いん石の固化年代

島 正子*

1. はじめに

我々が住んでいるこの地球，あるいはこの太陽系がいつごろから現在のような形を作っていたのだろうかということは昔から人々の思考にあったようで，ベクレルやキュリー夫妻により放射能が発見されて10年もたたぬうちに放射能を利用して年代を測定しようという試みがはじまった．しかし1930年ごろまでは測定技術がおいつかず，特殊な鉱物の年代を測定するにとどまっていた．その後質量分析技術が急速に進歩しはじめると同時に，カリウムやルビジウムの出すβ放射能がそれぞれ，^{40}K，^{87}Rbからのものであり，年代測定を行うのに適当な半減期をもつこともわかり，年代測定法は急速に進歩した．それからわずか50年たらずの間に我々は地球上の岩石鉱物のみならず，いん石や月の年令までこれらの方法で測定してきた．特に最近20年余りのこの分野の発達はめざましく，ついに年令のみならず求めた数字から，いん石などが経てきた履歴をも推定しようという程になっている．このように人々をかりたててきた放射性元素を用いる年代測定法とはどんな方法か，そしてこの方法でどういう年代がわかるかを，いん石を主題にしてのべてゆこうと思う．

2. 放射性壊変

今日100あまりの元素が知られているが，この中には約2000種の異る陽子数と中性子数をもつ核種がみつけ

表1 固化年代を測定しうる核変換

放射性核種	娘核種	半減期
^{40}K (0.50) 0.012%	10.49% → ^{40}Ar 99.60% 89.5% → ^{40}Ca (7.0×10^{4}) 96.94%	1.28×10^{9} 年
^{87}Rb (1.64) 27.83%	→ ^{87}Sr (1.88) 7.0%	4.89×10^{10} 年
^{138}La (4.0×10^{-4}) 0.089%	32% → ^{138}Ce (3.0×10^{-3}) 0.25% 68% → ^{138}Ba (3.4) 71.7%	1.12×10^{11} 年
^{147}Sm (0.034) 15.1%	→ ^{143}Nd (0.095)+^{4}He 12.2%	$1.06_{0}\times10^{11}$ 年
^{176}Lu (9.4×10^{-4}) 2.6%	→ ^{176}Hf (0.0109) 5.2%	3.79×10^{10} 年
^{187}Re (0.033) 62.60%	→ ^{187}Os (0.012) 1.6%	4.35×10^{10} 年
^{190}Pt (0.018) 0.013%	→ ^{186}Os (0.012)+^{4}He 1.58%	6.95×10^{11} 年
^{232}Th (0.058) 100%	→ ^{208}Pb (2.098)+6^{4}He 52.4%	$1.40_{1}\times10^{10}$ 年
^{235}U (0.0189) 0.720%	→ ^{207}Pb (0.88)+7^{4}He 22.1%	7.04×10^{8} 年
^{238}U (0.0260) 99.2746%	→ ^{206}Pb (0.96)+8^{4}He 24.1%	4.468×10^{9} 年

* 国立科学博物館 Masako Shima: The solidification age of meteorites

られており，そのうちで安定な核種は 260 を数えるにすぎない．

1個の核種の安定度をあらわす1つの物差として平均寿命 (τ) という概念が，またこれらの核種集団の安定度をあらわすためには半減期という概念が導入されており，変換の割合は実験的に次の式で与えられている．

$$N=N_0e^{-\lambda t} \quad \cdots\cdots(1)$$

ここに N と N_0 は時刻 t と $t=0$ における核種の数で λ はそれぞれの核種に固有の量であって壊変定数とよばれている．壊変定数の逆数が平均寿命であり，原子数が半分になるまでの時間 $t_{1/2}$ を半減期という．すなわち半減期は

$$t_{1/2}=(\log_e 2)\tau=0.69315\tau$$
$$=0.69315/\lambda \quad \cdots\cdots(2)$$

とあらわされる．

放射性壊変現象をいん石の年代を測定する時計代りに用いるとすると，まずこの時計は太陽時のスケールまで絶対に狂うことがないかということが気になる．

現在では，いくつかの異る核種の壊変を利用して測定した年代がお互に矛盾しないことから，いん石や地球などが生成してから経験してきた温度，圧力，重力，原子結合の状態の変化程度では一応影響はないと考えられている．

3. いん石の固化年代測定に用いられる放射性核種

いん石の年代を求めるにはどの放射性核種が適当であろうか．(1), (2) 式から明らかなように，その核種の半減期が求めようとする年代とかけはなれていないことがまず必要である．そのような放射性核種(母核種という)と放射性壊変により生成した核種（娘核種という）の対を 1977 年の核種の表からえらび出し，その半減期と共に表1に示した．

