億年前)



初期地球物質(38億年前以前)

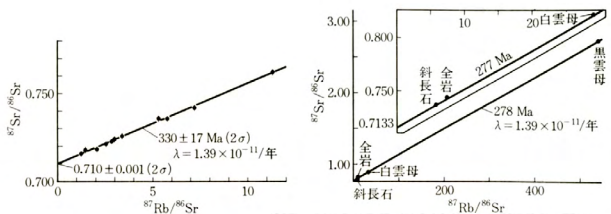








## 放射性核種の親核種と娘核種の比を用いる年代測定



Rb (原子番号37) および Sr (原子番号38) の同位体存在度			
同位体	同位体存在度 (原子比, %)	同位体	同位体存在度 (原子比, %)
<sup>87</sup> Rb	72.17 (2)	<sup>87</sup> Sr	0.56 (1)
<sup>85</sup> Rb	27.83 (2)	<sup>86</sup> Sr	9.86 (1)
		<sup>88</sup> Sr	7.00 (1)*
		<sup>84</sup> Sr	82.88 (1)

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試薬や物質に対するもの。  
 注2) 年代測定の対象となる地質学的試料では、カッポウの数値で示される不確定さよりもさらに大きい変動を示す場合に付けた放射性起源の<sup>87</sup>Seを含む。Srの同位体存在度は試料の年代を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)	壊変形式	半減期(年)
K-Ar (Ar-Ar)	<sup>40</sup> K	<sup>40</sup> Ar	<sup>36</sup> Ar	=295.5	電子捕獲(EC)	1.25 x 10 <sup>9</sup> *
Rb-Sr	<sup>87</sup> Rb	<sup>87</sup> Sr	<sup>86</sup> Sr	( <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr) <sub>0</sub>	β	4.88 x 10 <sup>10</sup>
U-Pb (Pb-Pb)	<sup>238</sup> U	<sup>206</sup> Pb	<sup>204</sup> Pb	( <sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb) <sub>0</sub>	α, β	4.47 x 10 <sup>9</sup>
	<sup>235</sup> U	<sup>207</sup> Pb	<sup>204</sup> Pb	( <sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb) <sub>0</sub>	α, β	7.04 x 10 <sup>8</sup>
Th-Pb	<sup>232</sup> Th	<sup>208</sup> Pb	<sup>204</sup> Pb	( <sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb) <sub>0</sub>	α, β	1.40 x 10 <sup>10</sup>
Sm-Nd	<sup>147</sup> Sm	<sup>143</sup> Nd	<sup>144</sup> Nd	( <sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd) <sub>0</sub>	α	1.06 x 10 <sup>11</sup>
Lu-Hf	<sup>176</sup> Lu	<sup>176</sup> Hf	<sup>177</sup> Hf	( <sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf) <sub>0</sub>	β	3.57 x 10 <sup>10</sup>
La-Ce	<sup>138</sup> La	<sup>138</sup> Ce	<sup>142</sup> Ce	( <sup>138</sup> Ce/ <sup>142</sup> Ce) <sub>0</sub>	β	9.87 x 10 <sup>10</sup> **
La-Ba	<sup>138</sup> La	<sup>138</sup> Ba	<sup>137</sup> Ba	( <sup>138</sup> Ba/ <sup>137</sup> Ba) <sub>0</sub>	電子捕獲(EC)	
Re-Os	<sup>187</sup> Re	<sup>187</sup> Os	<sup>186</sup> Os	( <sup>187</sup> Os/ <sup>186</sup> Os) <sub>0</sub>	β	4.23 x 10 <sup>10</sup>

\*<sup>40</sup>Kとしての半減期。<sup>40</sup>Kは電子捕獲のほかβ壊変して<sup>40</sup>Caを生成するので、<sup>40</sup>K-<sup>40</sup>Ca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<sup>40</sup>Caの存在割合が多いので放射性起源<sup>40</sup>Caとの区別が困難なので、Kに富んだ特殊な試料以外には試みられていない。  
 \*\*<sup>138</sup>Laとしての半減期

### 鉛同位体

U (原子番号92) および Pb (原子番号82) の同位体存在度			
同位体	同位体存在度 (原子比, %)	同位体	同位体存在度 (原子比, %)
<sup>238</sup> U	0.0055 (2)	<sup>204</sup> Pb	1.4 (1)
<sup>235</sup> U	0.7200 (S1)	<sup>206</sup> Pb	24.1 (1)
<sup>232</sup> Th	99.2745 (106)	<sup>207</sup> Pb	22.1 (1)
		<sup>208</sup> Pb	52.4 (1)

(a) <sup>238</sup>U-<sup>206</sup>Pb 法

$$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} + \frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}} [\exp(\lambda_{238}t) - 1]$$

