総 説

隕石内の宇宙線によって生成したアイソトープ†

本田雅健

日本大学文理学部化学科
156 東京都世田谷区桜上水

Key Words: cosmogenic nuclide, chondrite, shielding, radiation age, exposure age

1. 序 論

隕石は大小様々あるけれども、すべて地球の外から飛来してきて地上で回収されたものである。地球の外にあった間宇宙空間において高エネルギーの放射線に晒されて来っており、その結果として様々な核反応による生成物 (cosmogenic nuclide, cosmic-ray produced nuclide) を含んでいる。このようなことは地表の物質ではほとんど起こっていないので、隕石や月面物質を最も特長づけている物とされている。地表では 1 kg/cm^2 にも及ぶ厚い大気の層によって遮蔽されていて、さすがの高エネルギーの宇宙線でもその強度は千分の1になってしまっていてその存在すら忘れがちである。わずかに高層大気中で生成した ^{14}C 等によって認識されているのみである。しかし宇宙塵のような物から何トン以上にも及ぶ隕石の内部でも精々1メートル以下の遮蔽を受けているに過ぎないので、その効果は歴然としていると言ってよい。最も高い場合は、1 g のコバルト中 100 dpm ^{60}Co 以上が観察されている。低い場合でも ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{7}Be , ^{26}Al 等といったおなじみの放射能が 1 g の隕石中 0.1 dpm 程度が含まれている。

大変長い年月、 10^7 – 10^8 年にもわたって、空間に在った歴史は同様に生成して蓄積されて来

た安定同位体の含有量との比較によってうかがい知ることができる。つまり、十分に長い時間一定の条件で照射を受けてきた場合生成放射能は放射平衡状態になり、その壊変速度は生成速度に等しい。安定同位体の含量は生成速度と照射時間との積であるから、簡単な割り算によって宇宙線に当たっていた時間、いわゆる照射年代 (exposure age, radiation age) が求められる。したがって、この年代は平穩無事な隕石物体と定常的な宇宙線の存在とを前提としたモデル年代と言わなければならない。しかし隕石の生成そのものはきわめて非日常的な大規模な破壊現象の結果であり、長かった暗黒の遮蔽が一挙に取り除かれたときが考えられている。(照射年代なるものも鉄隕石 (隕鉄) では5億年程度、石質のもので1000万年前後のものが多いとされているが、なぜこのように両者の間で2桁も違うのかまだよくわかってはいない。)

実は一頃流行ったのは太陽系近傍のあまりに“多数の”超新星の爆発であった。“隕石と宇宙線”は本質的には博物学なのだが、あまりにも博物学的であり過ぎた時代があった。宇宙線生成物のことを cosmogenic products ということが多い。誤解を招きやすいのでなるべく慎重に扱うようにしているのだが、この cosmogenic から受ける印象は天変地異を思わせるものがある。そのような誘惑のあるところに、かなり測定の困難な微弱放射能の検出の仕事が入って来たので混乱の元になったのである。現在では百鬼夜行の時代は終わったのであるが、

† Isotopes Produced by Cosmic-rays in Meteorites. Masatake HONDA: College of Humanities and Sciences, Nihon University, Sakurajosui, Setagaya-ku, Tokyo 156, Japan.

今までに解けなかった本質的な謎はかえって深まるばかりである。

実はこの方面の研究は1952年に Paneth らによる鉄隕石中の ^3He の発見にはじまっている¹⁾。彼らは鉄隕石の生成年代を求めるために、ウラン-ヘリウム関係を利用していた。約 1 ppbU と求められる試料からそれらしい量の He (radiogenic) が抽出された。しかし大きな隕石が小さな隕石より常に短い年代を示す等、おかしいことがわかってきた。もちろん化学者であるからウランの分析については細心の配慮を行って当時としては ppb のレベルの分析までは自信を持っていたようである。長い間続いているうちに宇宙線の研究者によって重要な示唆がなされた。彼らによれば大きな隕石では遮蔽効果によって宇宙線の強度が弱められているが、ヘリウムは元来鉄と宇宙線との核反応の産物であろう、というのである。さらに進んで、ヘリウムは地表の (terrestrial) ものと違って ^3He を 30% 位も含むものであろう、と推論した。今までガスの容積と圧力だけしか計っていなかったのが、質量分析を依頼してみたところ、正に予言どおりであったという、エピソードになっている。(^3He は広い範囲で $10^{-5} - 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g}$ にわたって含有されている。)