(1) 式から明らかなように，$t=0$ すなわち測定しようとするいん石が生れた時の母核種の数は，現在測定しうる母核種と娘核種の数の和と考えることができる．したがって ^{87}Rb-^{87}Sr の対を例にとると，放射性壊変に関係しない ^{86}Sr に対する比の形として (1) 式は次のように変換される．

$$\left(\frac{^{87}Sr}{^{86}Sr}\right)_p=\left(\frac{^{87}Sr}{^{86}Sr}\right)_0+\left(\frac{^{87}Rb}{^{86}Sr}\right)_p(e^{\lambda t}-1) \quad \cdots(3)$$

ここで "p" は現在 "0" はいん石の固化した時 ($t=0$ の時) をあらわす．娘核種がいん石が生成した時にはいん石中にとりこまれておらず，いん石が生れてからできたものだけがいん石中に蓄積されていれば (3) 式は 0 を通る直線になり，年代はこの直線の傾斜から一義的に求められる．しかし実際には元素生成時に今目的としている娘核種も同時に生成しており，放射性壊変で生成した娘核種と混合している．これは (3) 式の右辺の 1，2 項に相当し，2項が1項にくらべ或程度以上の値をとらないとすなわち娘核種に対し母核種が或程度以上存在しないと正確な年代を求めることはできない．参考のために表1の各核種の下にそれぞれの元素中の目的核種の地球上における存在比を，各核種の横にはカッコ内にそれぞれの核種の太陽系における存在度を珪素原子を 10^6 としてこれに対する値としたものを示した．この数字からたとえば，球粒いん石中には各核種がほぼ太陽系と同じ割合で存在しているので，一般には ^{40}K-^{40}Ca の対で年代測定をすることは不可能であるということがわかる．このことを考慮にいれると，表1から年代測定に用いられる核種の対として，^{40}K-^{40}Ar, ^{87}Rb-^{87}Sr, ^{147}Sm-^{143}Nd, ^{187}Re-^{187}Os, U, Th-Pb, ^4He の5種をえらび出すことができる．

さらに真のいん石の年代を求めるための条件として，母と娘の両核種がいん石生成以来完全にそのいん石の中に，できれば，いん石を構成するそれぞれの成分鉱物の中に保存されていなければならない，ということがあげられる．上にあげた対をみると，^{40}K-^{40}Ar, U, Th→^4He の対では娘核種がアルゴンとヘリウムという希ガスである．一体希ガスが他の核種と同じようにいん石生成以来いん石中に母核種と同じ場所に保持されていたであろうか．拡散して母核種の場所からはなれ，さらにはいん石自体から逸脱してしまっていないだろうかという疑問に遭遇する．そのような理由から，^{40}K-^{40}Ar 年代，U, Th-^4He 年代は現在では固化年代と区別して「気体保持年代」とよばれているので，ここでは一応除外する．

4. 半減期（壊変定数）

(1) 又は (3) 式から明らかなように，年代測定において放射性核種の壊変定数が重要な役割をしめる．表1から明らかなように ^{87}Rb, ^{187}Re は β 壊変してそれぞれ ^{87}Sr, ^{187}Os になる．微弱の β 放射能を直接測定して半減期を測定するのは至難の技であり，半減期の測定には放射能測定以外に既知量の純粋の母核種を含む試薬を10～20 年おいてその間に生成した娘核種を測定するなどの方法が考えられている．^{187}Re の場合は種々の困難さのためにその壊変定数の誤差はまだ ±20% といわれ，正確な年代測定に用いることができない．^{87}Rb の場合はこれまでに 1938 年より実に 31 にものぼる研究が報告されており，その研究報告の 10 年毎の分布をみると 1930 年代 1，40 年代 4，50 年代 12，60 年代 8，70 年代 6 となっている．このことからも ^{87}Rb の壊変定数が最近まで満足すべきものでなかったことをうかがい知ることができる．やっと 2，3 年前よりこれならという値が得られ，国際年代測定委員会で 1977 年に ^{87}Rb の壊変

