

いん石の宇宙線照射時代

島 正 子*

1. はじめに

宇宙空間には宇宙線とよばれる高エネルギー粒子がとびかっていることはよく知られている。いん石が生まれてから地球上に落下するまで宇宙に存在していたものであれば、いん石には宇宙線の何らかの痕跡が残っているはずである。このいん石に印された宇宙線の軌跡について、およびそれからわかることの概要については、本月報の第72巻2月号に記した。宇宙線といん石およびこの間の相互作用など重複する部分は前回の記事を参照して頂くことにして、今回は宇宙線によりいん石を構成する元素の原子核が破壊されてきた新しい原子核を用いた年代測定法およびそれから推定されていることについて述べる。

2. いん石で測定される年代

物にはそれぞれ歴史があるようにいん石も過去にいろいろな歴史をもちそれを化石のようにいん石の中にきざみこんでいる。すなわち、いん石をしらべると、1. いん石を構成している元素ができてからいん石の母体ができるまでにはどの位時間がかかったか、2. いん石母体できてから現在みられるような種々のいん石ができるまでにどの位時間がかかったか、3. いん石は何年前にできたか、4. いん石が現在みられるような大きさ、形になったのはいつごろか、5. 落下が目撃されていないいん石では、地球上におちたのはいつか、6. 鉄いん石はどの位の速度で冷えたか、7. 石質いん石のそれぞれの種類では冷却速度は、鉱物の生成は、どのようにして行われたか、など推定できるのである。ここに列挙したもののうち、5番までは、核反応によって生成した主として放射性核種の壊変を利用して年代を求める方法を使っている。3番目はいわゆる固化年代といわれるもので、すでに本月報の第73巻6号で解説した。4番目の項目は宇宙線照射年代とよばれるもので、今回はこれについて解説する。

3. いん石と宇宙線

地球もいん石と同じように宇宙空間に存在しているのに地球上の石では宇宙線による核破砕反応生成物がほとんど検出されないのどうしていん石では検出されるの

であろうか。地球は大気でおおわれている。高エネルギー宇宙線は 100 g/cm^2 の物質の層を通過すると強さが $1/2$ になる。大気の層は約 1000 g/cm^2 あるので、宇宙線が地表に達した時はその強さは約 $1/1000$ になっており、大部分の粒子はもはや核破砕反応をおこすだけのエネルギーをもっていない。この関係をいん石のような物体にあてはめて考えてみよう。宇宙線のエネルギーの強さは、その表面近くでは急激に減少するが、表面から遠くなるに従ってその減少の仕方が少くなり、ついにはある一定の値に近づく。核破砕反応は約 10 MeV 以下のエネルギーをもつ粒子ではおこすことができない。高エネルギー宇宙線は図1に示すようなエネルギー分布をもっており平均エネルギーは粒子あたり $3\sim 4 \text{ GeV}^{**}$ である。したがって大気の厚さに相当する物質量を宇宙線が通過すると、核破砕反応をおこす程度のエネルギーをもっている粒子がほとんど存在しないことになる。すなわち、大きないん石、あるいはいん石の母体の中心部では宇宙線の影響をほとんどうけていないことになる。この大きさは鉄いん石では約 70 t 、石質いん石では約 350 t に相当する。地球上に落下又は発見された鉄いん石ではこの大きさのものはない。地球にはいる直前までこれより大きかったであろうと考えられる2、3の鉄いん石では宇宙線による核破砕反応生成物を検出することができないものがある。これに反し、石質いん石では、落下が目撃されたもの、および発見されたもの全部を集めても、上記の $1/10$ の重さにもならない。このように石質いん石は小さいので、1個の石質いん石ではどの部分をとっても宇宙線生成核種が検出され、最近までこれらの検出された核種***のものといん石中の場所など問題にしないまでもよい程であった。

鉄いん石は主成分が鉄とニッケルの合金で、一般に硫化物、りん化合物などは包含物としてかたまっている

** $\text{GeV} = 10^9 \text{ eV}$. 紙、木、石炭、石油などがもえたりする化学反応のエネルギーは数～数 10 eV 、原子爆弾のものである核分裂反応で放出される全エネルギーはウラン1原子あたり 200 MeV である ($\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$).

*** 化学元素は原子番号(原子核中の陽子の数)が同じものごとにとりまとめるので質量数(原子核中の陽子と中性子の数の和)の異なるものがある。これらを1つずつ区別する時、核種(nuclide)という名前を用いる。たとえばカリウムは元素名であるが ^{40}K は核種をあらわす。

* 国立科学博物館 Masako Shima: The Cosmic-ray-exposure Age of Meteorites.