これだけならばよいのであるが、さらにわかりにくいことが報告されている。Paneth らはよほど年代に未練があったのであろう、ヘリウムの特に低い (大型の) 鉄隕石によって、宇宙線の妨害を受けることなく、きわめて短い生成年代を求めることができると言っている。これは明らかにウランの測定値に対してなお充分反省していなかったことを示すものである。現在ではウラン含量が 10^{-15} g/g 以下にも及んでいることがわかっているのが、大変おかしいこととしか受け取れない。微量化学分析がいかに困難な問題を提供しているかを良く示している例であり、今日でも分析値に対しては余程慎重な取扱いが要求されるところである。一方このことは同時に一旦思い込んだ概念を理性によって捨てるがいかに大変な頭の切替えを要するかをも示している。

さて、これから先は定性的にはかなり早い。 ^3He , ^4He , ^{21}Ne , ^{22}Ne , ^{36}Ar , ^{38}Ar 等々が相次いで検出されてきた。 ^3He の場合のように微量であっても隕石の中に元来含まれていないと言ってもよいような同位体が 1 対 1 に近い割合で検出されるので余りきわどい議論も測定もなしに正解を得ることが可能であった。たとえば地表の空気中のネオンが 20:21:22 が 91:0.3:9 であるのに対して宇宙線に因るものはほぼ 1:1:1 であるのは象徴的である。Ar についても同じようなことが言える。

なかでも比較的中型の鉄隕石を切断しその中心付近と周辺部とを組織的に調べた研究が特筆できる。1958-1960年にわたる Nier, Hoffman, Signer ら²⁾の Grant 鉄隕石中の希ガス濃度の深度分布 (depth profile) の研究が出色のものとして挙げられよう (図 1)。それらによれば、どの生成物も隕石の切断面の中心で最も低い含量を示しており、二次元的には同心円状の等高線を引くことができる。少なくとも中心付近を含む本体は空間において存在し照射されたままの姿で回収されたことを端的に示している。周辺部は大気へ突入した際にかなり失われている。球形物体中の深度分布であるから真の中心

図 1 鉄隕石中の宇宙線生成物の分布

Hoffman and Nier (1958) による Grant 隕石 (回収量 480 kg; 最長 55 cm) 中の ^3He の分布切断面の横線は試料採取のためのバーの位置を示す。このほか Ar と Ne とでは、 ΔA が大きくなるのでさらに急なスロープの等高線が示されている。(単位は 10^{-6} cc/g)

を求めるためには三次元的測定が必要であるが、一般の読者には二次元表示でも納得されやすい。現実には中心付近の三次元測定はなされていない。

ここまで来ると当然ながら一般的に宇宙線と隕石の相互作用を定量的に直接求めることが期待される。しかし、現在でも絶対値についてはあまり正確な議論ができないいろいろな要因が存在する。現在の宇宙線自体は空間において強度とエネルギー分布が比較的良好に知られている（ただし一方において、遠い過去のことは実は逆に隕石の研究からしかわからないので隕石が重要な問題を提起している）。一次の銀河宇宙線は高エネルギー陽子を主体とする、1 GeV/n以上の粒子線（n：核子）で銀河系起源（galactic）のものである。しかし、それが隕石や月、地球大気のような物質に入射すると、高いエネルギーの核過程によって二次の粒子線を作りやや低いエネルギーの放射線の混合物となるが、その主体は高エネルギー中性子線束といえる。このような線束を隕石の大きさと試料の深さの関数として一般的に求めることは容易ではない。定性的には、比較的低いエネルギー領域をしめるものは急激に上昇するが、ある深度から先は減少してしまう。この両方の効果をまとめて遮蔽効果（shielding effect）と称している。この遮蔽は自己遮蔽と言ってよい。つまり物質と宇宙線との相互作用によって生成する核種はその相互作用そのものによって遮蔽の効果を受けているからである。宇宙線生成物には常に遮蔽が伴い、遮蔽のないところには生成物がない。

