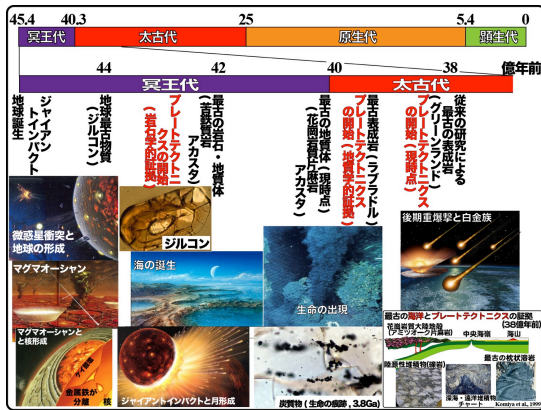


広島大学集中講義 2015

小宮 剛
東京大学, 駒場

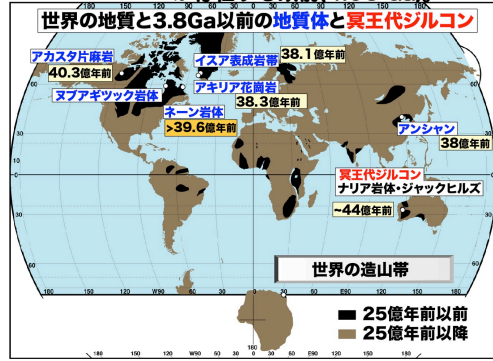


広島大学 集中講義

15日: 12:50~14:20 概要
15日: 14:35~16:05 初期地球
15日: 16:20~17:50 セミナー

16日: 8:45~10:15 地球史: 固体地球進化
16日: 10:30~12:00 地球史:
表層環境・生命進化
16日: 12:50~14:20 エディアカラ紀
~カンブリア紀
16日: 14:35~16:05 後生動物の進化
と多様化
(カンブリア爆発)

冥王代とは: 地球上で最古の地質体(岩石) が存在する以前(4.03 Ga)



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

親核種 P → 娘核種 D 壊変定数 λ (半減期 $\tau = \frac{\ln 2}{\lambda}$)

$$\frac{dP}{dt} = -\lambda P$$

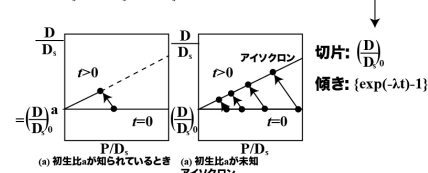
$$P = P_0 \exp(-\lambda t) \quad P_0 = P \exp(\lambda t)$$

$$D = D_0 + (P_0 - P) \quad \text{増加分}$$

$$D = D_0 + P[\exp(\lambda t) - 1]$$

安定同位体 Ds で割る (比の方が精度良く分析できるので)。

$$\left(\frac{D}{D_s}\right) = \left(\frac{D_0}{D_s}\right) + \left(\frac{P}{D_s}\right) [\exp(\lambda t) - 1] \quad y = a + bx$$



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) ₀	壊変形式	半減期(年)
K-Ar (Ar-Ar)	⁴⁰ K	⁴⁰ Ar	³⁶ Ar	=295.5	電子捕獲(EC)	1.25 x 10 ⁹ *
Rb-Sr	⁸⁷ Rb	⁸⁷ Sr	⁸⁶ Sr	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) ₀	β	4.88 x 10 ¹⁰
U-Pb (Pb-Pb)	²³⁸ U	²⁰⁶ Pb	²⁰⁴ Pb	(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) ₀	α, β	4.47 x 10 ⁹
	²³⁵ U	²⁰⁷ Pb	²⁰⁴ Pb	(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb) ₀	α, β	7.04 x 10 ⁸
Th-Pb	²³² Th	²⁰⁸ Pb	²⁰⁴ Pb	(²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb) ₀	α, β	1.40 x 10 ¹⁰
Sm-Nd	¹⁴⁷ Sm	¹⁴³ Nd	¹⁴⁴ Nd	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) ₀	α	1.06 x 10 ¹¹
Lu-Hf	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Hf	¹⁷⁷ Hf	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) ₀	β	3.57 x 10 ¹⁰ *
La-Ce	¹³⁸ La	¹³⁸ Ce	¹⁴² Ce	(¹³⁸ Ce/ ¹⁴² Ce) ₀	β	9.87 x 10 ¹⁰ **
La-Ba	¹³⁸ La	¹³⁸ Ba	¹³⁷ Ba	(¹³⁸ Ba/ ¹³⁷ Ba) ₀	電子捕獲(EC)	
Re-Os	¹⁸⁷ Re	¹⁸⁷ Os	¹⁸⁶ Os	(¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁶ Os) ₀	β	4.23 x 10 ¹⁰