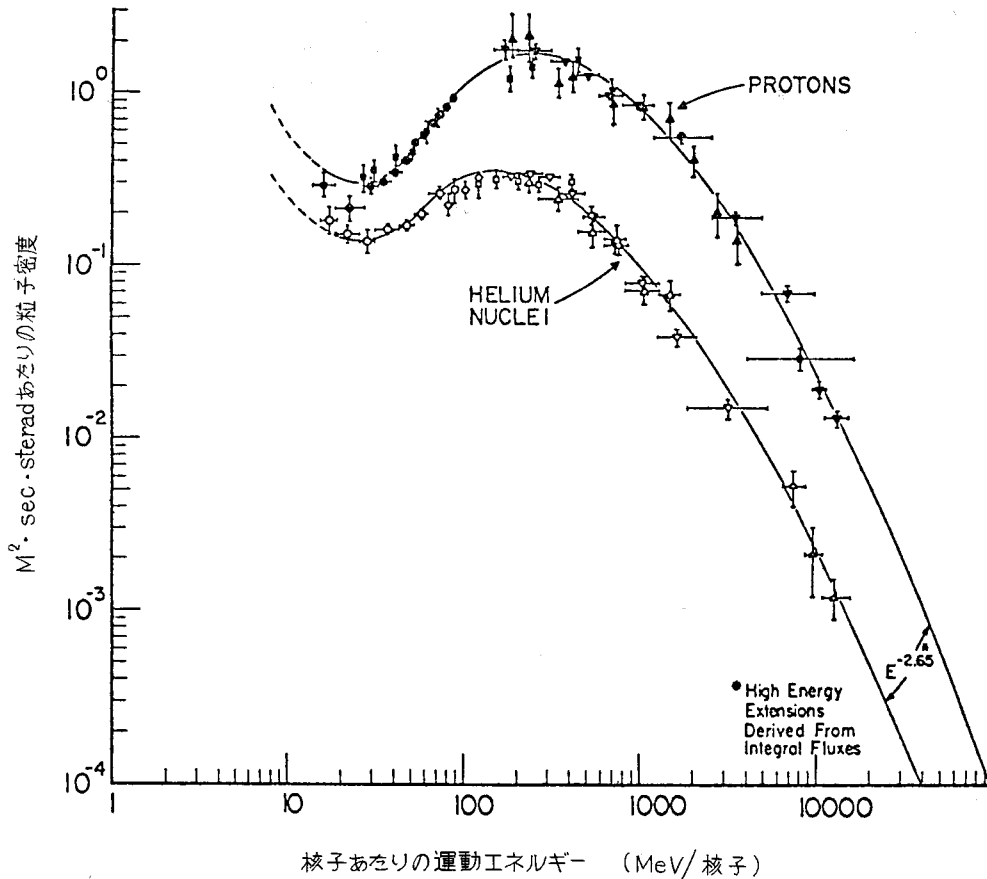


図1 高エネルギー一次宇宙線のエネルギー分布. グレックラー (Gloeckler) ら (1967) による.

表1 鉄いん石“玖珂”鉄相の化学組成 (島: 未発表)

(%)	10 ⁻⁶ g/g					
Fe 85.8	Cu 120	Ge 26.5	Ru 1.2	Sb 0.2	Ir 0.05	
Ni 9.7	Cr 1.3	As 3.7	Pd 3.8	W 0.4	Pt 7.5	
Co 0.59	Ga 16.5	Mo 8.3	Ag 0.005	Os 0.2	Au 2.4	

おり、純粋な鉄・ニッケル合金相をとると、表1にその一例を示すように鉄とニッケル以外の元素は桁ちがいに少量しか含まれていないことがわかる。これに反し、石質いん石は、石質いん石中の球粒いん石の分析値から表2に示すような太陽系の元素の存在度を求めていることからわかるように、ほとんどすべての元素を太陽系における元素の存在度と同じような割合で含んでいる。このことは宇宙線の標的物質として考え、得られた結果を解釈する時に、石質いん石は鉄いん石のように簡単ではないということを示す。また測定される核種も、測定値も当然異ってくる筈である。このことから宇宙線照射年代について、鉄の場合と石の場合とわけて考えることにする。

宇宙線を構成している粒子も水素の原子核のみではない。表2には、宇宙線中に存在する元素(高エネルギーをもっている場合には外殻電子を失い原子核のみになっている)の存在度も、比較のために、太陽系における元素存在度と同じ物差、 $Si=10^6$ に対する比の形、で示した。この表から宇宙線の中ではむしろ水素やヘリウムのような軽い元素が少なく、原子番号 85 以上の重元素が多いことがわかる。これは宇宙線の起源とも関連する重要な問題であるがここでは指摘するだけにとどめる。

宇宙線中の各粒子のもつエネルギーは図1に示すようにそれぞれの原子核により多少異なる。しかし、表2からも明らかのように2番目に多く存在しているヘリウムの原子核すら水素の原子核、プロトン、の1/10以下であるので、宇宙線照射年代を考える時には、まずいん石構成原子核種と高エネルギープロトンとの反応を考え、必要に応じて他の粒子との反応を加えてゆけばよい。

4. 鉄いん石の宇宙線照射年代

鉄いん石の鉄・ニッケル合金相から抽出した宇宙線生成物の測定結果を解析するのは、前にものべたように、

表 2 太陽系における元素存在度 (Si=10⁶)

