

隕石年代学のターニングポイント

～CAIとコンドリュールの年代学～

いとう しょういち

伊藤 正一

北大・自然史科学・地球惑星システム（坎本研）

e-mail: sitoh@ep.sci.hokudai.ac.jp



隕石年代学
Meteorite Chronology
イ藤 正一
Itou Seiichi



はじめに

本講演のテーマ

**初期太陽系, 極初期数百万年間に形成した
固体物質の年代決定における問題点.**

初期太陽系形成史



✓ 原始星



✓ 古典的TTS段階



✓ 主系列星

隕石母天体



分子雲



最古の固体物質



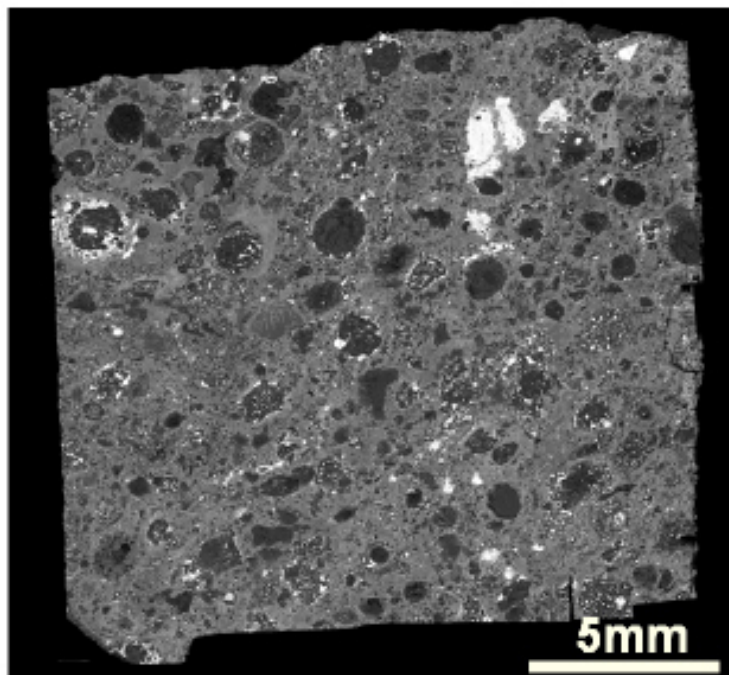
~2 My

4567 My

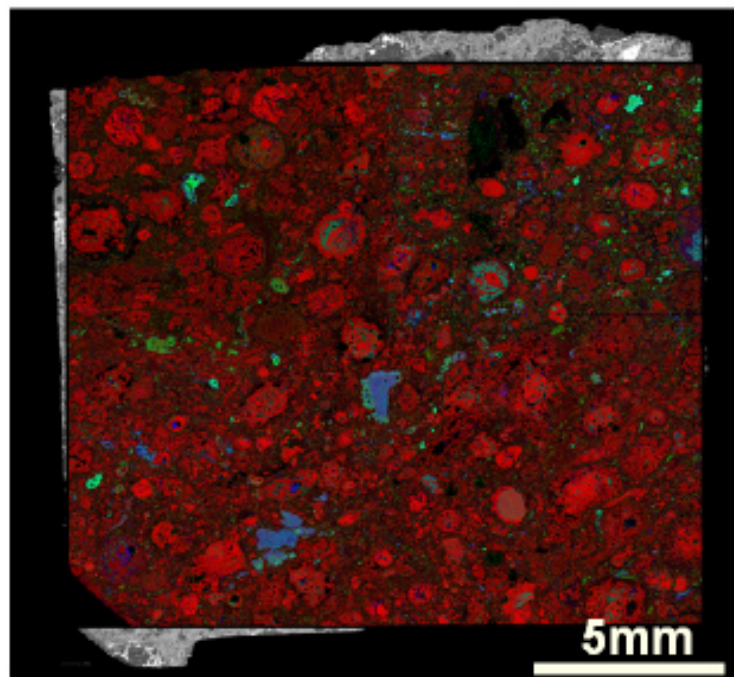
4563 My

Time

コンドライト隕石の構成物質



コンドライト隕石の構成物質

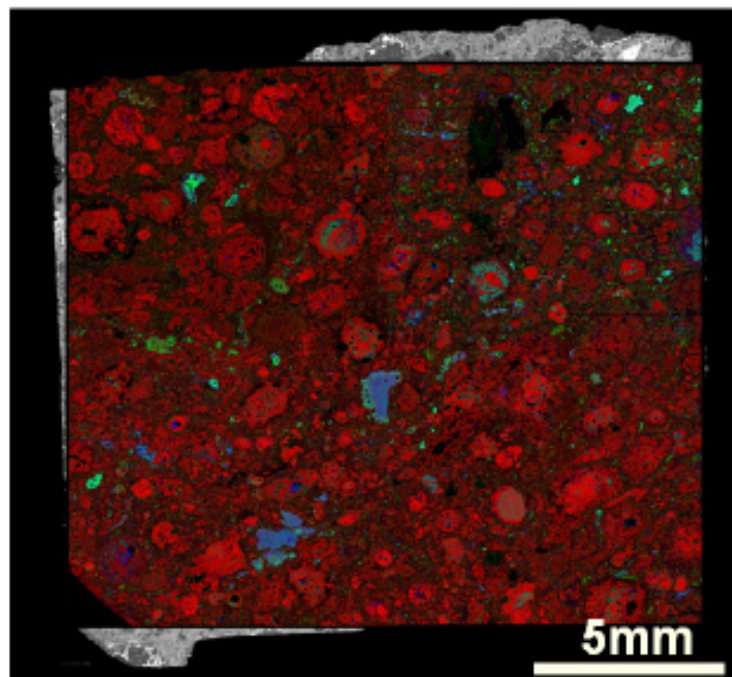