*⁴⁰Kとしての半減期, ⁴⁰Kは電子捕獲のほかβ壊変して⁴⁰Caを生成するので, ⁴⁰K-⁴⁰Ca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⁴⁰Caの存在割合が多いので放射性起源⁴⁰Ca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。

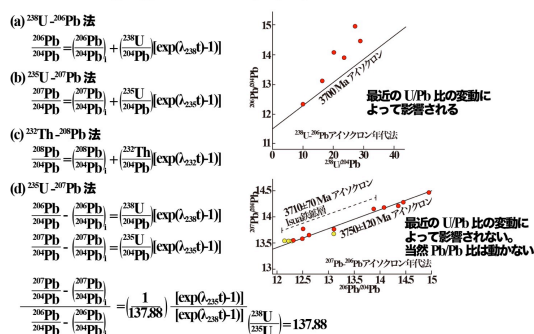
**¹³⁸Laとしての半減期

鉛同位体

$$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8\alpha + 6\beta, \quad \lambda_{238} = 0.155125 \times 10^{-9} \text{ /yr} \quad (3.21)$$

$$^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb} + 7\alpha + 4\beta, \quad \lambda_{235} = 0.98485 \times 10^{-9} \text{ /yr} \quad (3.22)$$

$$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + 6\alpha + 4\beta, \quad \lambda_{232} = 0.049475 \times 10^{-9} \text{ /yr} \quad (3.23)$$



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, %)
²³⁴ U	0.0055 (2)	²⁰⁴ Pb	1.4 (1)
²³⁵ U	0.7200 (51)	²⁰⁶ Pb	24.1 (1)
²³⁸ U	99.2745 (106)	²⁰⁷ Pb	22.1 (1)
		²⁰⁸ Pb	52.4 (1)

注1) 表3.1と同じ出典による。

注2) 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3) 年代測定の対象となる地質学的試料では、カッコ内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

一致年代、不一致年代

^{238}U - ^{206}Pb 法、 ^{235}U - ^{207}Pb 法、 ^{207}Pb - ^{206}Pb 法、(^{232}Th - ^{208}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

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

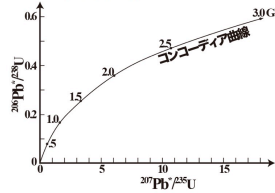
$$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}} = \frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}} + \frac{^{235}\text{U}}{^{235}\text{U}} [\exp(\lambda_{235}t) - 1] \Rightarrow \frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}} = \frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}} + [\exp(\lambda_{235}t) - 1]$$

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

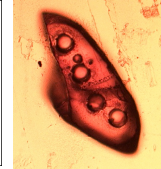
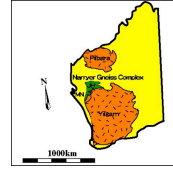
$$t = \frac{1}{\lambda_{235}} \ln \left[1 + \frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}} \right]$$