定数として $\lambda(^{87}Rb)=1.42\times10^{-11}$/年 を使うという提案がなされた．なおこの時 ^{87}Rb-^{87}Sr 年代測定のために必要な他の定数として，$^{85}Rb/^{87}Rb=2.59265$, $^{86}Sr/^{88}Sr=0.1194$, $^{84}Sr/^{86}Sr=0.056584$（いずれも原子比）を使おうというとりきめもなされている．1950 年代後半からこれまで，次々とだされる ^{87}Rb の壊変定数にふりまわされることなく，各研究室で測定した値が相互に比較できるようにと，年代測定の研究者が暗黙裡にとりきめていた ^{87}Rb の壊変定数は 1.39×10^{-11}/年 であった．この壊変定数で求めた年代は高すぎる値を与えるのではないかと近年問題になっていたのである．^{147}Sm, ^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th は α 壊変する．α 壊変の放射能測定は微弱 β 放射能の測定にくらべれば簡単であるといえよう．^{147}Sm に対しては 1970 年に求められた $\lambda(^{147}Sm)=6.54\times10^{-12}$/年 が，$^{238}U$, ^{235}U に対しては 1971 年非常に正確な値が求められた．その値 $\lambda(^{238}U)=0.155125\times10^{-9}$/年，$\lambda(^{235}U)=0.98485\times10^{-9}$/年，$^{232}Th$ に対しては $\lambda(^{232}Th)=0.049475\times10^{-9}$/年 が用いられている．

5. いん石

すでにいん石の解説は本誌でもなされているので，ここでは特に関係のある事のみかいつまんで記す．

衆知の如くいん石は大きく分化したものと分化しないものの2つにわけられる．分化しないものは球粒いん石（コンドライト）とよばれる石質いん石でいん石の母体が固化してから大きな変化をうけなかったと考えられており，太陽系の始源物質はこのようなものであったろうともいわれてきた．落下が目撃されたいん石全体の約85% を占める．化学的見地から鉄の含量の少いものから多いものへ順に LL, L, H; 頑火輝石（エンスタタイト）を主成分とする E; 炭素を含んでいるもの C; の5つのグループにわけられている．

分化したいん石の中には鉄いん石，石鉄いん石，無球粒いん石（アコンドライト）が含まれ，いん石母体中で球粒いん石のようなものが分化して現在の形のようになったと考えられている．無球粒いん石はカルシウムを多く含むグループと少いグループの2つに大別することができる．

6. いん石の固化年代測定

6.1. ^{87}Rb-^{87}Sr 年代

固化年代といえば Rb-Sr 年代といわれる程現在ではこの方法は普遍的なものになっている．この方法を最初にいん石に試みたのは Herzog, Pinson Jr. のグループと Schumacher であり，いずれも 1956 年に発表された．この一番始めの論文をみるといかに当時この方法を適用して年代測定をするのが大変であったかがよくわかる．大きな問題点として次の3つがあげられる．①同位体比測定を含めて地球上の物に汚染されることなくルビジウム，ストロンチウムを分離，分析することの困難さ，②^{87}Rb 半減期の不確実さ，③ $t=0$（いん石ができた時）の ^{87}Sr 存在量の推定．①は技術的な問題であり，②は前述した通り現在までにほとんど解決されてきたといってよい．③は単に技術的な問題にとどまらず，それぞれのいん石が経てきた歴史を包含する値であるので，この20 年間特にこの点を中心に議論がおしすすめられてき

表 2 個々の球粒いん石の年代

いん石の名前	種類	年代（億年）	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$	測定者	（発表年）
Chainpur	LL3	45.17±0.56	0.69830±0.00084	Minster ら	('79)
Krähenberg	LL5	46.0 ±1.0	0.6989 ±0.0005	Kempe ら	('68)
Olivenza	〃	45.8 ±1.6	0.6991 ±0.0010	Sanz ら	('69)
St. Séverin	LL6	45.1 ±1.5	0,69903±0.00020	Manhes ら	('78)
Bruderheim	L6	43.9 ±1.1	0.6995 ±0.0008	島ら	('67)
Peace River	〃	44.6 ±0.5	0.697 ±0.003	〃	(〃)
Tieschitz	H3	45.3 ±0.6	0.69880±0.00020	Minster ら	('79)
Richardton	H5	43.9 ±0.3	0.7003 ±0.0007	Evensen ら	('79)
Guareña	H6	44.6 ±0.8	0.69995±0.00015	Wasserburg ら	('69)
Indarch	E4	44.6 ±1.5	0.7005 ±0.0030	Gopalan ら	('70)
〃	〃	43.93±0.43	0.7005 ±0.0009	Minster ら	('79)
St. Sauveur	〃	44.57±0.47	0.6993 ±0.0014	〃	〃
St. Marks	E5	43.35±0.50	0.69979±0.00022	〃	〃
Allende	C3	46	0.69880	Weatherill ら	('73)
〃	〃	—	0.69877±0.00002	Gray ら	('73)
〃	〃	—	0.69871±0.00008	立本ら	('76)