元 素	いん石より太陽系 Cameron (1973)	太陽大気*	宇 宙 線 Daniel ら (1975)	元 素	いん石より太陽系 Cameron (1973)	太陽大気*	宇 宙 線 Daniel ら (1975)
1 H	3.18×10 ¹⁰	3.18×10 ¹⁰	2.5×10 ⁹	47 Ag	0.45	0.22	} 5 ±1.5
2 He	2.21×10 ⁹	(2.3 ×10 ⁹)	1.3×10 ⁸	48 Cd	1.48	4.0	
3 Li	49.5	0.16		49 In	0.189	1.6	
4 Be	0.81	0.40		50 Sn	3.6	1.6	
5 B	350	<20		51 Sb	0.316	2.8	
6 C	1.18×10 ⁷	1.33×10 ⁷	5.0×10 ⁶	52 Te	6.42		
7 N	3.74×10 ⁶	2.7 ×10 ⁶	5.5×10 ⁵	53 I	1.09		
8 O	2.15×10 ⁷	2.2 ×10 ⁶	5.4×10 ⁶	54 Xe	5.38		
9 F	2450			55 Cs	0.387		
10 Ne	3.44×10 ⁶	(3.56×10 ⁶)	8 ×10 ⁵	56 Ba	4.8	2.5	
11 Na	6.0 ×10 ⁴	6.3 ×10 ⁴	4 ×10 ⁴	57 La	0.445	2.0	
12 Mg	1.06×10 ⁶	9.59×10 ⁵	1.2×10 ⁶	58 Ce	1.18	2.5	
13 Al	8.5 ×10 ⁴	8.0 ×10 ⁴	1.0×10 ⁵	59 Pr	0.149	1.3	
14 Si	1.00×10 ⁶	1.0 ×10 ⁶	1.0×10 ⁶	60 Nd	0.78	2.0	
15 P	9600	8500		61 Pm			
16 S	5.0 ×10 ⁵	5.0 ×10 ⁵	1.5×10 ⁵	62 Sm	0.226	1.6	
17 Cl	5700	≦1.0 ×10 ⁴		63 Eu	0.085	0.10	
18 Ar	1.17×10 ⁵		4 ×10 ⁴	64 Gd	0.297	0.40	
19 K	4200	3560		65 Tb	0.055		
20 Ca	7.21×10 ⁴	7.27×10 ⁴	1.1×10 ⁵	66 Dy	0.36	0.40	
21 Sc	35	35		67 Ho	0.079		
22 Ti	2775	1520		68 Er	0.225		
23 V	262	159		69 Tm	0.034	0.080	
24 Cr	1.27×10 ⁴	2.25×10 ⁴	1.5×10 ⁴	70 Yb	0.216	0.20	
25 Mn	9300	8350		71 Lu	0.036		
26 Fe	8.3 ×10 ⁵	1.00×10 ⁶	1.1×10 ⁶	72 Hf	0.21		
27 Co	2210	1390		73 Ta	0.021		
28 Ni	4.80×10 ⁴	6.05×10 ⁴	4 ×10 ⁴	74 W	0.16		
29 Cu	540	459	} 3050	75 Re	0.053		
30 Zn	1244	835		76 Os	0.75		
31 Ga	48	20.0		77 Ir	0.717		
32 Ge	115	63.3		78 Pt	1.4		
33 As	6.6			79 Au	0.202	0.16	
34 Se	67.2			80 Hg	0.4	<4.0	
35 Br	13.5			81 Tl	0.192	≦0.05	
36 Kr	46.8			82 Pb	4	2.5	
37 Rb	5.88	12.6		} 50±20	83 Bi	0.143	≦0.20
38 Sr	26.9	20.0			84 Po		
39 Y	4.8	5.6	85 At				
40 Zr	28	5.4	86 Rn				
41 Nb	1.4	2.8	87 Fr				
42 Mo	4.0	2.5	88 Ra				
43 Tc			89 Ac				
44 Ru	1.9	0.85	90 Th		0.058	0.20	
45 Rh	0.4	0.19	91 Pa				
46 Pd	1.3	0.51	92 U		0.0262	≦0.13	

* 太陽大気中の元素存在度は、フラウンホーファー線より求められた値で多くの人々のデータを用いた、H=10¹²
→ Si=10⁶ にするための係数は 0.03175 である。

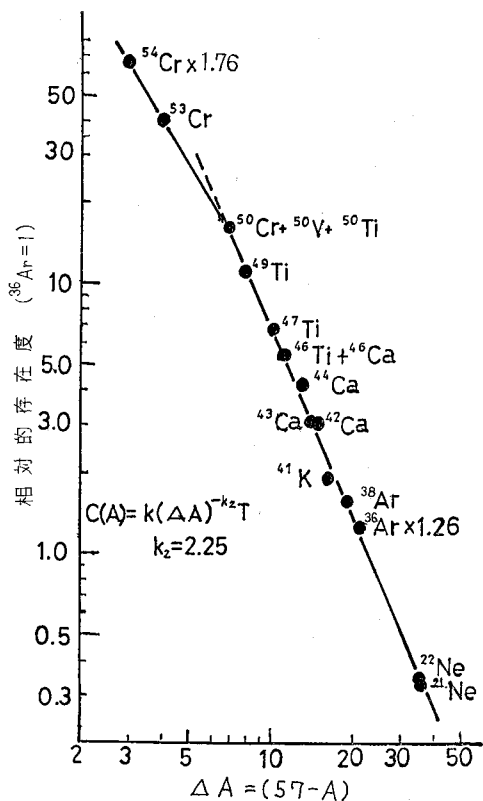


図2 鉄いん石グラントより抽出した宇宙線生成安定核種の存在比。⁸⁶Arを標準にしてあらわしてある。島，今村，本田による。

これらの生成物がほとんど鉄の主要核種である ⁵⁶Fe の原子核がこわれてできたものと考えられることができるので、比較的簡単である。これに補正值として鉄の他の核種およびニッケルの各核種からの値を加味すればよい。原則的に鉄以下のすべての元素の同位体ができてはいるはずである。その中には寿命の非常に短いものも長いものもある。それらがお互いどのような割合でできているかは、同じ重さをもつ同重体元素（同位元素ではない。元素種は異なる）ごとにまとめ、標的核種からの質量数の差との関数としてとると図2に示すようになる。これはガイス (Geiss) らおよびスタウファー (Stauffer) と本田がいん石から求めた宇宙線生成放射性核種の値をもとにして作った次の実験式を与える。

$$\left. \begin{aligned} Q(A) &= k(\Delta A)^{-k_2} \\ C(A) &= k' T (\Delta A)^{-k_2} = k T (\Delta A)^{-k_2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで $Q(A)$, $C(A)$ はそれぞれ質量数 A における全同重体の全生成速度および生成量の和である。 ΔA は標的核種と生成核種の質量数の差、定数 k は照射粒子の強度に比例し、 k_2 はいん石の大きさ、測定された生成核はいん石中の場所による値である。また同重体相互間の

