

いん石に印された宇宙線の軌跡

島 正 子*

1. はじめに

宇宙線はその発見以来、陽電子、中間子をはじめとする多くの素粒子が宇宙線の中ではじめて発見されるなど、高エネルギー核反応、素粒子反応の研究に多くの貢献をなしている。

生成してから地球に到達するまで、宇宙空間に存在していたと考えられるいん石は、当然宇宙線の影響をうけていたはずである。1974年に誕生したこの分野の研究は非常に勢いで発展し、1960年代には最盛期を迎え、べき基礎的データはでつくし、またそのデータに対する解釈も一応は確立したかにみえた。

1969年より月の岩石試料が我々の手にはいるようになり、月面上にひきおこされた低エネルギー粒子による反応結果も測定されるようになった。月研究も下火になった今、またいん石についてこの方面の見通しがはじまってきたといえるかも知れない。

2. 宇宙線

高エネルギー宇宙線、いわゆる一次宇宙線は、 $10^9 \sim 10^{20}$ eV 程度のエネルギーをもつ粒子であるが、最も密度の高いエネルギー範囲は $10^9 \sim 10^{10}$ eV 程度であり、いん石を構成する元素の原子核との反応には、もっぱらこのエネルギー範囲のものが関与する。

粒子の組成は太陽系における元素の存在度と似ており、大部分は水素の原子核（陽子）で、陽子の10%弱の重元素の原子核、2~3%の電子、および微量の γ 線を含んでいる。重原子核の大部分はヘリウムの原子核であるが、ヘリウム以上の大きな原子核の分布をみると、リチウム、ベリリウム、ほう素や重元素の存在度が太陽系における元素の存在度より桁ちがいに多い。これらのことから、一次宇宙線は、太陽系外で生成されていると考えられている。

宇宙線が地球上に達し、高層大気の主成分の ^{16}O や ^{14}N と反応して ^{14}C 、 ^{10}Be 、 ^7Be 、 ^3H を生成することはリビイらの研究により、1946年ごろから知られていた。特に ^{14}C の研究は、太陽の11年周期の検出、古代文化財の年代測定、原子爆弾などによる放射性降下物の研究ともあいまって有名である。

上記の研究とは全く独自に、いん石の中に宇宙線で生

成された核種を検出、定量しようという研究が行われてきた。しかし、宇宙線はエネルギーは高いが粒子の密度は約 10^{-1} 粒子/cm²・秒・Sr.と非常に少いので、いん石の中に生成した核種の検分はもともといん石の中になかったか、非常に少なかった核種に限られる。このようなことから1952年、パネスらにより異常に高い ^3He がみつげられて以来、主としてこの方面の研究は希ガスと放射性核種の研究に重点がおかれてきた。

3. いん石

ここで宇宙線の標的核物質としてのいん石について少しふれておく。いん石は周知の如く大別して、鉄、石鉄、石質の3種類にわけられる。この中で最も多いのが石質いん石で、地球上に落下し、発見され確認されたいん石の70%、落下を目撃されているいん石の90%以上を占める。さらに石質いん石の90%以上を占める球粒いん石は、すべての不揮発性元素をほぼ宇宙元素存在度の割合に含む。このことは宇宙線の標的核物質として考える時、かえって問題を複雑にする。また生成核種を測定するにしても、放射性核種はともかくとしても、安定核種は主として希ガスに限られ、またその希ガスもたとえば ^4He や ^{40}Ar のように天然放射性核種の壊変で生成したものなどの補正を大きく行わなければならない。その反面、パズルをとくように、各成分においてゆくうちに、思わぬ発見をすることもある。その1つの手段として、石質いん石はその一例の顕微鏡写真を図1に示すように、各元素はそれぞれ鉱物を構成し、それがたくみにい

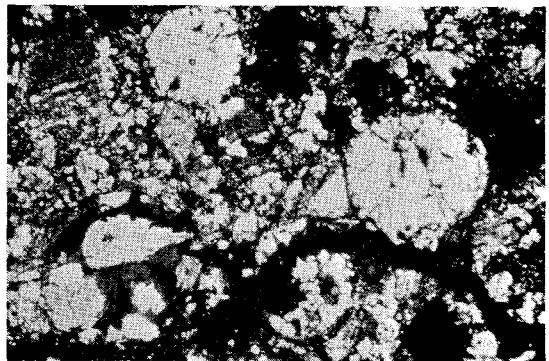


図1 石質球粒いん石「沼貝」の顕微鏡写真。10倍。クロスニコルス。美しい球粒がみえる。「沼貝」は1925年北海道石狩に落下したのを目撃されたいん石である。

* 国立科学博物館 M. Shima: Traces of Cosmic Rays in Meteorities.