遮蔽というと図1のように減衰（attenuation）のみが連想されやすいが、隕石特にコンドライトは小型の隕石（10–100 kg）であるのでネオン等の含量が深度（0–50 cm）や隕石の寸法とともに上昇する領域を扱うことが多い。さらに、これらの粒子線と標的になる隕石構成物質との相互作用を求めなければならない。宇宙線線束については地球大気中の線束、スペクトルとの比較ができるが、隕石一般には適用しがたい。単色高エネルギー中性子線が得

られ難いので核反応断面積のエネルギー依存性、すなわち励起関数の直接測定ができず、反応モデルや半経験式による推定しかできないことが難点である。

ソフトのモデルによる計算が困難ならばそれに代る積極策として、鉄球のような隕石自体のモデルを用意し加速器による高エネルギー陽子線（1 GeV 以上）を照射してすべて実験的に求める方法がある。このとき隕石の代用品となるのはいわゆる厚い標的 thick target である。鉄や岩石の塊に対して人工的にいろいろな角度から高エネルギーの陽子線を照射する（と言うよりは標的の方をランダムにあらゆる角度と高さなど水平垂直軸を連続的に変化させながら照射する）比較的小型のモデルで比較的短寿命の生成物については実験しやすい。

2. 生成速度の統計的現象

(1) 初めに、鉄隕石中のHe以外の典型的な生成物の相対的分布について有用な関係が見いだされた。いわゆる典型的な高エネルギー核破碎反応生成物（spallation products）として質量数56のFeより $A=45-20$ のあたりの生成物は、その質量の差、 $\Delta A=56-A$ が支配的であり、特に全同重体収率（total isobaric yield）としてはきわめて簡単な指数関数で表現できる。これは偶然、Geiss ら（1962）³⁾とStauffer and Honda（1962）⁴⁾が実験的に同時に見だしている。すなわち、生成物（質量数と原子番号の組合せ） A, Z について、生成速度 p は

$$p(A, Z) = f \times k_1 \times (\Delta A)^{-k_2}$$

全同重体については $f=1$ である（放射性核種では $f<1$ ）。たとえば ^{38}Ar の生成に対して $p(^{38}\text{Ar}) = k_1 \times (18)^{-k_2}$ が適用され隕石内の照射条件は k_1 と k_2 によって決定される。他の生成物に対してもその質量のみによって左右される。ここで k_1 と k_2 は宇宙線に対するいわゆる、遮蔽の度合いを示す尺度である。 k_1 は遮蔽による線束のレベルを、 k_2 は線束のスペクトルを示している。 k_2 は遮蔽とともに次第に高くなり低いエネルギーの部分が大きくなる。 k_1 は次第に上昇し極大となった後再び下降す

表 1 生成速度算定用パラメーター一覧

多数の生成物について既報の $\Delta A'$ と f に関する数値の例をまとめた。これらを k_1' , k_2' と組み合わせると生成速度 p が算出される。なお短寿命の核種(半減期 3 年以下の)は solar cycle に影響される可能性があるし、測定不十分のものに対しては概算値を示す (k_1' と k_2' は $\Delta A'$ を使用することによる各補正值)。