表 3 各球粒いん石グループの年代

球粒いん石の種類	年 代（億年）	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$	測定者	（発表年）
LL	44.6 ±0.6 (12)*	0.7005 ±0.0003	Gopalan ら	('69)
	44.80±0.40 (?)	0.69899±0.00020	Minster ら	('79)
L	43.9 ±1.4 (5)	0.7008 ±0.0010	Gopalan ら	('68)
	44.4 ±1.2 (6)	0.7003 ±0.0004	Minster ら	('79)
H	45.9 ±1.4 (19)	0.6983 ±0.0024	Kaushal ら	('69)
	45.2 ±0.5 (7)	0.69876±0.00040	Minster ら	('79)
E	44.4 ±1.3 (8)	0.6993 ±0.0015	Gopalan ら	('79)
	45.08±0.37 (4)	0.69880±0.00044	Minster ら	('79)
C	(45.9) (5)	(0.6983)	Kaushal ら	('70)

* カッコ内の数字は分析したいん石の数を示す.

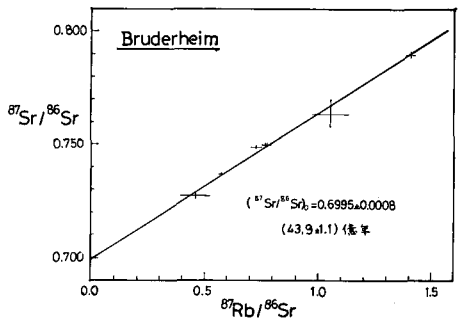

図 1 Rb-Sr 法による球粒いん石 Bruderheim の年代測定例

たといえそうである.

まずいん石から抽出したルビジウムとストロンチウムを分析した値を用いてかいた図を示す(図1). この図をアイソクロンとよび, (3) 式から明らかなように傾斜から年代が求められ, 直線が縦軸をきる点がいん石ができた時の $^{87}Sr/^{86}Sr$ の値となる. 図1のようにルビジウムとストロンチウムの比が異るいくつかのいん石構成成分を分析することができれば個々のいん石の年代およびいん石ができた時の $^{87}Sr/^{86}Sr$ の値が求められる.

球粒いん石では限られた量の試料（たとえば 1g～10g 程度）を用いて1個のいん石を構成している鉱物成分の測定するに足る量を分離することがむずかしいので, 個々のいん石の年代を求めるために種々の工夫をこらしたり, あるいは許されるものでは 200～1000g の試料を用いてきた. こうしてこれまでに求められた個々のいん石の年代を表2に示す. またいん石の項でのべたそれぞれのグループは同じ起源と考えてよいのではないかという仮定にたって構成成分にわけることなく, 1個のいん石をそのまま使って得たいくつかの同種のいん石のデータからグループの年代を求めた. それを表3に示す.

表2, 表3のデータを一瞥してみると, まずこれまでいわれてきたように, 球粒いん石の年代は必ずしも一定であるとは限らないことがわかる. たとえばHグループの球粒いん石では, 誤差を考えても Tieschitz と Richardton は同じ年令であるとはいえないし, Richardton はHグループ全体の年令よりも低い. 1つのいん石を異る研究室で別々に測定したものはお互によくあっているので, このちがいは事実であるといえそうである. 鉱物成分にわけたけれども個々の値がちってアイソクロンにのらないので年代を求めることができないといういん石もいくつかあり, それらは表2にはのせていない. そのようないん石でも, 構成成分にわけないで求めたデータはグループとしてのアイソクロンにのるものがある. これらのいん石は, いん石ができてから後いん石同志の衝突やいん石内部の熱によって変成作用や再結晶がおこったがそれはいん石全体からルビジウムなどの逸脱をまねく程大きなものでなかったといえよう. グループとしての年代も, LLグループやHグループでは, 全体としてのアイソクロンにのるいん石が多いのにLグループではアイソクロンにのりにくいものが多いという. 特にLグループに属するいん石で他の研究から明らかに宇宙空間で衝突などによる衝撃をうけたと考えられているいん石や角礫状のいん石にはアイソクロンにのらないものが多い. E, およびCグループの球粒いん石は個々のいん石毎に特有の性質をもち, グループは同じでも同一起源とは考えにくい. またより原始的な構成成分をもっていると考えられている Abee, Allende, Orguille などがその構成成分にアイソクロンにのらぬものが多いのは興味深い. これらのいん石の母体が原始太陽星雲から凝集するのにある程度の時がかかりそのままいん石全体としての調和が行われなかったせいか, あるいは原始太陽星雲自身が現在考えられている程一様でなかったせいか