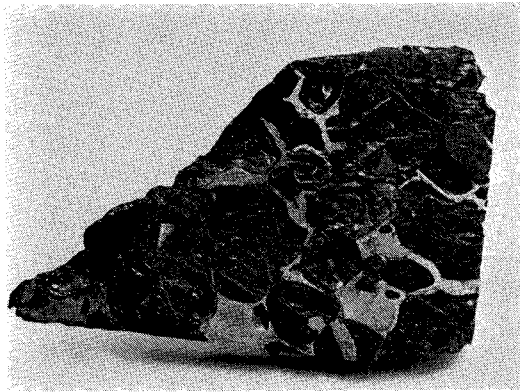


図2 石鉄いん石「フィンマルケン」. ノールウェーに落下したのが1902年に発見された、白いところが鉄である。

りまじっているので、各鉱物種にわけて、なるべく簡単な標的核およびその生成物を取り出すという試みもなされている。

石鉄いん石は、鉄と石が非常に粗にまじりあっているものなので(図2参照)、鉄と石を分離して研究することができる。

鉄いん石(図3=表紙写真)は約90%の鉄と約10%のニッケル、0.5%のコバルトからなる合金で、不純物としては、0.01%またはそれ以下の銅、りん、クロム、ゲルマニウムおよび、1万分の1%またはそれ以下のいわゆる親鉄元素、ガリウム、モリブデン、白金族元素、銀、金、タングステンなどが数えられるにすぎない。このことから宇宙線生成核種の検出、定量の研究は鉄いん石にはじまった。ただこれは、鉄いん石中の鉄相の分析値であって、鉄いん石の中には不均一に硫化鉄(トロイライト)や燐化鉄・ニッケル(シュライパーサイト)が存在し、これらの鉱物中には他の多くの不純物元素も含まれるので注意を要する。

4. 宇宙線といん石の反応

高エネルギー宇宙線がいん石を構成する元素の原子核に衝突するとこの原子核から大きなエネルギーをもった核子および少数個の核子の集団を核外へ叩き出す。これらの核子はさらに衝突を繰り返すいわゆるカスケードプロセスをおこす。~10⁹ eVの桁のエネルギーによる反応は、主として陽子、π中性子、中間子によっておこるが、低エネルギーになるにしたがって中性子による反応が優先してゆく。このような核破砕反応は10 MeV以下ではおこらないので、いん石の中に生成した核反応生成核種は10⁷ eV以上10¹⁰ eV以下の種々のエネルギーによる生成物の混合である。

5. いん石中の宇宙線生成核種

この方面の研究も現在の科学の傾向の例外ではなく、主として機器にたよる分野が機器の発展と共に多くの結果を出してきた。前記の如くもともといん石中に存在しなかったかあるいは非常に少なかった核種に限るという制限はあったけれど、多くのいん石について測定されている希ガスの珍しいデータ、およびいん石をそのままカウンタにいらただけで測定できる比較的壊変エネルギーの高いγ線を出す放射性核種²²Na、²⁶Alなどの多くのデータがこれを物語っている。これらの測定および結果の解釈についての解説は多く出されているので、ここではほんの概略にとどめておきたい。

いん石の中に宇宙線の照射により生成する核種は前記の如く高エネルギー粒子による核破砕反応生成物である

表1 いん石中に宇宙線で生成した放射性核種測定例(単位、落下時における dpm*/kg)