関係式: $p = f \times k_1' \times (\Delta A')^{-k_2'}$

Target	Radioactive product	$\Delta A'$	f	Stable+ ⁴⁰ K product	$\Delta A'$	f
Irons	⁵⁴ Mn	6	0.59			
	⁵³ Mn	7	0.78	⁵³ Cr	7	1
	⁵² Mn	8	0.35			
				⁵⁰ V	10	0.49
	⁴⁹ V	11	0.86			
	⁴⁸ V	12	0.6	⁴⁹ Ti	11	1
	⁴⁶ Sc	14	0.42	⁴⁶ Ti	14	0.98
				⁴ He	14	18.3
				⁴⁵ Sc	15	1
	⁴¹ Ca	19	0.5	⁴¹ K	19	1
				⁴⁰ K	20	0.64
	¹⁰ Be	22	0.11	³ He	22	16.7
	³⁶ Cl	24	0.64	³⁸ Ar	22	1
	²⁶ Al	34	0.23			
L-Chondrite				³⁶ Ar	24	0.78
				²¹ Ne	39	1
	²⁶ Al	7	0.10	²¹ Ne	*	
	²² Na	9.5	0.33	²² Ne	9.5	0.74
	¹⁰ Be	11	0.10			
	⁷ Be	ca. 10	0.4	³ He	23	22
Carbon	¹⁴ C	ca. 8	0.12			
	¹⁰ Be	10	0.45			

*: $p(^{21}\text{Ne}) = p(^{22}\text{Ne}) / (^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})$

物である。そのため上の式のような統計的処理は初めから諦められていた。ところがこのヘリウム等を初めから丁寧に測り直した人達がいる。Voshage ら (1978-1983)⁵⁾ がそれであるが非常に精度の高い再測定を100以上の試料について丁寧に試みた。しかし筆者らを含めてこれらの仕事についての評判は今ひとつであった。なぜかという、正確な測定は結構なのであるが、それから引きだせる新しい事実がなかったことである。たとえば ³⁸Ar/²¹Ne と ⁴He/²¹Ne との関係が、実験的に 1 本の単調な曲線で

まとめられていた。⁴He/²¹Ne はそれまでも遮蔽の度合いを良く表す比として認められているものである。1 個の実験式を多項式で表現したところであつたそれだけのことに過ぎない。これを折角の測定なので何とかならないかと、今さらのように眺めていてふと大切なことに気がついた⁶⁾。それは、上の 2 組の比についてそれぞれの対数をとるだけで関係がきわめてすっきりすることである。つまり ⁴He に対しても他の破碎反応生成物と同じように適当な $\Delta A'$ 値をあてはめることができることを示唆している。⁴He と ³He についてそれぞれ14と22を使って系統化が可能である。14といえば $A = 46$ を意味している。(このように実験結果を整理しただけで新しい事実が出てくることは滅多にないことである。報告された実験値に対する高い信頼度に支えられたためであると考えられるが、一方測定者はあまりに測定にのみのめり込んでいたのではないか?)

³He に対しては、最も直接的には ³⁸Ar とくらべて見ればよい。つまり図 4 に示したように、偶然ながら ³He/³⁸Ar は ⁴He/²¹Ne がどのように変化してもほとんど変わらないことが観察される。ただしnormaliza-

tion のために両方の He の f 値はかなり大きな値をとる必要がある。³He に対して16.7, ⁴He に対して18.3となっている。破碎反応において全質量損失は $p+n+t+\alpha\cdots$ の総和であるから、積分値 $\int(p \times \Delta A)$ のうち個数にして約 10%がアルファ粒子とすればほぼ納得できる数値である。元来どんな関係でも parameter を複数使って power function に近似し、対数をとれば直線近似が可能になるとも考えられる。しかしこの場合は核破碎に準じた取扱いをすることはごく自然であろう。⁴He や ³He の生成の

図4 各種鉄隕石中の希ガス間の関係 (測定値は Voshage ら, 1978-83)⁵⁾

${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ と ${}^{38}\text{Ar}/{}^{21}\text{Ne}$ との関係。3 者のうち ${}^4\text{He}$ のみ $\Delta A'$ 等が決まっていないが他は既知であるからこの図の直線の傾きと高さから求められる。 ${}^3\text{He}/{}^{38}\text{Ar}$ は両方の $\Delta A'$ が偶然一致している (多数の試料のうちには数個まったく図と関係のないものもあるが、それぞれ別に固有の歴史を秘めているものと解釈されるので除外した)。