表 4 分化したと考えられているいん石の年代

いん石の名前	年代（億年）	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$	測定者	（発表年）
無球粒いん石				
Ca 含量が低い——→Sr 含量も低い——種類の無球粒いん石				
Bishopville	36 ±2	0.7015 ±0.0020	Compston ら	('65)
Norton County	45 ±1	0.700 ±0.002	Bogard ら	('67)
	43.9 ±0.4	0.7005 ±0.0004	Minster ら	('76)
Ca 含量が高い——→Sr 含量も高い——種類の無球粒いん石				
Angra Dos Reis	43.8 ±2.4	0.69883±0.00002	Wasserburg ら	('77)
Nakhla	13.4 ±0.2	0.70232±0.00006	Papanastassiou ら	('74)
〃	12.1 ±0.1	0.70254±0.00003	Gale ら	('75)
Binda (Ha)*	34.50±3.40	0.69901±0.00006	Birck ら	('79)
Kapoeta (Ha)*	A 38.1 ±0.5	0.69888±0.00005	Papanastassiou ら	('76)
	B 35.5 ±0.8	0.69905±0.00006		
	C 44.4 ±1.2	0.69885±0.00004		
	ρ —	0.69903±0.00014		
Béréba (Eu)**	40.8 ±2.6	0.69898±0.00007	Birck ら	('78)
Ibilira (Eu)**	44.2 ±2.5	0.69895±0.00010	〃	(〃)
Juvinas (Eu)**	45.0 ±0.7	0.69898±0.00005	Allègre ら	('75)
Shergotty (Eu)**	1.65 ±0.11	0.72260±0.00012	Nyquist	('79)
Sioux County (Eu)**	41.0 ±0.14	0.69897±0.00008	Birck ら	('78)
Stannern (Eu)**	32 ±5	—	〃	(〃)
玄武岩質無球粒いん石 (6)	43.0 ±2.3	0.69899±0.00005	Papanastassiou ら	('69)
〃 (10)	42.4 ±4.9	0.69902±0.00007	Birck ら	('79)
鉄いん石中の石質包含物				
Colomera	45.1 ±0.04	0.69940±0.00004	Sanz ら	('70)
Kodai Kanal	37 ±1	0.713 ±0.020	Burnett ら	('67)
Weekeroo Station	46 ±1	0.699 ±0.003	Wasserburg ら	('65)
〃	42.8 ±2.3	0.703 ±0.003	Burnett ら	('67)
鉄いん石中の石質包含物 (6)	45 ±2	0.699 ±0.003	〃	(〃)

* ハワーダイトとよばれる Ca 含量が高い無球粒いん石中の1つの種類に属する.
** ユークライトとよばれる Ca 含量が高い無球粒いん石中の1つの種類で玄武岩質無球粒いん石ともよばれている.
カッコ内の数字はグループとしての年代を求めるのに用いたいん石の数.

どちらかであろう.

$(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ の値は図1のように外挿点としても求められるが実際にルビジウムがストロンチウムにくらべ極端に少量しか含まれていないような成分がいん石から分離できればより正確な値を得ることができる.

Allende いん石の中に他の研究から，おそらく最も早い時期に原始太陽星雲から凝集したであろうと考えられている構成成分がある．これを分離し，ストロンチウムを測定したところ，表2に示すように最も低い $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ の値を得ることができた.

分化したいん石，たとえば無球粒いん石や鉄いん石の中に不純物として陥入している石質物質は比較的結晶形が大きいのでそれぞれの構成鉱物に分離しやすい．個々のいん石についての詳しい研究はこれらのいん石からはじまったといえよう．今日までに得られている結果を表4に示す．カルシウム含量の多い無球粒いん石はストロンチウムも多く含むため Rb/Sr の値は非常に低いと考えられる．表4から，特に Angra Dos Reis といういん石とユークライト（表4のいん石の名前のあとにカッコ内に Eu とかいてあるもの）とよばれる一群の玄武岩質無球粒いん石で特に低く，表2，3にある球粒いん石の方が時とすると高い程であることがわかる．Allende の包

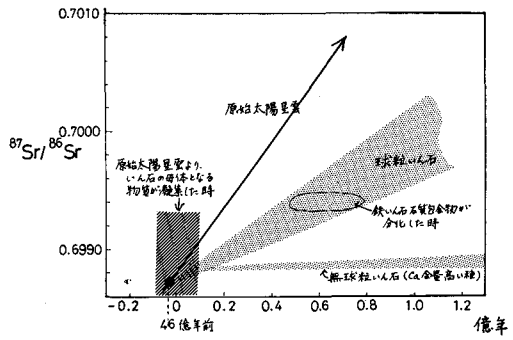

図 2 初生 $^{87}Sr/^{86}Sr$ の値から推定されるいん石母体の生成時期

含物から最も低い $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ の値が測定されるまでは，これまでの，球粒いん石状のものが分化して無球粒いん石や鉄いん石ができたという通念をあるいはひっくり返さねばならないのではないかとさえ考えられていた．どうして $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ の値がそれ程重要なのか．その概念を図2に示す．図2は簡素化した概念だけであって実際にいん石が生成する機構はもっと複雑であるのはもちろんである．