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

(^{206}Pb) = (^{207}Pb) = 0 のとき、
元々 Pb (鉛同位種) が含まれない時

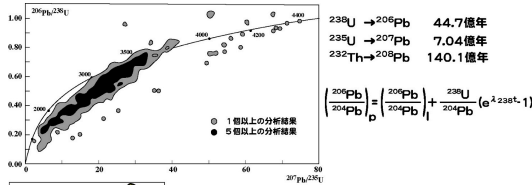


**地球最古の物質 (鉱物) を含む礫岩
—岩石とは鉱物又は岩片の集合体—**



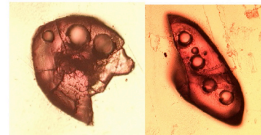
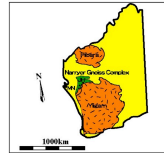
最古のものでは
44億年前のものも

最古の鉱物



$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ 44.7億年
 $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ 7.04億年
 $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ 140.1億年

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

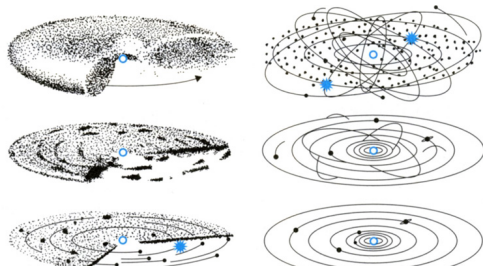


分析点の大きさが30マイクロン

初期地球の研究

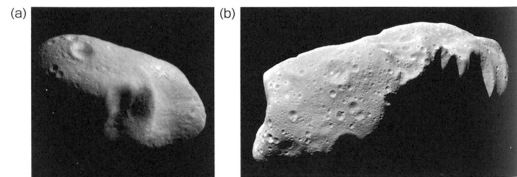
- ① 隕石、月、火星など
- ② 計算科学
- ③ 地球物質学的研究

太陽系の形成モデル

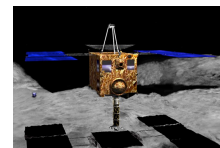


原始太陽を取り巻くおびただしい微惑星が衝突を繰り返し、サイズの大きくなったものが惑星となった。

**衝突合体を免れたもの
隕石や小惑星として存在**



(a) 小惑星エロス (17.5 × 6.5km)
(b) 小惑星イダ (58 × 23km)



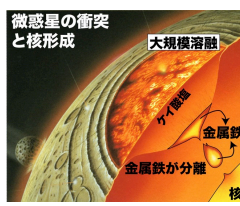
**微惑星の衝突による成長
(0.4地球半径で大気の形成)**



マグマオーシャン(0.5地球半径)



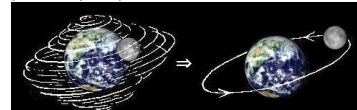
**微惑星の衝突
と核形成**



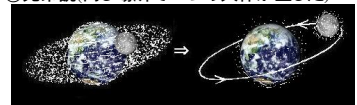
月の起源



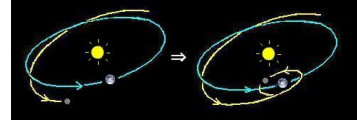
① 親子説(分離)



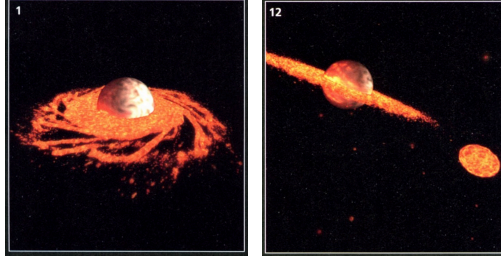
② 兄弟説(同じ場所で二つの天体が生じた)



③ 捕獲説(地球が捕獲天体を捕獲)



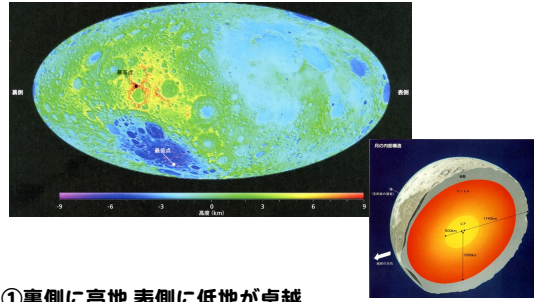
ジャイアントインパクトと月の形成



月の特徴

- (1)化学組成:揮発性ガスが極端に少ない。
- (2)全月組成はFeに乏しい,地球のマントルの組成に似ている。
- (3)異常に大きな衛星
- (4)全角運動量がとても大きい。