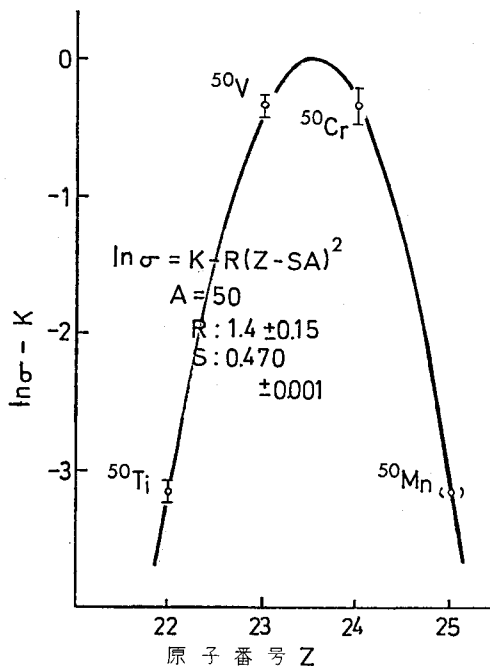


図3 鉄いん石グラントより抽出した質量数 50 の宇宙線生成安定核種の存在比。島，今村，本田より。

表3 鉄いん石中で測定され得る放射性核種

放射性核種	半減期
³ H	12.33 年
²² Na	2.601 年
³⁶ Cl	3.01 × 10 ⁵ 年
⁴¹ Ca	1.3 × 10 ⁵ 年
⁴⁵ Ca	163 日
⁴⁴ Ti	47 年
⁴⁶ Sc	83.8 日
⁴⁸ V	15.98 日
⁴⁹ V	331 日
⁵³ Mn	3.8 × 10 ⁶ 年
⁵⁴ Mn	312.5 日

関係もラドスタム (Rudstam) により、実験室における単一エネルギーで行った実験から (2) 式のような実験式が求められており、鉄いん石グラントの質量数 50 の 3 個の同重体から図3のようにしていん石固有のパラメーターを求めることができ、そのパラメーターはモデル実験からの値によく合っている。

実際に鉄いん石から抽出、測定されている宇宙線生成放射性核種としては表3に示すような核種があげられ

る。これら放射性核種のうちで ^{60}Co , ^{59}Ni のような標的核の質量数に近い核種は比較的エネルギーが低い2次宇宙線による (n, γ) 反応で生成したもので、他の核種と異なり、いん石の一番外側、あるいは大きな鉄いん石の内部に生成する。

これらの放射性核種の寿命は ^{40}K 以外は鉄いん石が宇宙線照射を受けていた年代にくらべると短かい。したがってその生成速度はそれぞれの核種の壊変速度に等しいと考えることができるので、宇宙線照射年代は (1) 式から簡単に

$$T = C(A)/Q(A) = (S_z/A_z^r)(\gamma_r/\gamma_s) \quad (3)$$

求められる。(3) 式で S_z はいん石から求められた安定核種の量, A_z^r は放射性核種の壊変速度 (いん石から求められた S_z の放射性同重体の放射能強度), γ_r と γ_s はそれぞれ A_z^r と S_z の全同重体にしめる割合で (2) 式から図3より求めたパラメーターを使って求めることができる。結果の一例はすでに昨年2月号に示した。様々な半減期の放射性核種を用いて宇宙線照射年代を求めると、その数字からいん石をとりまく宇宙環境の推移、いん石自体の形の変化が推定できるので理想的である。すなわち種々の半減期核種とそれらの対から求めた年代が誤差の範囲内で一致していれば、そのいん石が宇宙線の照射をうける大きさになってから、宇宙線の強さもいん石の大きさや形も測定誤差の範囲内でかわらなかつたということになる。短半減期核種から得られる値は最近の宇宙線強度、いん石の大きさや形をあらわし、長半減期核種からの値は、過去のすべての事件を含んだ平均値をあらわすからである。

実際には、短半減期核種を測定するためには、いん石が落下したものをすぐ手にいれること、多くの核種を同一試料から系統的に抽出し測定するためには、十分な試料の量他に、技術的にそれだけのことができる研究者が、それだけの実験をする設備の整った研究室にないなければならないという条件が必要である。また安定核種も鉄より質量数の低い元素というとカリウム、カルシウム、チタン、クロムというような地球上のどこにでも多量に存在している元素が主になる。鉄いん石 1g 中に約 10^{-9} g 位しか生成していないそれぞれの核種を地球上の物質で汚染されることなく抽出するのは非常にむずかしい。又、最大限1日に1つの元素、実際には一週間に1個か2個の元素しか分析できないために、この方法により宇宙線照射年代を求めるのが最もよいとわかっていても、求めた例は前報の表に示したヤルドムリいん石1例があるにすぎない。ところが安定核種のうちでもヘリウム、ネオン、アルゴンのような希ガスとカリウムはいん石を超真空中で高温で焼き出すことによって地球上の物質にほとんど汚染されることなく抽出することができるの

で、鉄いん石の宇宙線照射年代は、これらの希ガス又はカリウムのデータと上記放射性核種のデータを組合わせて求められてきた。

(1) 式からわかるように、核破碎反応生成物の生成速度又は生成量は照射粒子の強度と標的核からの質量数の差に大きく依存する。したがって宇宙線照射年代を求めるための放射性核種と安定核種の対は、同重体であるのが理想であり、もしそれが不可能な場合にはなるべく質量数の近いものを用いるのがよい。これまでよく用いられてきた対としては、 $^3\text{H}-^3\text{He}$, $^{36}\text{Cl}-^{36}\text{Ar}$ (以上同重体) $^{39}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$, $^{40}\text{K}-^{41}\text{K}$ (以上同位体) などがあげられる。このうち $^3\text{H}-^3\text{He}$ で求めた年代はいん石により ^3H を失っているものがあって異常に高い値を与えるものがあつた。 $^{40}\text{K}-^{41}\text{K}$ の対はどちらも常温で気体でないで鉄いん石から失われることが少い、フォスハーゲ (Voshage) が1人で着実に10年以上の長期間にわたって測定を続けて70以上の鉄いん石の照射年代を求め、さらにその後、自ら同じ鉄いん石中の希ガスも測定してデータをより確実なものとしてきたので、現在では鉄いん石の宇宙線照射年代として最も信頼のおける値と信じられている。フォスハーゲが1979年に自らのデータをワッソン (Wasson) の鉄いん石の分類法に従ってまとめた図を