球粒いん石のルビジウムとストロンチウムの平均組成では $^{87}Sr/^{86}Sr$ の値を 0.001 増加させるのに約1億年かかる．原始太陽星雲が現在の太陽の中のルビジウムとストロンチウムの比と同じような値であったとすると原始太陽星雲中では約 1/3 億年しかかからない．Ca 含量が高い無球粒いん石では時とすると 10 億年あるいはそれ以上かかる．しかし相当早い時期に原始太陽星雲や球粒いん石状のものからわかれないと，表4に示されているような低い $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ の値をうることができない．分化が比較的早い時期にいん石の年令にくらべかなり短時間でおこったであろうことは表4の鉄いん石中の石質包含物の Rb-Sr 年代を研究した Coromera や Weekeroo Station といういん石の結果からも推論される．このように Rb-Sr 年代測定からもいん石が原始太陽星雲から分離した時期や期間を計算することができるようになってきた．

表4の無球粒いん石や鉄いん石の中には他のいん石にくらべ年代の非常に短かいものがある．これらは $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ の値からみてもその時期に原始太陽星雲から，あるいは球粒いん石状のものから分化したのではなく，その時期にいん石同志の大衝突による破壊などというルビジウム，ストロンチウムなどの元素組成をかえる程の大異変がおこったのであろうということが図2と対比して理解される．

なお表2，3，4の古いデータは前述した新しい ^{87}Rb の壊変定数を使って計算し直してある．

6.2. ^{147}Sm-^{143}Nd 年代

この年代測定法は近年希土類元素の分離分析技術の進展と共に開発された方法である．

この方法の利点は① ^{147}Sm が α 壊変をして ^{143}Nd になる②サマリウムもネオジウムも希土類元素に属する元素であり，化学的物理的性質が非常によく似ている．このためいん石など年代測定しようとするものがその歴史の間でうけた小事件，たとえば他のいん石などとの小衝突に伴う衝撃による変成作用や再結晶作用によっても母核種，娘核種が共に行動する可能性がルビジウムとストロンチウムの対にくらべずっと大きい，ということであろう．

この方法による年代測定は (3) 式の ^{87}Rb を ^{147}Sm に ^{87}Sr を ^{143}Nd に ^{86}Sr を ^{144}Nd におきかえることにより Rb-Sr 法と同じような手法で行われる．中村らにより求められた無球粒いん石 Pasamonte のアイソクロンと年代を図3に示す．この方法はまだはじまったばかりで，分析しやすい無球粒いん石で行われ，球粒いん石では1例があるにすぎない．これまでに求められた年代を Rb-Sr 法および後にのべる Pb-Pb 法で求められた年代と対比して表5に示す．無球粒いん石 Pasamonte のように Rb-Sr 法ではデータがばらつく，すなわち小衝撃による変成，再結晶作用がその歴史においてあったものや，Stannern のように大衝撃をうけていることが他の研究からは証明され，Rb-Sr 法でも明らかに非常に低い年代しか与えないようないん石についてもこの方法によれば年代を求めることができる．

6.3. ^{187}Re-^{187}Os 年代

^{187}Re が β 壊変して ^{187}Os になる反応を利用した Re-Os 法は他の方法とは異る利点をもっている．すなわちこれまでのべてきたルビジウム，ストロンチウム，サマリウム，ネオジム，これからのべるウラン，トリウム，鉛は鉄いん石や石鉄いん石の鉄相の中にはいらない．これに反しレニウム，オスミウムは鉄相の中に濃縮する傾