放射性核種	半減期	いん石				
		鉄いん石(1)	石質いん石(2)(3)(4)(5)			
⁷ Be	53.28 日	—	—	—	—	≤35
¹⁰ Be	1.6×10 ⁶ 年	4.1	19	21	23.4	9
²² Na	2.601 年	2.1	90	64	—	65
²⁶ Al	7.3×10 ⁵ 年	1.5	60	45	37	39.0
³² P	14.28 日	—	—	14	—	25.0
³³ P	25.3 日	—	—	—	—	≤1.7
³⁶ Cl	3.01×10 ⁵ 年	16	7.5	7.0	—	—
⁴¹ Ca	1.3×10 ⁵ 年	—	—	—	4.3	—
⁴⁵ Ca	163 日	5	—	—	46	—
⁴⁶ Sc	83.8 日	30	6.2	5.4	18.5	—
⁴⁴ Ti	47 年	4.4	2.0	1.4	1.8	—
⁴⁸ V	15.98 日	90	34	17	—	28
⁴⁹ V	331 日	164	34	20	17	7.6
⁵¹ Cr	27.71 日	約260	110	60	118	—
⁵² Mn	5.63 日	—	—	—	—	15
⁵³ Mn	3.8×10 ⁶ 年	515	85	44	62	50
⁵⁴ Mn	312.5 日	470	100	38	57	59
⁵⁵ Fe	2.7 年	1600	340	≤180	158	115
⁵⁹ Fe	44.6 日	—	—	—	—	≤15
⁵⁰ Co + ⁵⁸ Co	~74 日	120	14	4	—	7.3
⁵⁷ Co	271 日	89	11	6.5	11	7.9
⁶⁰ Co	5.27 年	17	9	1.5	6.4	1.1
⁵⁹ Ni	8×10 ⁴ 年	60	12	6	10.5	2.3

- (1) ヤルドムリ 本田らによる
- (2) ブルーダーハイム } "
- (3) ハールトン } "
- (4) グラネス } 馬淵、横山らによる
- (5) サン・セブラン }

* 1分間に壊変する原子核の数

ので、標的核元素より質量数の小さい核種に限られる。したがって希ガスの場合も、いん石の主成分元素である鉄などより質量数の低い軽希ガス、アルゴン、ネオン、ヘリウムに宇宙線生成起源のものが多く、宇宙線生成核種の研究は主として軽希ガスで行われてきた。クリプトン、キセノンなどの重希ガスはもとなる宇宙線の標的核元素がすでにいん石中に 100 万分の 1 程度しか存在しないので生成量が非常に少く他の要因で生成した成分にかくされてしまっていた。

いん石中に生成した宇宙線生成核種を測定する目的は、この研究のはじまった当初から、単に生成物を検出するのみでなく、生成物を定量することにより、いん石がどの位の期間宇宙線にさらされていたか、いん石が宇宙空間でどのような形をどのような大きさでどのような変化をうけてきたか、また宇宙線がその期間一定の強度をもっていったかなどということを解明するということであった。そのためには、ちょっとした衝撃や熱変化などでいん石からにげやすい希ガスを用いることは結果の解釈に 1 つの大きな仮定を導入しなければならない。また放射性核種も ^{22}Na , ^{26}Al だけではなく、種々の寿命の核種を 1 個のいん石について系統的に分析することが望ましい。しかしこれには落下したいん石がすぐ手にはいる設備の整った研究室に系統的な化学分離のできる研究者がすぐ研究にかかれる態勢で揃っていなければなら

表 2 宇宙線で鉄いん石中に生成し蓄積されてきた希ガス以外の安定核種および ^{40}K (半減期 1.28×10^9 年) (単位 $\times 10^{13}$ atoms/g)

発見されたいん石の全重量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	63 kg	150 kg	480 kg		505 kg
^{54}Cr	13.1	25.4	18.9	16.3	21.8
^{58}Cr	13.4	24.7	18.7	16.7	—
^{50}Cr	—	5.0	3.8	3.7	—
^{50}V	3.4	4.94	3.89	3.96	3.2
^{50}Ti	0.194	0.27	0.23	0.20	0.17
^{49}Ti	5.09	7.70	5.73	5.72	4.49
^{47}Ti	3.31	4.85	3.59	3.35	2.66
^{46}Ti	—	4.00	2.95	2.81	—
^{46}Ca	0.033	0.051	0.044	0.042	0.024
^{44}Ca	—	—	—	2.03	2.4
^{43}Ca	1.55	2.29	1.6	1.6	1.34
^{42}Ca	—	—	—	1.56	—
^{40}K	0.546	0.715	0.541	0.42	0.377

- (1) トライサ
 - (2) ヤルドムリ
 - (3) グラント (表面試料)
 - (4) " (内部試料)
 - (5) トレントン (内部試料)
- } 本田, 島, 今村(峯)らによる
島 (未発表)