鉄いん石の種類

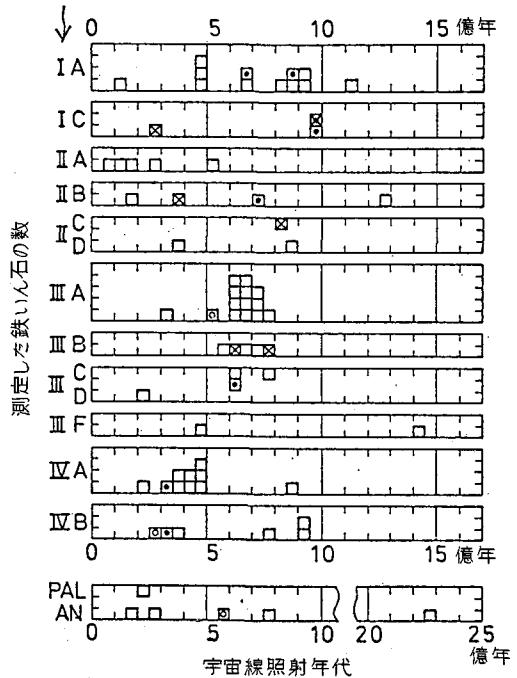


図4 $^{41}\text{K}/^{40}\text{K}-^4\text{He}/^{21}\text{Ne}$ 法により求めた鉄いん石の宇宙線照射年代の分布図。鉄いん石の分類はワッソン (Wasson) による。フォスハーゲ (Voshage) (1979) より。

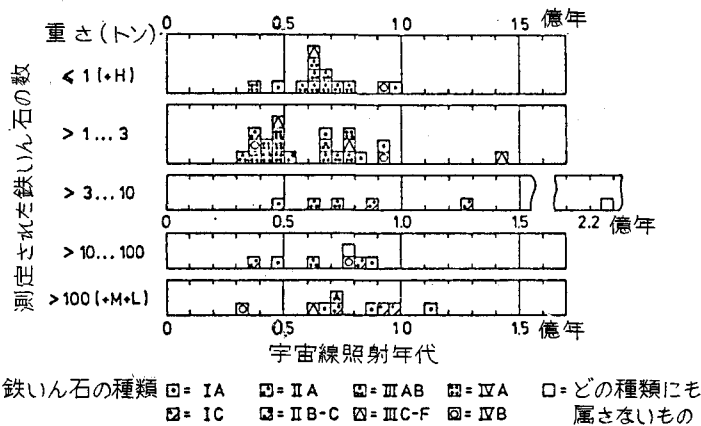


図5 $^{41}\text{K}/^{40}\text{K}-^4\text{He}/^{21}\text{Ne}$ 法により求めた鉄いん石の宇宙線照射年代の宇宙空間で予想される大きさに対する分布図。フォスハーグ (Voshage) (1979) による。

4に、鉄いん石が宇宙空間でもっていたと考えられる大きさによってまとめた図を図5に示す。

宇宙線照射年代を求めるためには(1)式から同重体の対をとるのがよいとわかったが、その逆に、質量数の非常に異なるもの、たとえば $^{58}\text{Mn}-^{21}\text{Ne}$ のような組合せをとって同重体から求めた値とくらべると、測定した試料が宇宙空間にあった鉄いん石のどの部分にあったかを推定できる。現在手許にある鉄いん石のどの部分から試料をとったかは既知であるから、これから、宇宙空間にあったいん石の大きさも求めることが可能である。実際には、 ^{58}Mn のデータはまだ少ないので ^{58}Mn の代わりに、 ^4He と ^{21}Ne の比を用いている。これは鉄いん石では ^{21}Ne は非常に高エネルギーの粒子でしか生成しないが、 ^4He は他の原子核ができた時とび出しやすいので高エネルギー粒子だけでなく、低いエネルギーの粒子からも比較的簡単に生成するからである。

図4から、IIIABに属する鉄いん石は宇宙線照射年代が6.5億年前後のものが多く、IVAに属するものは4.5億年前後のものが多くといえそうであるが他の種類のもはどちらかというといく億年から10億年位の間に一様にちらばっているようであり、10億年以上のものは少ない。これに対する説明としては、これらの鉄いん石の他の性質と組合わせて、IIIABおよびIVAに属する鉄いん石はもともとそれぞれ1つの母体の中であって、1回の大事件でこわれたものであろうとか、IAなど種々の宇宙線照射年代をもっているものは、それぞれのグループでは母体は1つであったが何回かにわたって表面からこわされていったのではなからうか、たとえばIIAとIIBの母体は1つだったが、まずIIBの部分がこわされて母体からはなれ、より内部にあったIIAの部分があとから表面の部分にでてきたりこわれたりしたのではないか、など種々の推定が行われている。しかしこれらはまだ推定の域を出ていないし全く異った意見もないとはいえない。