励起関数は $A=46$ や ${}^{38}\text{Ar}$ のそれらとはかなり違っている。Ar 等の場合には 200 MeV 以上の領域にしきい値 (threshold) があってそこから急激に高くなっている。その上はほとんど平坦な一定の高さを維持していて、かなり単純な形をしている。一方ヘリウムの方は α 線が発生する低いエネルギーのところから次第が高くなって平坦なところがない。それでも線束のスペクトルが広い分布をしているために効果的には一見区別がつかなくなっているのであろう。線束としては $(E_0 + E)^{-2.5}$ のような形が考えられている (ここで E はエネルギー, E_0 は 1000 ないし 100 MeV で遮蔽とともに減少する)。現に励起関数と線束との積を積算してみるとこの様子ははっきり示される。確かに ${}^3\text{He}/{}^{38}\text{Ar}$ は正確には一定ではなくて、遮蔽の極端な場合、大きい場合と小さい場合、ともに 16.5 よりは少し高くなっている。 ${}^3\text{He}$ の生成断面積が低いエネルギーと高いエネルギー領域で ${}^{38}\text{Ar}$ の生成よりも相対的に高くなっていて、線束が遮蔽とともに低エネルギー側に重心を移してゆくからにほかならない。ただその差は小さく (3-

4%), Voshage らのようにきわめて正確な測定を行わないと有意に検出することはできない (図 4)。逆に言えば、 ${}^3\text{He}$ に対しても $\Delta A' = 22$ を想定する近似法は実用的であるといえる。

実はこのような関係は、すでに Signer ら (1960) の求めた古い実験値を調べてみても同じ結論に達するので、必ずしも Voshage らをまつ必要はなかったのである。ただ彼らによって、忘れられそうになっていた問題の再検討をする機会が与えられたにすぎない。それにしても ${}^3\text{He}$ が発見されてから実に 32 年を経てはじめて合理的な系統化 (reasonable systematization) ができたことは、科学の進歩には予想外に時間のかかることを教えてくれているようで、しばし感慨に耽ったものである。

(5) ヘリウムの生成はその励起関数の形から見ていくつかの破碎反応の複合と等価と見ることができる。(現実には最小限 2 個の複合でも充分 ${}^{38}\text{Ar}$ と比較できる組合せが見いだせるし、中間的な遮蔽によって ${}^{38}\text{Ar}$ との比が極小になることも再現できる。) さらに、見方を変えると、ある一定の生成物に対して複数の種類の標的が存在している場合に匹敵すると見られる。このような場合その生成については、元来原理的には非直線の関係しか期待できないはずであるが、現実には上に示したような簡単な直線関係によく近似することができる。複数の標的とは混合物の物体を意味している。混合物として最も均質で一般的な隕石としてはコンドライト (chondrite) を挙げることができる。コンドライトではどのように扱うことができるであろうか、つぎに見て行くことにしよう。

コンドライト中の ${}^3\text{He}$ に対しては鉄隕石と同様のパラメータによって扱うことができる。 ${}^3\text{He}$ の生成は鉄も石もあまり変わらない特徴を持っているが、石の場合にはいつでも diffusion loss による escape の恐れがある。 ${}^3\text{He}$ が鉄から酸素にいたるまであまり標的に左右されないで生成することは興味のあることであ

る。) Mg (15%), Al (1%), Si (18%) や酸素 (40%) 等を主な標的とする ^{22}Ne , ^{26}Al , ^{10}Be などに対しても, 適当な $\Delta A'$ を選定すればよい。ただコンドライトの場合標的の種類が多いので, 大抵の核種は低いエネルギーの生成物である。したがって構成成分である金属相 (7–15%) を取り出してその中の高いエネルギーの生成物を測定しなければならないことがある。(月面試料は金属を含まないのでこの点で不自由であり, k_2' の測定が困難である)。一口に金属といっても, よく精製して石の部分を 0.1–1% 以下にしなければ使えないことが多い^{6), 7)}。たとえばこの金属鉄中の Ne の測定は未だに成功した例を見ない。一方 ^{10}Be が金属中で 5 dpm/kg 位しか含まれないが, ^3He , ^{38}Ar , ^{36}Cl などとほぼ同じ $\Delta A' = 22$ を示すことも付記しておきたい。このためには ^{10}Be 生成の励起関数が ^3He か ^{38}Ar と同型でなければならない。現在得られている実験値はほぼ ^{38}Ar に平行しているが, やや高いエネルギー側にずれているようでもある。