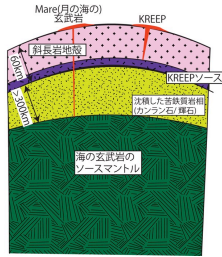
③地球と月の表層と内部構造の違い



- ①裏側に高地,表側に低地が卓越。
- ②高地は斜長岩,低地は玄武岩,隕石孔の底にも斜長岩。

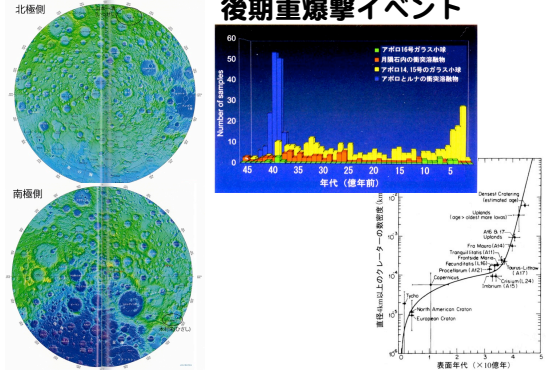
アポロ計画の成果

- (1)月には斜長岩地殻が存在
→マグマオーシャンの時に低密度の為、浮遊。
- (2)KREEPと呼ばれる。液相濃集元素(マグマに濃集する元素)にとむ特殊な玄武岩が存在する。
→マグマオーシャンの時の上(斜長岩)と下(鉄に富むカンラン岩)から固化し、最後に残された液に富む中間層起源

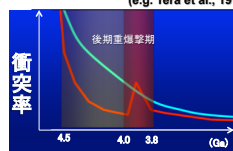
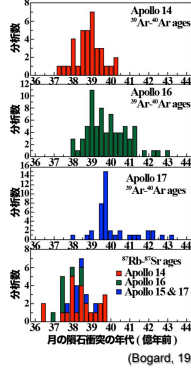


マグマオーシャンの実証

月のクレーターとクレーター年代学と後期重爆撃イベント



後期重爆撃(LHB)仮説 (Late Heavy Bombardment or lunar cataclysm) (e.g. Tera et al., 1973; 1974)



後期重爆撃仮説の主な根拠

- 天体衝突に起因する月の溶融岩石の年代が、
- ①40億年より古いものは少なく、
- ②大部分がこの短い期間(38-40億)に集中する
- 集中的な天体衝突により盆地の多くがつけられた？(数億の年代がリセット)

数値計算による推定

ガス濃量(木星や土星)の軌道移動が原因？ (e.g. Goman et al., 2006)

LHB仮説への反論

- ①一つの衝突盆地から飛来したものをみているだけ
- ②サンプリングバイアスの可能性
- ③古い記録が残っていないだけ

地球の組成を直接推定 -マントル起源の岩石を探す-

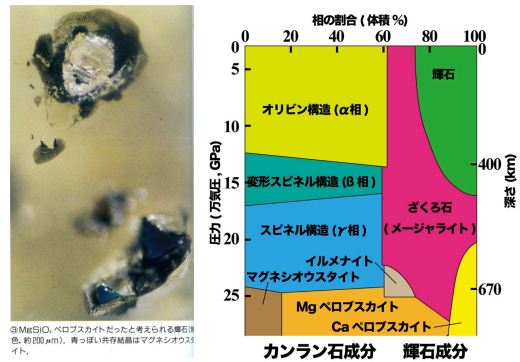
どのような所でとれ



マントルの石 (2) どんな石？



ダイヤモンド中の包有鉱物は下部マントル物質も運ぶ！！



太陽系の組成(太陽の組成)