5. 石質いん石の宇宙線照射年代

石質いん石は前にものべたように種々の元素の集合体であり、鉄は多いものでせいぜい20%程度しか含まれておらず、宇宙線の標的核となる重元素としては、珪素、マグネシウムがあげられる。核破砕反応による生成量は、図2から明らかなように標的核に近い質量数をもつ核種が圧倒的に多いので、たとえば、アルゴン同位体に対してはカルシウム、カリウムの寄与を無視することはできないし、ネオン同位体に対しては、珪素、マグネシウムからの生成量が断然多いがアルミニウムの寄与も無視できない。このように、標的核が複雑である上に、いん石自体が適量のすべての元素から構成されているので、宇宙線で生成したカリウムやカルシウムのような普通の元素はもともといん石中に存在する元素にかくされてしまって検出することができない。たとえばチタンなどのように鉄の中にはあまり存在しない元素ならば球粒いん石の鉄の粒だけ拾いだせば宇宙線で生成した成分を検出できそうであるが、いん石1g中 10^{-10} gが0.1%以上をしめるような量とすると 10^{-7} g以下のチタン量におさえねばならず、石の中からより出した鉄ではこれはちょっと無理である。このような理由で、石質いん石中に宇宙線で生成した普通の元素の測定は、鉄の粒の中から ^{50}V 、 ^{40}K を測定したにとどまる。その結果の一例は昨年2月号に掲載したのでここでは省略する。

石質いん石中で検出されてきた宇宙線生成核種は、放射性核種とヘリウム、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノンなどの希ガスが主役をしめる。このうち、クリプトン、キセノンは標的核核種の量も少ないし、他に多くの話題を内蔵しているので、これは他の解説にゆずり、ここでは主としてヘリウム、ネオン、アルゴンについて、またこの中でも宇宙線生成量が正確に求められ、しかも石質いん石の中から抽出されたという特殊性を十分に持っているネオン同位体を中心のべる。

たとえば石質いん石からネオンを抽出して測定したとする。ネオンには ^{20}Ne , ^{21}Ne , ^{22}Ne の安定同位体がある。測定されたものは、そのいん石ができた時にすでにいん石中に存在していたもの(初生希ガス)と宇宙線で生成したものとがいん石が落下してから測定されるまでに混入した地球上のネオンの混合物である。これら三種類のネオンはそれぞれ同位体の比率が異なるので区別することができる。地球上のものと同位体の比率は似たような比率で ^{20}Ne が最も多く、ネオン全体の 90% をしめ ^{21}Ne が最も少く、地球上のネオンでは 0.3% 以下、初生のもでも 0.5% 程度である。これに反し、宇宙線で生成したものは、3つの同位体が大体同じ程度含まれている。しかも、大部分のいん石は生成する時高温の過程を通過していると考えられているので、通常大部分の初生希ガスはこの段階でなくなっており、特殊ないん石を除けば、初生希ガスの寄与は考えなくてよい。地球上の希ガスの混入も大気中にネオンはごく少量(0.002% 以下)しか含まれていないので、多くの場合測定した ^{21}Ne の値をそのまま宇宙線で生成した成分として用いることができる。 ^{20}Ne の測定値を用いて初生および大気成分のネオンを差引くと宇宙線で生成した ^{22}Ne もかなり正確に求めることができる。ヘリウムの場合は ^3He と ^4He と2つの同位体をもっているが、 ^4He の大部分はウランやトリウムが壊変する時にできた α 粒子であり、空気中のヘリウムは地球ができてから放出された α 粒子の集団である。これに反し、宇宙線では ^3He と ^4He は 0.25:1 位の割合でできるので、いん石から抽出された ^3He はすべて宇宙線で生成したものと考えることができる。

さてこのようにして測定した宇宙線生成ネオンはいん石中のどの核種がこわれてできたものだろうか。またそれらからネオンが宇宙線で生成する速度はどの位なのだろうか。ネオンより質量数の大きいすべての原子核は標的核であったと考えられる。標的核をつきとめようという試みは 1960 年代のはじめにヴェンケ(Wänke)やヒンテンバーガー(Hintenberger)というドイツのグループが、いん石を各鉱物毎に分別溶解してそれぞれの成分から抽出した希ガスを測定し、成分も化学分析してつきとめた。最近またそれがむしかえされ、実験的に、半理論的に 2, 3 の結果が出されている。1976 年にクレッシイ(Cressy Jr.)とボガード(Bogard)が出した結果によれば、

$$P(^{21}\text{Ne}) = 0.0248[\text{Mg}] + 0.00467[\text{Si}] + 0.0033[\text{S}] \\ + 0.00093[\text{Ca}] + 0.000239[\text{FeNi}] \quad (4)$$

$$P(^{38}\text{Ar}) = 0.143[\text{K}] + 0.0203[\text{Ca}] + 0.0045[\text{TiCrMn}] \\ + 0.00118[\text{FeNi}] \quad (5)$$

$$P(^3\text{He}) = 0.0174[\text{TiCrMnFeNi}] \\ + 0.0266(100 - [\text{TiCrMnFeNi}]) \quad (6)$$