3. 希ガスによるコンドライトの遮蔽効果

実はコンドライトについては希ガスの測定値をもとにして, 実験的にすでにいくつかの経験則が提出されており, それはそれなりに実用的とされているので, まずその効用と限界とについて検討を加え, 最後に上記の方法との関係を議論して行くことにしたい。

(1) Eberhardt ら (1966)⁸⁾ はコンドライト中の $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ と $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ との関係を示した。それによれば, $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ (略して 3/21) は 8–3 間の変動値を示すが, それに対応して $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ (略して 22/21) は 1.3–1.05 の間で変わり, それらの間には直線的な関係 (Bern line) があるというのである。双方とも遮蔽とともに低い値を与える。それらが高い値を示すのは, 遮蔽の低い小さな隕石か, または表面に近い浅い試料であると判断される (図 5)。

一例として Eugster (1988)⁹⁾ による関係式を示す。L-chondrite に対して,

$$^3\text{He}/^{21}\text{Ne} = 21.77 \times (^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}) - 19.32$$

これまでにその他の式も提出されているが, いずれも同型同質の直線近似である。

これらの値を頼りにして遮蔽効果を補正することにより, ^{21}Ne のような典型的な生成物の生成速度を求める方法がある。(この生成速度は元来放射性核種の測定値によって決められる。このためには金属中の ^{36}Cl や ^{53}Mn の測定が候補になる。) 速度がわかれば宇宙線に当たっていた時間つまり隕石として空間にあった年代, 照射年代, がでてくるので重要視されているのである。ここで問題なのは ^3He である。鉄隕石の場合と同じく典型的な生成物であり, 遮蔽によらないで一定速度で生成するが, ケイ酸塩から拡散によって損失しやすい。したがって 22/21の方が信頼できる遮蔽の度合いを示し, ひいては ^{21}Ne の生成速度を示すものとされている。その変動幅は小さいが, 22/21は質量スペクトルの上で直接比較できるので測定誤差が小さく $\pm 1\%$ 以下であることは良く知られている。

(2) 一体 22/21は何を示しているのであろうか? 現在どんな専門家に問いただしても満足な定量的な答えは返ってこない。 ^{21}Ne は実は混合物である。Mg や Si からの破碎反応による部分と, $^{24}\text{Mg}(n, \alpha)^{21}\text{Ne}$ による非常に低いエネルギーの核反応によるものとの和である。そのため遮蔽の進む条件では 21が 22よりも早く成長するのである。定性的な説明はこれでも良いかも知れない。しかしこれ以上は何も言えないのが現状である。たとえば遮蔽とともに 22/21は次第に低くなるけれども, 1.05より下, 決して < 1 にはならないという実験的事実がある。多分 21の成長が 22に比べて大差なくなるためであろうが, あくまでも“多分”である。元来は 22の方が 21よりも標的の質量に近いので, 破碎反応だけなら遮蔽とともに 22/21は次第に高くなっていくはずのものである。いずれにしても, Jilin, 回収量: 4 トン, のように普通に手にするものよりも大きなコンドライトには適用できないことを認めなければならない。

(3) さらに困ったことには, 22/21は大体の目安にはなるけれども決して遮蔽による効果を

図 5 各コンドライト中の遮蔽, その 1 (希ガス比)

各隕石中の深度分布 (文献値) を比較したもの。国分寺はそれに相当すると見られるもの (Schultzら, 1992より)¹⁰⁾。いずれも 22/21 の左端が 3/21 の最小値で隕石の中心に対応し, 右へ行くほど表面に近い試料である。

図 6 各コンドライト中の遮蔽, その 2 (k_2' と k_1')

Knyahinya, L 5, St. Severin, LL 6, Kokub.: 国分寺, L 6, Keyes と St. Severin の関係はほぼ同一線上にのる。