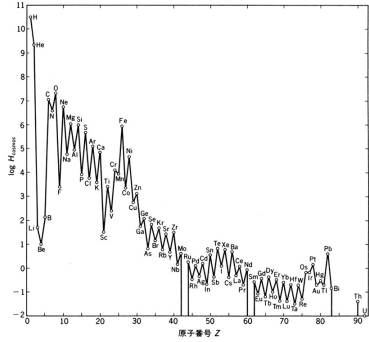
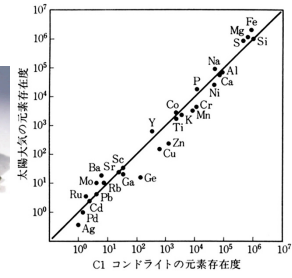


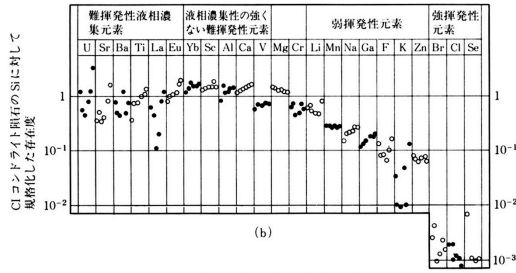
図 6.1 元素の宇宙存在度 H_{sun} と原子番号 Z との関係(□, Si 原子の数を 10^6 に規格化してある, 存在度の数値(現在に対する値)は表 6.1 にあわせてある

太陽系の組成(宇宙存在度)と炭素質コンドライトの組成

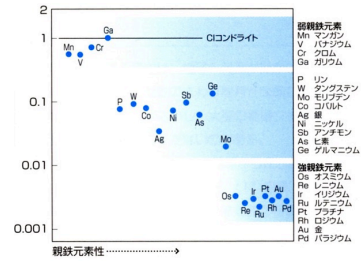


ガス成分以外はよく一致

地球の組成 (揮発性元素)

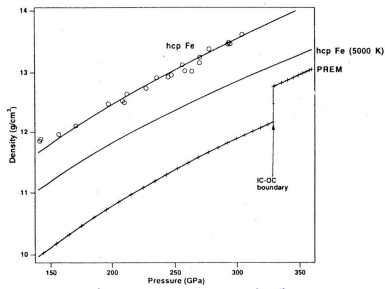


マンツルの組成(親鉄元素)



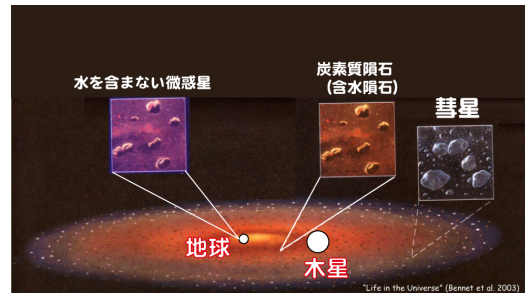
- ① 親鉄性元素はマンツルに少ない
- ② 強親鉄性元素もマンツルに含まれる
- ③ 強親鉄性元素濃度は一定

コア:内核(固体)と外核(液体)と密度欠損



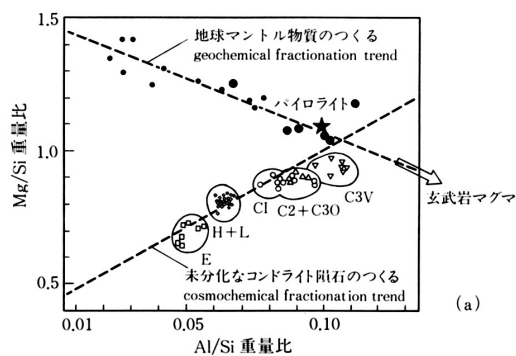
軽元素(Si, O, H, C, S)が溶け込んでいる

地球を作った物質はどこから



太陽-地球(1AU) 太陽-火星(1.5AU)
太陽-含水隕石(>2AU) 太陽-木星(5AU)