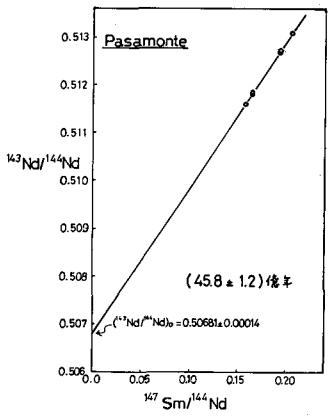

図 3 Sm-Nd 法による無球粒いん石 Pasamonte の年代測定例（中村らによる）

向があるので，鉄いん石や石鉄いん石の年代はこの方法でないと求められないのである．

Rb-Sr 法の項で鉄いん石の年代は不純物として含まれている石質の中のルビジウムとストロンチウムを測定するとのべた．鉄いん石に石質の不純物が存在するのは稀であり，またそれを測定しても鉄いん石の年代を示すとはいえない．このように大切な方法でありながら，1950年代後半から 1960 年代前半にかけてスイスとドイツのグループが共同で測定した唯一の例しかないのはレニウム，オスミウムの特異な化学的，物理的性質に由来する．特に微量のオスミウムの質量分析は至難の技とされている．この問題が解決されれば単に鉄いん石，石鉄いん石に関してだけではなく地球上の金属，硫化金属鉱床の年代や成因などに多くの知見を与えることは確実である．

6.4. U, Th-Pb, (He) 法

いん石の年代を求めようという最初の試みはこの方法にはじまったといってよい．1930 年代にすでに鉄いん石中のウランとヘリウムを分析して年代を求めようと試みている．ヘリウムは気体であるがもう1つの娘核種鉛は固体として母核種ウラン，トリウムと共にいん石中に留まっているはずである．ところがウランやトリウムは10～14 段の α および β 壊変を経て最終的に安定な娘核種である鉛になる．この間には種々の物理的，化学的性質の異る元素種を経過して変換してゆく．したがって母核種と娘核種のちがいは，単にウラン，トリウムと鉛だけのちがいにとどまらないのでルビジウムとストロンチウムの差よりさらに大きいことは容易に理解される．

1953年 Patterson は表1に示されるようにウランの質量数が 238 と 235 の同位体が，それぞれ独立に壊変して共に質量数は異るが鉛の同位体になることに着目し，2つの反応を組合わせれば (4) 式のようになり，鉛だけを測定すれば年代が測定できることを示した．

$$\frac{(^{207}Pb/^{204}Pb)_p-(^{207}Pb/^{204}Pb)_0}{(^{206}Pb/^{204}Pb)_p-(^{206}Pb/^{204}Pb)_0}=\left(\frac{^{235}U}{^{238}U}\right)_p\frac{e^{\lambda_{235}t}-1}{e^{\lambda_{238}t}-1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

^{204}Pb は放射性壊変の影響をうけない鉛の安定同位体で，$(^{235}U/^{238}U)_p$ は現在の質量数 235 と 238 のウランの同位体の比であり，137.8 と一定である．

1955年 Patterson は鉄いん石 Canyon Diablo と Henbury からとり出したトロイライトと球粒いん石 Forest-city と Modoc，無球粒いん石 Nuevo Laredo から抽出した鉛の同位体比を測定していん石の年代 4.5×10^9 年を与えた．

Pb-Pb 法で求めた年代は親核種との関係に由来する影響をうけないので Sm-Nd 法よりもさらにいん石が生成してから経験してきた小異変に対しては無縁であるといえよう．

Pb-Pb 法のこれまでの問題点は球粒いん石の年代も無球粒いん石の年代もすべていん石が出来た時の鉛の同位体比は Canyon Diablo の中のトロイライトから抽出した鉛と同一の同位体比をもつとして計算されたいわゆる「モデル年代」であった点である．これは Patterson がウランは硫化物にはいりにくいが，鉛は硫化物に濃縮されることに着目し，いん石が生成した時トロイライトにとりこまれた鉛はその後ウラン壊変生成物の影響をうけなかったであろうと仮定したのがはじまりである．その後多くの人により他のいん石中のトロイライトから抽出された鉛も分析されたが，Canyon Diablo のトロイライトからの鉛より低い同位体比を与えるものが発見されなかった．

2，3年前より，Pb-Pb 法でも1個のいん石，あるいは1種類のいん石を使って年代を求めようという試みがなされているが，こうして得られた初生鉛の同位体比も Canyon Diablo のトロイライトの鉛の同位体比に非常に近い値を与えている．Pb-Pb 法のアイソクロンを図4に，いくつかのいん石から求めた初生鉛の同位体比を表6に示す．