図のなかでコンドライト程度の物体に対する直線的近似式 $k_1' = 0.042 \times (23)^{k_2'} \text{ atom/min} \cdot \text{g}$ によれば, $p = f \times 0.042 \times (\Delta A' / 23)^{-k_2'} \text{ atom/min} \cdot \text{g}$ であり, k_2' のみの関係となる。球状物体の中心 (4π center) における k_1' と k_2' との関係はこの近似式に近い (この近似は大型の物体に対しては適用されない)。これによれば, $\Delta A' = 23$ に近い生成物は k_2' が変動してもほとんど一定の生成速度を持っているはずである。金属鉄のなかの ^{36}Cl , ^3He , ^{38}Ar , ^{10}Be , ^{40}K , および chondrite 中の ^3He などすべてこの部類に入る。たとえば Knyahinya の場合 k_2' は $^3\text{He}/^{22}\text{Ne}$, metal 中の ^{10}Be と ^{26}Al のコンドライト中のそれらとの比, metal 中の $^{53}\text{Mn}/^{36}\text{Cl}$ からそれぞれ独立に求められた。 k_1' は放射能と k_2' とから算出された。

一義的には表してはいないことである。3/21 と 22/21 との関係は一本の直線で近似できず, 二次元的な広がりのある平行線の集まりとして観察されるものである。端的に言えばたとえ 22/21 が同一でも小さな物体内部の遮蔽と大きな物体の表面近くの遮蔽とは違うのである。22/21 が決まっても ^{21}Ne の生成速度は概略 ($\pm 10\%$) にしかわからない。これらの問題を抱えながらも, 希ガスの測定では他に手立てがないので, 今でも遮蔽と言えどもっぱら 22/21 に頼っているのが実状である。だから遮蔽とは何かとの問にたいして希ガスの測定からはあいまいな答えしか返ってこないのである。(もともと制約の多い希ガスの質量分析のデータのみを責めるわけにゆかない。本来多彩である放射能の測定値は, 再現性においては見劣りがするだけでなく精度については常に測定者の主張するものより格段に劣っていると見做されるからである。)

4. コンドライト中の遮蔽についての提案

これまで述べてきたことから, 広く隕石, 隕鉄および石質隕石 (月面物質) の“遮蔽効果”については 2 個の変数, k_2' と k_1' と, によって, 実験室的ながら, 一義的にまた再現性良く表現できることが見いだされてきたと思われる。一般には, 遮蔽の原因となるものは隕石の大きさと試料の深さの 2 種であるから, 2 個の変数によって必要かつ十分な記載ができるものと考えられる。しかしコンドライトについては通常小型であるから k_2' のみからでも k_1' が概算できる領域になっている (図 3, 6)。この点で希ガスと似た関係になっている。ここで k_2' , k_1' と, 使い慣れている希ガスの係数との関係を求めておくことは一般の理解を得るために役立つと思われるので以下にその努力の結果を示してこの辺の事情の説明を試みた。

(1) 図 5, 6 によって希ガスの関係と k_2' 対 k_1' による表現とを比べてみると, かな

図7 コンドライト中の遮蔽を総合的に表示したもの

図6の上に図5の修正したものを重ねて表現した(著者原図)。4 π center は様々な径の中心におけるもの、2 π は月面のような無限大物体中の深度による変動である。遮蔽としては両極端の条件を示している。つまり Knyahinya (半径: 45cm) より大きな物体の場合は k_2' が等しくても生成速度は4 π の方が3-4倍も高い。一般の場合はこの2本の線の間に plot される。

因みに図2および図3にあげた Grant 隕石では $k_2' = 2.8$ に及ぶ領域にあるのでヘリウムの生成は深度とともに下がる(図1)。

り似た面があることに気が付くであろう。少し手を加えることによって、両者を重ねあわせにして1個の図にして示すことができそうである。まず、3/21と22/21とは、それぞれ k_2' と k_1' (またはその逆)との関数として表現できるであろう; それらの形はともかくとして、 k_2' ; k_1' を x と y に目盛ったようにそれに対応させて、 x^2 と y^2 に3/21か22/21のいずれか(の変形)を規格化して目盛ることによって、重ねあわせが可能になるものと考えられる。