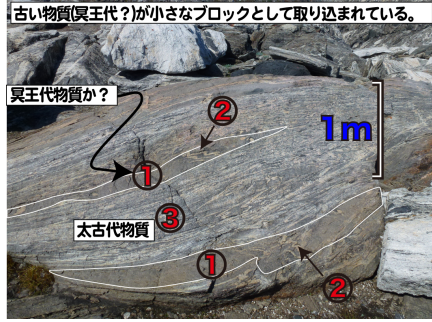
地球の組成と隕石の組成



冥王代の物質研究

- ① 地質学的研究 (残存微小岩の探索)
- ② 鉱物学的研究 (包有物の研究)
- ③ 地球化学的研究(消滅核種の研究)

① 地質学的研究 (残存微小岩の探査)



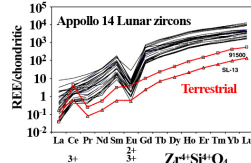
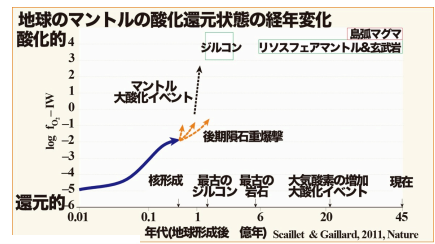
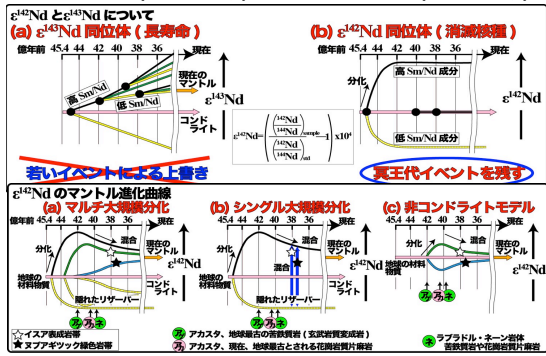
繰り返し火成活動が起き、古い部分がほぼ完全に消失。
→古いところを探し、選択的に研究!!

② 鉱物学的研究 (包有物の研究)



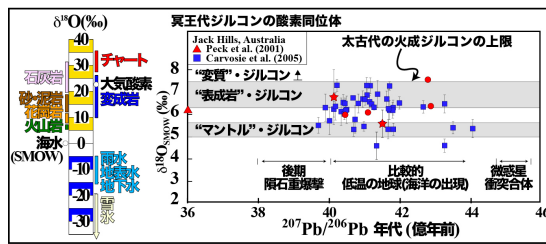
③ 地球化学的研究(消滅核種の研究)

$^{146}\text{Sm} \rightarrow ^{142}\text{Nd}$ (6800万年) $^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd}$ (1060億年)



既にマントルは現在同様に酸化的

冥王代物質の化学組成に関する研究 冥王代における海洋の証拠



包有物研究

① ほぼ全ての矽石に包有物は含まれる。

② 百数十の矽石中の包有物が同定。(Raman, SEM, C1像)

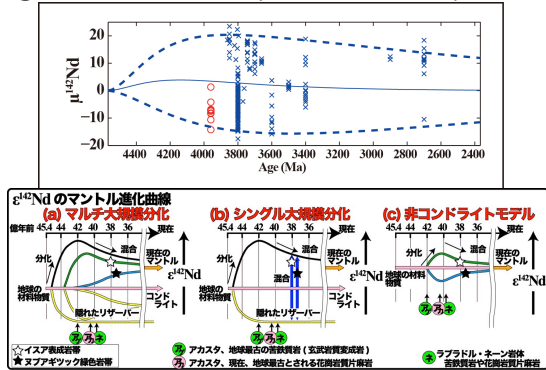
③ ms, qz, bt, ap, hbl, xenotime, monazite, FeOOH, K-fid, pl, rt, chl, Ni-rich Py, ab, thortite

④ そのうち化学組成が得られたもの、7粒 ms(6粒), hbl(1粒)

magnetite?

Maas et al., 1992 Peck et al., 2001 Trail et al., 2004 Cavosie et al., 2004 Menneken et al., 2007 Hopkins et al., 2008

③ 地球化学的研究(消滅核種の研究)



W同位体と核形成