ということであり、ネオンに対してはマグネシウム、珪素、いおう、カルシウム、鉄・ニッケルが寄与しており、このうちでもマグネシウムと珪素の寄与が顕著である。このように標的核が多いと生成速度を理論的に、又は半実験的に求めるのは大変むずかしい。したがって、鉄いん石の場合のように質量数が近い放射性核種を用い、(1)(2)(3)式を使って宇宙線照射年代を出すのはそう簡単ではない。また放射性核種も比較的測定しやすい ^{26}Al 以外は希ガスのデータに比べ測定値が極めて少い。一方、たとえば、これまで測定された ^3H や ^{26}Al のような放射性核種の放射能強度は、球粒いん石では、どのいん石を測定してもほとんど同じ値($\pm 15\%$ 以内)になる。このことから、これら石質いん石が宇宙空間で、どれもほとんど同じように宇宙線の洗礼をうけてきたと考え、各核種毎に一定の生成定数というものを与えて、膨大な石質いん石の希ガスのデータから宇宙線照射年代を求めることが行われてきた。これらの生成定数としては、1958年にシェーファー(Schaeffer)とツェーリンガー(Zähringer)が鉄を高エネルギープロトンで叩いて生成した ^3H と ^3He を測定しその値から球粒いん石中に宇宙線で生成される ^3He の生成定数は $2.00 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \text{ STP/g} \cdot \text{年}$ であるとした。また球粒いん石ではどのいん石をとっても $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ の値が、約 5.3 であるところから ^{21}Ne の生成定数として $0.377 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \text{ STP/g} \cdot \text{年}$ を与えた。この値はそれから 10 年以上も使われ、球粒いん石の宇宙線照射年代は、いん石から抽出し測定した ^3He , ^{21}Ne の値を直接上記の生成定数であることによって求められてきた。その後、多くの宇宙線生成放射性核種が測定され、また核破砕反応機構も解明されてくるにつれて、これらの生成定数は少し低すぎるのではないかと考えられるようになった。特に ^3He の生成定数を鉄の核破砕反応の結果のみから求めたことに問題があり、マグネシウムや珪素、特に酸素の核破砕反応では $^3\text{H}/^3\text{He}$ の値が鉄からのものとは異なるということがわかってきた。現在は、1971年にヘルツォーク(Herzog)とアンダース(Anders)が求めた値を基にしてクレッシイとボガードが 1976年に求めた、 ^3He , ^{21}Ne に対する生成定数 $2.44 \times 10^{-14} \text{ cm}^3/\text{g} \cdot \text{年}$, 0.470 (又は 0.466) $\times 10^{-14} \text{ cm}^3/\text{g} \cdot \text{年}$ という値が使われている。 ^{38}Ar に対しては地球上のアルゴンの混入などの影響を無視することができないので、測定値をすぐそのまま用いることはできないが、生成定数として $0.0685 \times 10^{-14} \text{ cm}^3/\text{g} \cdot \text{年}$ という値が与えられている。

宇宙線によるネオンの生成にはマグネシウムと珪素の存在量が大きく関与していることを前に記した。石質いん石中のマグネシウムと珪素の値の比をとると普通の球粒いん石ではどの種類をとってもこの比がほとんどかわらない。したがって普通の球粒いん石については、上に

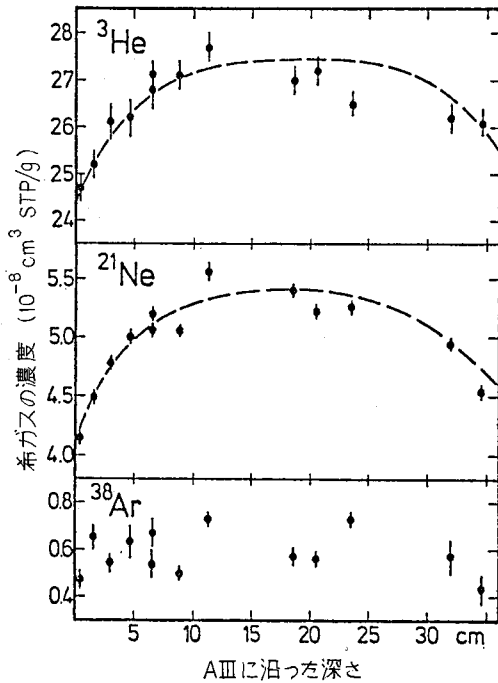


図6 石質、球粒いん石、サンセプランの深さに沿って採取した試料から得られた希ガスの濃度変化。シュルツ (Schultz), シグナー (Signer) (1976) による。

かいた生成定数を使えば、宇宙線照射年代を算出できる。その他の種類の石質いん石については、(4) (5) (6) 式を使ってそれぞれ生成定数を求めている。

最近新しく落下した大きな石質いん石の研究から、石質いん石でも宇宙線で生成した ^3He , ^{21}Ne , ^{38}Ar などの核種のいん石中の存在量が、1つのいん石で必ずしも一定ではないことがわかってきた。その一例としてシュルツ (Schultz) とシグナー (Signer) がサンセプランという球粒いん石から求めた結果を図6に示す。これらの結果をふまえて、少し厳密に宇宙線照射年代を求めるときには、 $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ や $^{21}\text{Ne}/^{26}\text{Al}$ の値を用いて、測定した試料がいん石が宇宙空間に存在していた時のどの部分にあったかをまず推定し、それに対する係数を測定値又は計算値から求めた年代にかけるという方法を用いて、宇宙線照射年代を算出している。

このようにして算出された宇宙線照射年代がいん石の種類毎にどのように分布しているかを図7に示す。

普通がいん石については1980年の夏までに発表されたすべての ^{21}Ne 測定値を用いている。 ^{21}Ne 測定値を使った理由は宇宙線生成ネオンが最も正確に測定されるということの他に、 ^3He は ^3H の壊変生成物も含むが、 ^3H 、時には ^3He もいん石の長い歴史の間にいん石からにげだした可能性のあるものがかなり発見されているという