(2) そこで問題はどれをどの軸に目盛るかである。3/21が高低両エネルギーの生成物であることから、仮にそれを変形して x^2 軸に目盛ることとする。 k_2' に対応させるために少し変えて、3/22に換算した。そして $\log 3/22$ を目盛ると当然ながら k_2' と同じことになる。そうすると22/21の方を k_1' と対応する軸に目盛らねばならなくなる。ややおかしいと思われるが、あえて21/22の形にして縦軸に目盛ったのが図7に示したものである。ここでは別に $\log k_1'$

と Ne の比が物理的に対応するといっているわけではない。ただ図面上の重ね方によってそのようになっただけである。具体的に既存の大小3種の隕石中の分布についての実験値を同時にプロットしてみた。その結果当然予想されるように2グループのデータの一致は決して満足すべきものとはいえない。これはまったく当然のことで実験的にも理論的にも幼いもの同士をつきあわせたのであるから仕方がない。多分 Ne の同位体比と遮蔽との違いの方に問題があるのであろう。

(3) 現状ではここまでが精一杯というところであろう。ただ心残りなのは、 k_1' と21/22との対応である。実は22/21に実験的に最低値がある一方、 k_1' にもそれに対応して最高値があることが面白い一致ではないか? つまり、21/22が次第に上昇して1に近づいてゆくと k_1' の方も最高値150 atom/min·g になり遮蔽とともにまた再び低い値になる。これと平行して22/21も1を切ることなく再び

1.05以上になってゆくのではないか? 3/21や3/22は減少する一方だと考えられる。(しかしこちらの方はヘリウムの損失と区別ができない。)

5. 将 来

一般に achondrite (非球粒隕石) の場合のように組成が一定していないものに対しては各標的ごとに遮蔽の式を立ててその積分値を求めることが望まれる。核破碎反応以外の簡単な反応については ^{21}Ne の場合と同じく簡単に統計的に扱うことはできない。(n, p), (n, 2n), (n, α) 等のほか (n, γ) のようなものに対しては個々の反応断面積が直接 f 項に入ってくるが質量の項は形式的な意味しかもたなくなっている。物理的な統計論の意味は薄められてもシステムとして実験的に系統化できる限り少しでも広い適用性を追及してゆくべきであろう。

隕石があるとき破壊によって生成した以上、途中でも何回か破壊される機会がなかったと考

えることはむしろ不自然である。標的としての隕石の方に変動がない場合でも、宇宙線の方が一定でない要因も多々ある。宇宙線の永年変化、太陽宇宙線の影響、太陽黒点周期の効果、隕石軌道の変化、原始太陽系内での宇宙線、等等なかなかわからないことが山積している。それらに対する備えとして、ここではまず隕石の日常的問題の解明を試みたわけである。いわば臨床医学に対応する基礎医学の領域の解説のようなものと見て貰ってもよい。

文 献

- 1) Paneth, F. A., Reasbeck, P. and Mayne, K. I.: *Geochim. Cosmochim. Acta*, **2**, 300-303 (1952)
- 2) Hoffman, J. H. and Nier, A. O.: *Phys. Rev.*, **112**, 2112-2117 (1958)
- 3) Geiss, J., Oeschger, H. and Schwarz, U.: *Space Science Rev.*, **1**, 197-223 (1962)
- 4) Stauffer, H. and Honda, M.: *J. Geophys. Res.*, **67**, 3503-3512 (1962)
- 5) Voshage, H. and Feldmann, H.: *Earth Planet Sci. Lett.*, **45**, 293-308 (1979) and others
- 6) Honda, M.: *ibid.*, **75**, 77-80 (1985); *Meteoritics*, **23**, 3-12 (1988)
- 7) Nagai, H., Honda, M., Imamura, M. and Kobayashi, K.: *Geochim. Cosmochim. Acta*, **57**, 3705-3723 (1993)
- 8) Eberhardt, P., Eugster, O., Geiss, J. and Marti, K.: *Z. Naturforsch.*, **21 a**, 414-426 (1966)
- 9) Eugster, O.: *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 1649-1662 (1988)
- 10) Loeken, Th., Scherrer, P., Weber, H. W. and Schultz, L.: *Chem. Erde*, **52**, 249-259 (1992)