ないというきびしい条件がある。半減期が約 2 週間から 10^8 年以上までの広範囲の寿命をもつ核種を 1 個のいん石について 15 種以上測定したのは鉄いん石に一例、石質いん石に数例あるにすぎない。一例を表 1 に示す。

希ガス以外の安定核種を系統的に測定した例はさらに例が少い。しかも鉄より質量数の少い核種をもつ元素は石質いん石の主成分をなすものが多いので、桁ちがいに生成量の少い宇宙線生成核種は完全にもともといん石を構成している核種にかくされてしまって検出は不可能であるので測定は鉄いん石に限られる。一例を表 2 に示す。ただ石質いん石の中の鉄相を分離することにより、いん石にもともあった元素の同位体存在度が極端に低い ^{50}V (0.25%) と長寿命核種 ^{40}K (0.012%) は何とか検出することができる。

この外はいん石中の宇宙線生成安定および長半減期核種の測定例としては、鉄いん石を真空中で焼き揮発してきたカリウム、カルシューム、リチウムの同位体比を質量分析計で測定した例がある。特にカリウムについては多くの鉄いん石について系統的に測定されている。

6. 宇宙線照射年代

宇宙線でいん石中に新核種が生成する速度 H は次の式で表わされる。

$$H = 4\pi I_0 P N \dots\dots\dots (1)$$

ここで I_0 は一次宇宙線の線束で単位は“粒子/cm²·sec·sr.”, P は実際上の新核種生成反応断面積, N はいん石 1 g 中の原子の数である。もしいん石が宇宙線照射をうけるようになってから現在まで宇宙線もいん石の形も変らなかつたと仮定すると生成している安定核種の量 S は簡単に (2) 式で表わされる。

$$S = H S t = 4\pi I_0 P_s N t \dots\dots\dots (2)$$

一方宇宙線で生成した放射性核種の方は λ をその核種の壊変定数とすると生成量 R は

$$R = (H R / \lambda) (1 - e^{-\lambda t}) \dots\dots\dots (3)$$

となり、一般に非常に長半減期の核種 ^{40}K (1.28×10^9 年) を除いては宇宙線に照射されていた時間の方が半減期にくらべてずっと長いので極限において壊変速度は生成速度と等しくなる。これらの式から明らかのように生成速度がわかればいん石の宇宙線照射年代はすぐに算出できる。

いん石中の同一の場所に生成した同じような質量数をもった安定核種と放射性核種の生成速度 H_S と H_R は似たようなものであるということとは想像できるが、従来のような安定希ガスの測定のみ、 ^3H - ^3He , あるいは ^{38}Ar - ^{39}Ar , ^{40}K - ^{41}K の組合せのみ、さらには散発的な放射性核種の測定のみでは、この生成速度を算出するために種々の仮定を挿入しなければならない。希ガスや上記

の組合せによる宇宙線照射年代はこうして求められてきた。

一個のいん石の同一の場所から系統的に可能な限りの宇宙線生成放射性核種あるいは安定核種を抽出した実験からそれぞれ次の関係が成立し、図 4 のようになることがわかった。

$$\left. \begin{aligned} Q(A) &= k(\Delta A)^{-k_2} \\ C(A) &= k' T(\Delta A)^{-k_2'} = k T(\Delta A)^{-k_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

$Q(A)$, $C(A)$ 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、測定された生成核のいん石中の場所による値である。この式から、全同重体の生成速度と全生成量がわかっていれば照射年代は簡単に確実に求められることがわかる。ところが、実際に測定されている放射性核種は多くの同重体の中の一つの核種であり、安定核種は安定同重体がない場合にのみ (4) 式がそのまま適用できる。

鉄や銅などの標的核を種々のエネルギーの陽子で衝撃し核破碎反応を行わせた実験から、質量数 A , 原子番号 Z の核種のこの反応による生成反応断面積が次のような実験式で表わされることがわかっている。