(b) <sup>235</sup>U-<sup>207</sup>Pb 法

$$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} + \frac{^{235}\text{U}}{^{204}\text{Pb}} [\exp(\lambda_{235}t) - 1]$$

(c) <sup>232</sup>Th-<sup>208</sup>Pb 法

$$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} + \frac{^{232}\text{Th}}{^{204}\text{Pb}} [\exp(\lambda_{232}t) - 1]$$

(d) <sup>207</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb 法

$$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} - \frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \frac{1}{[137.88]} \frac{[\exp(\lambda_{238}t) - 1]}{[\exp(\lambda_{235}t) - 1]} \frac{^{238}\text{U}}{^{235}\text{U}} = 137.88$$

### 一致年代、不一致年代

<sup>238</sup>U-<sup>206</sup>Pb 法, <sup>235</sup>U-<sup>207</sup>Pb 法, <sup>207</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb 法, (<sup>232</sup>Th-<sup>208</sup>Pb 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

$$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} + \frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}} [\exp(\lambda_{238}t) - 1] \Rightarrow \frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}} [\exp(\lambda_{238}t) - 1]$$

$$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} + \frac{^{235}\text{U}}{^{204}\text{Pb}} [\exp(\lambda_{235}t) - 1] \Rightarrow \frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \frac{^{235}\text{U}}{^{204}\text{Pb}} [\exp(\lambda_{235}t) - 1]$$

元々 Pb (娘核種) が含まれない時

$$t = \frac{1}{\lambda_{238}} \ln \left( 1 + \frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}} \right)$$

$$t = \frac{1}{\lambda_{235}} \ln \left( 1 + \frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}} \right)$$

$$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}} = \left( \frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}} + 1 \right) \frac{\lambda_{238}}{\lambda_{235}} - 1$$

## 宇宙線生成放射核種を利用する年代測定

<sup>14</sup>C年代測定法 <sup>14</sup>N(n,p)<sup>14</sup>C: <sup>14</sup>Nが中性子(n)を捕獲して、陽子として放出し、<sup>14</sup>Cになる。  
<sup>14</sup>Cは半減期5730年でβ壊変して<sup>14</sup>Nに戻る。

○宇宙線があつたては同位体平衡に達して、<sup>14</sup>Cの濃度は一定。  
 ○宇宙線量は緯度で異なるが大気循環により炭素同位体値は均質。

宇宙線照射による生成  $\frac{dN}{dt} = \lambda N + C$   $\rightarrow C = \lambda N$  (死亡)  $\rightarrow C = 0$  (死亡)  $\rightarrow C = 0$  (死亡)

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) \rightarrow t = \frac{1}{\lambda} \ln \left( 1 + \frac{N_0}{N} \right)$$

○半減期はリビーの5568年を用いる(最近、<sup>14</sup>Cの半減期は改訂され、5730年とされているが、慣例として(過去のデータに混乱を来すので)5568年を使う。  
 ○年代は2000BP(Before Physics)のようにあらわすが、これは現在から2000年前という意味ではなく、1950年から2000年前という意味。戦後の原子爆実験のために<sup>14</sup>C値が異常になってしまった。  
 ○適用範囲: 現在から5~6万年間  
 ○適用試料: 木炭など生物由来有機物、サンゴなど炭酸塩由来、鉄器、地下水、海水の溶存炭素。  
 ○仮定 ①宇宙線量は一定(最近では補正がある:右図) ②生物の死後は<sup>14</sup>Cについて閉鎖系  
 ○生物は炭素の取り込みの際に同位体分別をする

$$\delta^{14}\text{C} (\text{‰}) = \left[ \frac{^{14}\text{C}/^{12}\text{C}}{^{14}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{std}}} - 1 \right] \times 1000$$

$$\Delta^{14}\text{C} (\text{‰}) = \delta^{14}\text{C} - 2(\delta^{13}\text{C}_{\text{org}} + 25) \times \left( 1 + \frac{\delta^{14}\text{C}}{1000} \right) \quad t = \frac{T_{1/2}}{0.693} \ln \left( \frac{1}{1 + \Delta^{14}\text{C}/1000} \right)$$