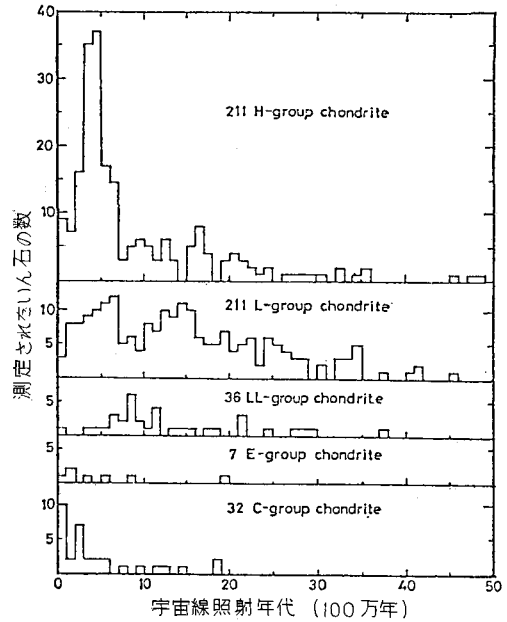


図7 球粒いん石の宇宙線照射年代分布図。シュルツらによりドイツ、マイントのマックスプランク研究所のコンピューターに集積されている1980年7月までのすべての宇宙線生成 ^{21}Ne のデータより計算してこの図を作った。

こと、 ^{21}Ne と ^{22}Ne は質量数は1しかちがわれないが、 ^{21}Ne は ^{24}Mg からの (n, α) 反応でできる。この反応は比較的lowエネルギーでもおこるが、 ^{22}Ne や ^{20}Ne は高エネルギー反応生成物が優先するので $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ をとただけで、前に記したように測定試料の場所が或程度推定できるなどということがあるためである。

図7から普通の球粒いん石でも、Hグループに属するものは 4×10^6 年位のところに照射年代が集まっているが、Lグループでは、かなり様にちらばっており、 15×10^6 年あたりにもう1つの山らしきものが存在することがわかる。Hグループのいん石の組織には比較的大きな衝撃を受けた形跡が少ないが、Lグループのいん石には多い。Hグループのいん石はもとは1つだったのが、比較的最近の事件で一度にわけて母体の中心部にあったものができたのだという考え方も成立つ。

他のグループの石質いん石は、いん石自体の数も少ないので、このような統計的処理をした研究はなかなか行われにくい。石質いん石の中で最も宇宙線照射年代の古いいん石はノートンカウンターとよばれる無球粒いん石で、年代は約10億年である。

おわりに: 以上いん石の宇宙線照射年代についてのべてきた。宇宙線照射年代というのは、いん石がその母体からこわれて宇宙空間にとびだし、高エネルギー宇宙線の照射を受けるようになってからの年代である。したが

って、いん石の母体が原始太陽星雲中の塵が集まって固化してからのいわゆる固化年代とは異り、固化年代よりはずっと短い。最も長い宇宙線照射年代をもつのはディープスプリングスという鉄いん石で、これも固化年代の約1/2である。石質いん石では先にものべたノートンカウンティという無球粒いん石で、固化年代の約1/5である。一般には、鉄いん石は“億年”の単位のものが多い。石質いん石では100万年から1000万年の間のもが多い。石質いん石の方が照射年代が短いのは、鉄いん石とくらべ、石質いん石の方がこわれやすいため、石質いん石は鉄いん石より後までも何回もこわれた、またそのたびに宇宙線を多くうけてきた表面がけずられてきたためと考えられている。

宇宙線照射年代はこのようにいん石ができてから地球上に落下するまでのうけてきたいん石の歴史を定量的に物語るだけでなく、それぞれのいん石毎に詳しくしらべると、当時の宇宙環境を宇宙線の変化というような形で我々に教えてくれるので、興味はつきない。この方面の研究はまだまだ続けられる。

お知らせ

山田科学振興財団研究援助候補推薦について

山田科学振興財団より学会あてに、下記内容の56年度分研究援助候補の推薦依頼がありましたのでお知らせ致します。

記(推薦要領抜明)

1. 援助の対象: 自然科学の基礎的分野における重要かつ独創的な研究、特に学際的色彩を持つ研究に従事する個人又はグループ。
2. 援助の金額: 1件につき1千万円前後2千万円以内の援助(A)及び1件につき3百万円前後、5百万円以内の援助(B)を併せて10数件。
3. 援助の期間: 原則として1年。
4. 推薦件数: 1推薦者ごとに(A),(B)おのおの1~2件。

申請用紙を御入用な方は、学会庶務理事までお申し出下さい。申請書は、昭和55年10月10日までに学会あて提出して下さい。

わが国唯一の天体観測雑誌

天文ガイド

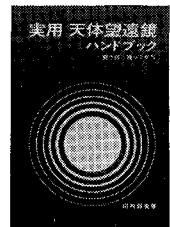
定価380円(〒70円) '81-7月号・6月5日発売!

●7月号のおもな内容

- ★日本全国で7月31日に部分日食が見られます。藤井旭さんが、日食その他の観測ガイドをまとめてくれました。ペルセ群も見ものです。
- ★この日食は北の方ほど大きく欠けます。北海道での観測地ガイドは早川和夫さん。夏の北海道は意外に天候が悪いので、観測地選びは慎重に。
- ★日本で打ち上げた太陽観測衛星「火の鳥」の活躍ぶりを東京天文台の西恵三さんの解説で。
- ★ほかに、1980年の彗星界、香港にできた大プラネタリウム太空館見学記、スペクトルの話、星座ガイドマップ、7月の星空、星物語、天文電気教室……ほか

実用 天体望遠鏡 ハンドブック

■買う前、買ってから



天体望遠鏡の実用的な解説と、選び方の具体的なポイントについて、望遠鏡製作の現場技術者がまとめたもの。これから買う人、部品を揃えようとしている人に最適。

定価880円・最新刊発売中

川村幹夫の天体望遠鏡書

定価1800円・好評発売中

■小口径から観測小屋まで

天体望遠鏡 製作ハンドブック

誠文堂新光社 東京都千代田区神田錦町1-5
振替東京6294 電話03(292)1211