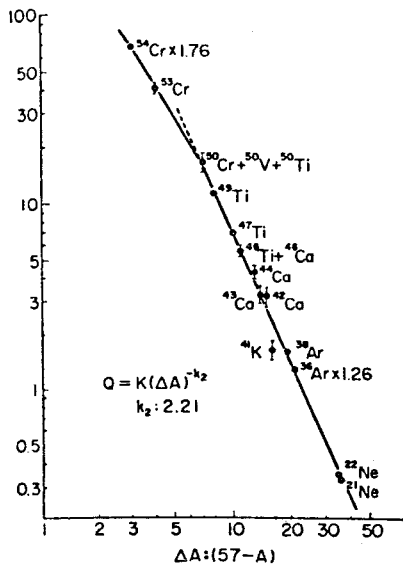


図 4 鉄いん石「グラント」中の宇宙線生成安定核種。

縦軸: 各同重体の和の ^{36}Ar に対する比
 横軸: $\Delta A = 57 - A$
 57 は鉄の主な同位体質量数 56 に質量数 1 の陽子または中性子が加わった数。A は生成核種の質量数。
 質量数 21 から 50 まで直線関係がある。
 (島, 今村, 本田による)

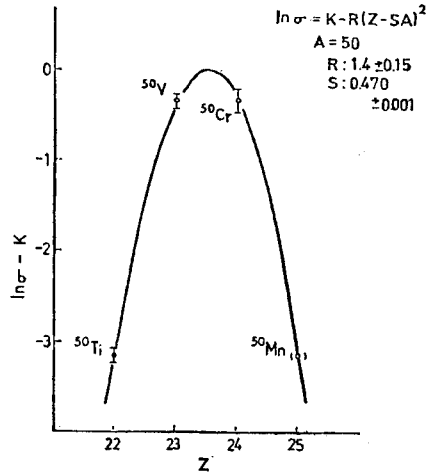


図 5 鉄いん石「グラント」中の質量数 50 の宇宙線生成核種の存在比と原子量との関係。
 (島, 今村, 本田による)

$$\ln \sigma(A, Z) = -R(Z-SA)^2 + K \dots\dots\dots (5)$$

ここで R , S はパラメーターである。鉄いん石について質量数 50 の 3 つの安定同重体 ^{50}Ti , ^{50}V , ^{50}Cr の宇宙線による生成量が測定されているので、それを用い、上記パラメーターを求めることができる。そのパラメーターを用いて、各質量数における各核種の生成比を求め、鉄いん石 Yardmyly の中に生成した種々の質量数の宇宙線生成核種の組合せで求めた宇宙線照射年代を表 3 に示す。この場合宇宙線強度は過去から現在まで一定と仮定

表 3 種々の宇宙線生成放射性核種と安定核種との組合せにより計算した宇宙線照射年代 (島, 今村(峯), 本田による)

質量数	放射性核種	半減期	安定核種	宇宙線照射年代 ($\times 10^6$ 年)
54	^{54}Mn	312.5 日	^{54}Cr	10
53	^{53}Mn (+ ^{53}Fe)	3.8×10^6 年	^{53}Cr	8.2
49	^{49}V (+ ^{49}Cr)	331 日	^{49}Ti	7.6
46	^{46}Sc	83.8 日	^{46}Ti	10
44	^{44}Ti	47 年	^{44}Ca	7.6
36	^{36}Cl	3.01×10^5 年	^{36}Ar	7.5
22	^{22}Na	2.601 年	^{22}Ne	7.9

してある。約 1 年から 10^6 年の桁の半減期のどの核種を用いても計算された照射年代は測定の誤差範囲内ではほぼ一定であり、高エネルギー宇宙線はこの期間中ほとんど変化がなかったのではないかとはいえる。このような方法で宇宙線照射年代を測定した例は非常に少い。表 4 には石質いん石の鉄相から抽出した ^{40}K と ^{50}V を用いて求めた照射年代と他の方法で求めた照射年代を示す。これは他の方法における宇宙線生成核種の生成速

表4 ^{40}K 法および ^{22}Ne 法による石質いん石の宇宙線照射年代の比較 (今村(恵), 島, 本田による)

生成速度 石質いん石	^{40}K 年代	^{22}Ne 年代*	
	$(1.5 \pm 0.1) \times 10^{10}$ 原子/ 10^6 年	1.2×10^{11} 原子/ 10^6 年**	$\sim 7 \times 10^{10}$ 原子/ 10^6 年***
	$\times 10^6$ 年	$\times 10^6$ 年	$\times 10^6$ 年
ブライトシャイド	42	22	40
ブルーダーハイム	35	23	42
リチャードトン	21	22	41
ピースリバー	39	38	64
ホルブルーク	14	16	26
サン・セブラン	13	12	21