## 宇宙線生成放射核種を利用する年代測定

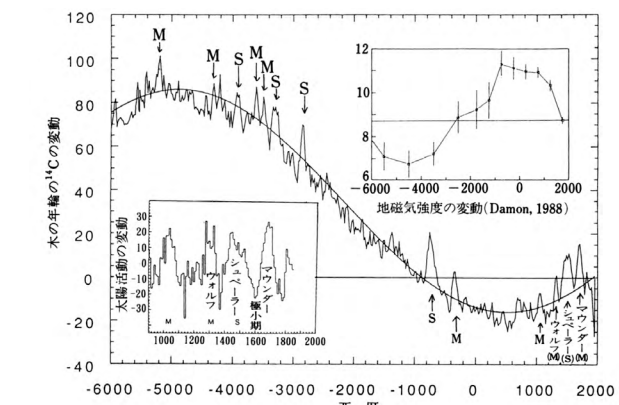
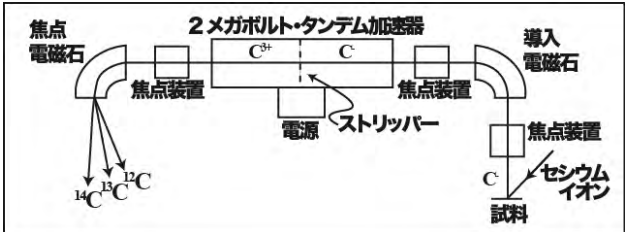
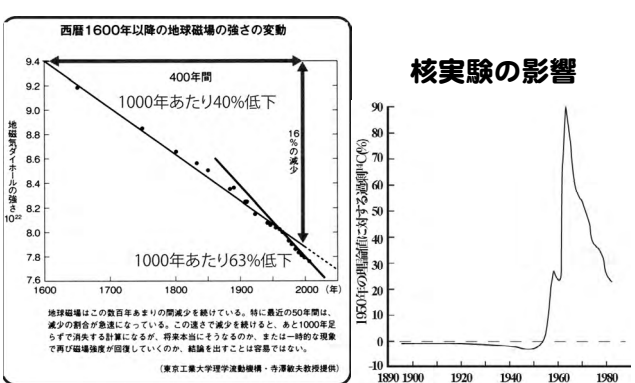
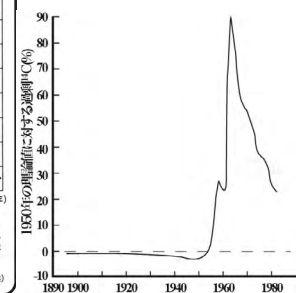


図 14.2 木の年輪の<sup>14</sup>C変化と太陽活動の変動 (Stuiver and Braziunas, 1988)  
 太陽活動の衰退期にはマウンダー・タイプ(M)とシュペーラー・タイプ(S)がある。右下の太陽活動の変動曲線は木の年輪の<sup>14</sup>Cを基に補正を施し求められている。

## 環境(気候)の周期(地球磁場の変動)



### 核実験の影響



(東京工業大学理学部地球環境学専攻 寺澤教授提供)

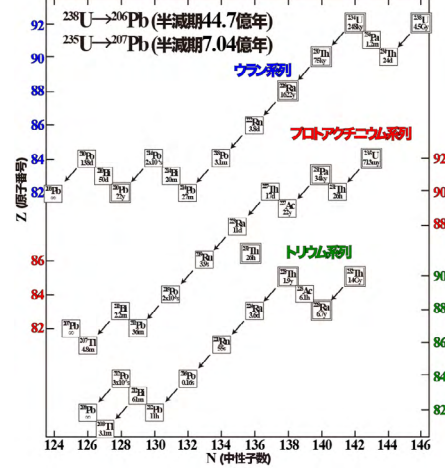
# 宇宙線生成放射核種を利用する年代測定

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

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) <sup>3</sup>H/<sup>2</sup>He, <sup>26</sup>Al/<sup>10</sup>Be, <sup>10</sup>Be/<sup>36</sup>Clなど。

# 放射平衡からのずれを利用した年代測定



**<sup>234</sup>U-<sup>238</sup>U法**

<sup>238</sup>N: <sup>238</sup>Uの原子数    λ<sub>238</sub>: <sup>238</sup>Uの崩壊定数    <sup>238</sup>A = -d<sup>238</sup>N/dt = λ<sub>238<sup>238</sup>N: <sup>238</sup>Uの放射能  
<sup>234</sup>N: <sup>234</sup>Uの原子数    λ<sub>234</sub>: <sup>234</sup>Uの崩壊定数    <sup>234</sup>A = -d<sup>234</sup>N/dt = λ<sub>234</sub><sup>234</sup>N: <sup>234</sup>Uの放射能  
<sup>230</sup>N: <sup>230</sup>Thの原子数    λ<sub>230</sub>: <sup>230</sup>Thの崩壊定数    <sup>230</sup>A = -d<sup>230</sup>N/dt = λ<sub>230</sub><sup>230</sup>N: <sup>230</sup>Thの放射能</sub>