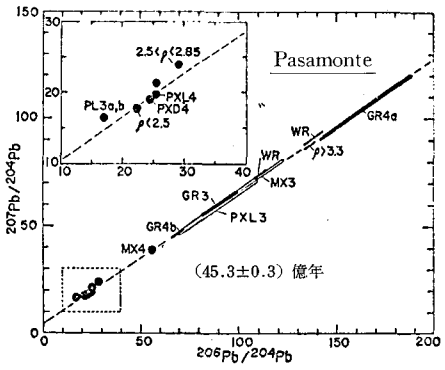

図 4　Pb-Pb 法による無球粒いん石 Pasamonte の年代測定例（立本らによる）

母核種ウランとの関係も，もう1つの鉛の同位体になる母核種トリウムと鉛の関係と共にその後も研究が続けられている．分析法の発達と共に母娘の関係は初期にみられた程その不一致の度合は大きくないが，それでもウラン，トリウムが 20～30% 程度も低すぎるものもある．これらはデータの不確実性によるものではなく，Rb-Sr のデータのばらつきと同じようにいん石の経歴を示すものと考えてよい．

7. おわりに

以上いん石の固化年代研究についての現状をのべてきた．^{187}Re 以外の母核種の半減期もすでに正確に求めら

表 5 Rb-Sr, Sm-Nd, Pb-Pb 年代の対比（単位：億年）

いん石の名前	^{87}Rb-^{87}Sr	^{147}Sm-^{143}Nd	^{207}Pb-^{206}Pb
Angora Dos Reis	43.8±2.4[1]	45.5±0.4[2]	45.44±0.01[1] 45.55±0.05[3]
Juvinas	45.0±0.7[4]	45.6±0.8[2]	45.56±0.14[3]
Pasamonte	45.5[5]	45.8±1.2[6]	45.3 ±0.3[6]
Stannern	32 ±5[5]	44.8±0.7[2]	
Moore County	(43.0±2.6)[7]	46.0±0.4[6]	
Modoc	(44.4±1.2)[8]	40.3±0.4[6]	45.3 ±0.15[3]

Rb-Sr 年代でカッコにいれてあらわしてある数字はこのいん石で求めた年代ではなくグループの 1 つとして求められた年代.

1) Wasserburg ら, 2) Lugmair ら, 3) 立本ら, 4) Allégre ら, 5) Birck ら, 6) 中村ら, 7) Papanastassiou ら, 8) Gopalan らにより求められた値.

表 6 初生鉛の同位体比

研究者	(発表年)	$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{208}Pb/^{204}Pb$
Patterson	(1953)	9.41	10.27	29.16
Patterson	(1955)	9.50	10.36	29.49
Murthy & Patterson	(1962)	9.56 ±0.14	10.42 ±0.16	29.71 ±0.45
Oversby	(1970)	9.346±0.009	10.218±0.015	28.96 ±0.05
立本ら	(1973)	9.307±0.006	10.294±0.006	29.476±0.018
Cumming	(1969)[1]	9.460±0.122	10.327±0.131	…
Tilton	(1973)[2]	9.310	10.296	(29.57)
Heuy & Kohman	(1973)[3]	9.302	10.291	…
立本ら	(1976)[4]	9.595	10.453	…

1) 6 個の鉄いん石，8 個の球粒いん石，1 個の無球粒いん石のデータから求めた値.
2) Mezö-Madaras（球粒いん石）から得られた初生鉛の同位体比.
3) 16 個の球粒いん石によるアイソクロンから求められた初生鉛の同位体比.
4) Orgueil の初生鉛の同位体比（放射起源のものが混入している）.
点線の上の同位体比は Canyon Diablo 中のトロライトから抽出した鉛の同位体比.
1973 年に求められた値は起源の如何によらず非常によく一致している．現在 Pb-Pb 法ではこの値を用いて年代を求めそれをモデル年代とよんでいる.

れ，いん石からのレニウム，オスミウム以外の核種の分離分析法も非常に高い水準に達しており，これまでに予測することもできなかった程正確なデータが得られるようになった．これらの方法を用いて得られた新しいデータを比較検討すると原始太陽星雲からいん石の母体が凝集した時期は (45.5±0.3) 億年前であり，たとえば無球粒いん石 Juvinas を例にとると (45.5±0.1) 億年前には分化し，45.2～44.5 億年前までに変成や再結晶は完成し現在に至っているということができる．球粒いん石の場合には大部分のいん石が 5 千万年以内に大きな変成，再結晶作用を完了しているようである．これに反し，無球粒いん石や鉄いん石には非常に若い年代を与えるものがあることは興味深い，今後この種の研究は Rb-Sr, Sm-Nd, Pb-Pb 法，あるいは Pb-Pb, U-Pb, Th-Pb 法という組合せで行われ，年代のみでなく，いん石の生成過程，生成してからの変遷を追求してゆくような形で行われるのではないだろうか.

方法自体の問題から，石質いん石についての研究は非常によく行われているが，石鉄いん石，鉄いん石については無に等しい．今後この方面の研究が進むことを切に願うものである.

☆ ☆ ☆