* ^{22}Ne の生成速度を ^{22}Na (半減期 2.601年) と比較して求めた。

$$** \frac{Q(^{22}\text{Na} + ^{22}\text{Ne})}{Q(^{22}\text{Na})} = 2.5$$

$$*** \frac{Q(^{22}\text{Na} + ^{22}\text{Ne})}{Q(^{22}\text{Na})} = 1.5$$

度の算出にお難点があり、しかもどの方法で求めた方がよいと断定できない一例である。

図6に $^{40}\text{K}/^{41}\text{K}$ および希ガス法などによって種々の鉄いん石および石質いん石の宇宙線照射年代を求めた例を示す。

いずれの方法によっても鉄いん石の宇宙線照射年代は平均 5×10^8 年であるのに対し、石質いん石は 5×10^6 年と約二桁低いことがわかる。これは石質いん石の方が宇宙空間で磨耗、破壊のうけやすいので年代が若くでると

いわれている。

7. いん石の落下年代

いん石は地球上に落下すると同時に地球上の大気により宇宙線から遮蔽される。したがってそれからあとは宇宙線により新しい核種が生成することはない。

落下年代のわかっているいん石の中に生成している種々の半減期をもつ放射性核種の落下時における比を求めると、多くのいん石でほとんど一定の値になる。これを

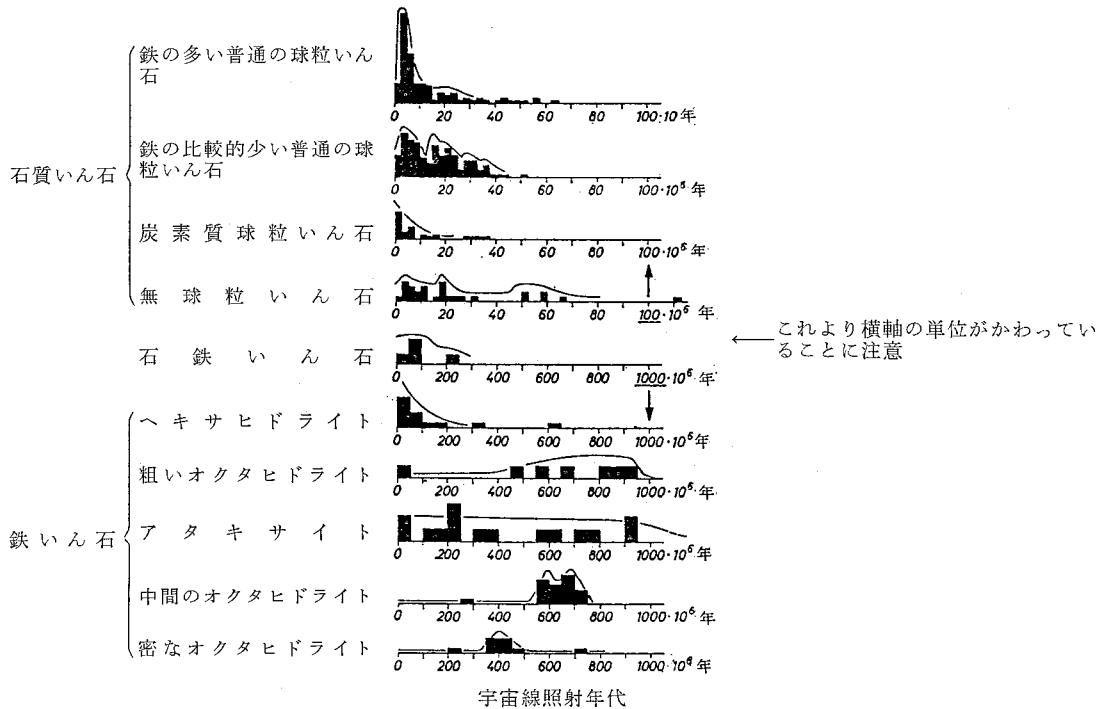


図6 各種いん石の宇宙線照射年代 (Voshage 1968年より)

利用し、いつ落下したかわからぬいん石の年代を、そのいん石中に残っている宇宙線生成放射性核種を 2 個以上求めることによって計算することができる。

8. 宇宙空間存在時におけるいん石の形

いん石は前項にのべたように宇宙空間において高速粒子、宇宙塵、他のいん石などとの衝突によりその形に変化をうけるばかりでなく、空気中にはいった時に、空気との衝撃、摩擦によりさらに地上との衝突により表面をけずられたりわられたりする。