$$\frac{d^{238}N}{dt} = -\lambda_{238}^{238}N$$

$$\frac{d^{234}N}{dt} = \lambda_{234}^{234}N - \lambda_{234}^{234}N$$

$$\frac{d^{230}N}{dt} = \lambda_{230}^{230}N - \lambda_{230}^{230}N$$

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

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

$$\frac{^{234}A}{^{238}A} = \frac{\lambda_{234}^{234}N}{\lambda_{238}^{238}N} = \frac{\lambda_{238}}{\lambda_{234} - \lambda_{238}} (1 - \exp(-(\lambda_{234} - \lambda_{238})t)) + \frac{^{234}A_0}{^{238}A_0} \exp(-\lambda_{234}t)$$

$$\frac{^{234}A}{^{238}A} = \frac{\lambda_{234}^{234}N}{\lambda_{238}^{238}N} = \frac{\lambda_{238}}{\lambda_{234} - \lambda_{238}} (1 - \exp(-(\lambda_{234} - \lambda_{238})t)) + \frac{^{234}A_0}{^{238}A_0} \exp(-\lambda_{234}t)$$

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

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

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

**<sup>230</sup>Th-<sup>234</sup>U法**

<sup>238</sup>N: <sup>238</sup>Uの原子数    λ<sub>238</sub>: <sup>238</sup>Uの崩壊定数    <sup>238</sup>A = -d<sup>238</sup>N/dt = λ<sub>238</sub><sup>238</sup>N: <sup>238</sup>Uの放射能  
<sup>234</sup>N: <sup>234</sup>Uの原子数    λ<sub>234</sub>: <sup>234</sup>Uの崩壊定数    <sup>234</sup>A = -d<sup>234</sup>N/dt = λ<sub>234</sub><sup>234</sup>N: <sup>234</sup>Uの放射能  
<sup>230</sup>N: <sup>230</sup>Thの原子数    λ<sub>230</sub>: <sup>230</sup>Thの崩壊定数    <sup>230</sup>A = -d<sup>230</sup>N/dt = λ<sub>230</sub><sup>230</sup>N: <sup>230</sup>Thの放射能

$$\frac{d^{238}N}{dt} = -\lambda_{238}^{238}N$$

$$\frac{d^{234}N}{dt} = \lambda_{234}^{234}N - \lambda_{234}^{234}N$$

$$\frac{d^{230}N}{dt} = \lambda_{230}^{230}N - \lambda_{230}^{230}N$$

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

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

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

$$\frac{^{230}A}{^{234}A} = \frac{\lambda_{230}^{230}N}{\lambda_{234}^{234}N} = \frac{\lambda_{234}}{\lambda_{230} - \lambda_{234}} (1 - \exp(-(\lambda_{230} - \lambda_{234})t)) + \frac{^{230}A_0}{^{234}A_0} \exp(-\lambda_{230}t)$$

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

表2.4 放射線変遷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

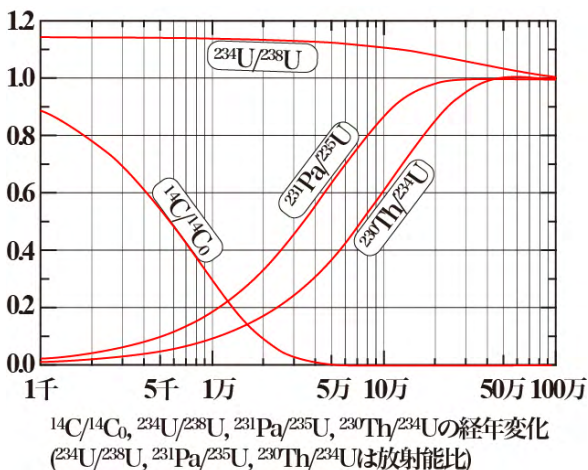
方法	原理	半減期(年)
<sup>230</sup> Th(Io) - <sup>234</sup> U	<sup>230</sup> Th/ <sup>234</sup> Uの年代変化を利用	<sup>230</sup> Th: 7.54 x 10 <sup>4</sup> <sup>234</sup> U: 2.48 x 10 <sup>5</sup>
<sup>231</sup> Pa - <sup>235</sup> U	<sup>231</sup> Pa/ <sup>235</sup> Uの年代変化を利用	<sup>231</sup> Pa: 3.28 x 10 <sup>4</sup>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

これらの方法は、主として大気や海水中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)	<sup>238</sup> 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	<sup>238</sup> Uの自発核分裂反応 (0.8-1) x 10 <sup>16</sup>
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	<sup>238</sup> U: 4.47 x 10 <sup>9</sup> <sup>235</sup> U: 7.04 x 10 <sup>8</sup> <sup>232</sup> Th: 1.41 x 10 <sup>10</sup> <sup>40</sup> K: 1.25 x 10 <sup>9</sup> 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

<sup>238</sup>U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。



各種絶対年代法の適用年代一覧表