純粋な鉄、けい素、アルミニウムなどを標的核にして高エネルギー陽子で衝撃し、その標的核の中の各部に生成した放射性核種を測定するモデル実験が多く行われている。その一例を図 7 に示すように、標的核と生成核との質量数差が大きい生成核種は標的物質の深さに比例して一様に減少するが、質量数差の小さい核種は極大値を与え、極大値の位置は質量数差が小さい程深くなる。

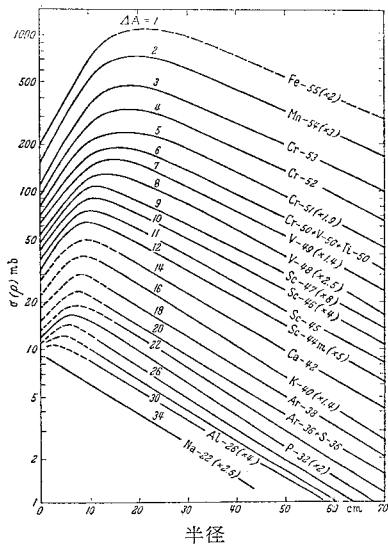


図 7 鉄を標的核とした核破砕反応生成核種の鉄の中の分布。3 GeV の陽子で 30 cm×30 cm×90 cm の鉄のブロックを照射して得られた放射性核種の測定結果より (本田による)

いん石の中に生成した宇宙線生成核種の分布をしらべ上記のモデル実験の結果とくらべるといん石が宇宙空間に存在していた時の形を推定することができる。この研究は初期には希ガスで行われたが、図 7 からも明らかなように質量数 20 代のネオン、36~40 のアルゴンよりは、53 のマンガン、50~54 のクロムの方がよい、理想的には、できうる限り多くの核種を測定することが望ましいことはいままでもない。

結果の一例を図 8 に示す。これから鉄質いん石グラントは宇宙空間において半径約 28 cm の球に近い形をも

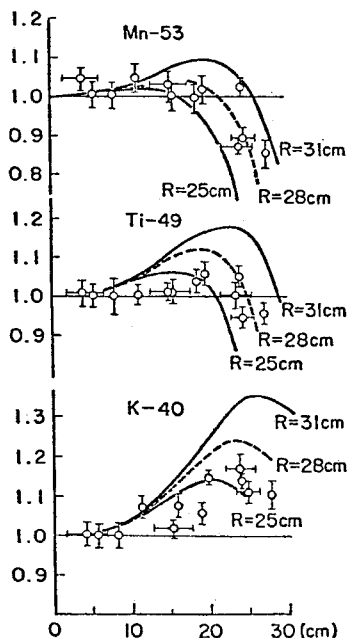


図 8 鉄いん石「グラント」中に宇宙線で生成した安定核種のいん石中の分布。

縦軸： 中心の値に対する相対値で表わしてある
横軸： 中心からの距離

実線、点線はもとの形がそれぞれの半径をもった球であったと仮定して計算したそれぞれの核種の生成量。半径 28 cm の線に最も近いようにみえる。

(今村(峯), 島, 本田による)

っていたことがわかる。これは地球上に落下してからの大きさとあまりかわらず、このいん石は地球上に落下する際それ程大きな損失をうけなかったことがわかる。

因みにこのグラントといういん石は、宇宙線生成放射性 ⁵⁵Mn と安定 ⁴⁹Ti とを比較してしらべたところ、宇宙空間における高速粒子や宇宙塵の衝突による連続的な磨耗も宇宙線照射されていた過去 6×10^8 年の間にほとんどうけていなかった (6 cm 以下であった) ことがわかっている。

9. おわりに

最近では宇宙線の軌跡を直接いん石の薄片を特別な試薬で処理して顕微鏡で観察する研究も行われている。このことばかりでなく、紙面の都合で、いん石と宇宙線の研究でこれまで主流とされてきたような面を、それに関する綜説が多いという理由で省略してしまった。いん石中における宇宙線の足跡の研究は、いん石や宇宙線の歴史のみでなく、太陽系の歴史をも定量的にひもとく重要な鍵ではないかと考えられる。