R: Mg

G: Ca

B: Al

コンドライト隕石の構成物質



難揮発性包有物

- **Ca-Al-rich Inclusion (CAI)**

- **オリビン集合体 (AOAs)**

Spinel (MgAl_2O_4)

Melilite ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$)

コンドリュール

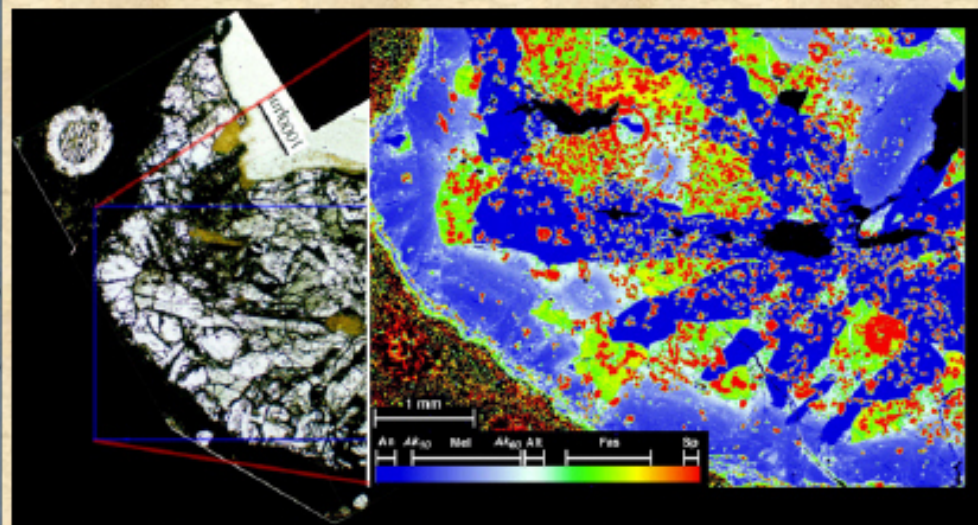
Mg-Fe silicates

Olivine (Mg_2SiO_4)

Enstatite (MgSiO_3)

難揮発性包有物(粗粒CAIと細粒CAI)

粗粒CAI (液適から結晶化)

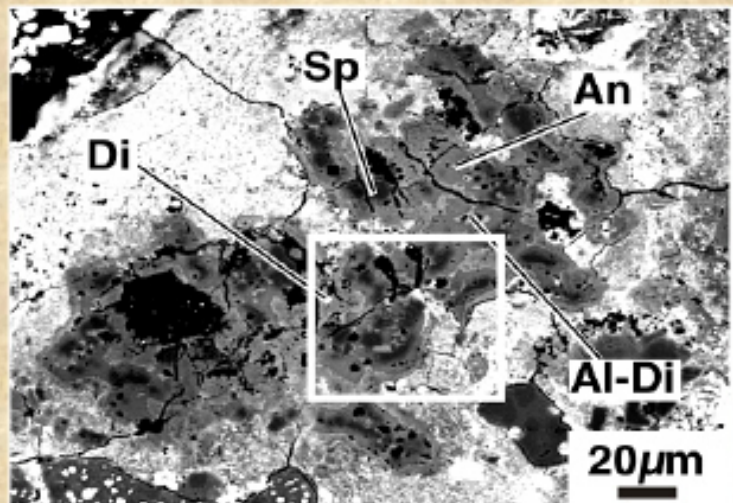


溶融起源

- 結晶が大きい
(mmサイズ)
- 火成作用ゾーニング
- 平衡結晶化実験
(Stolper, 1982)

難揮発性包有物(粗粒CAIと細粒CAI)

細粒CAI (ガスから結晶化)

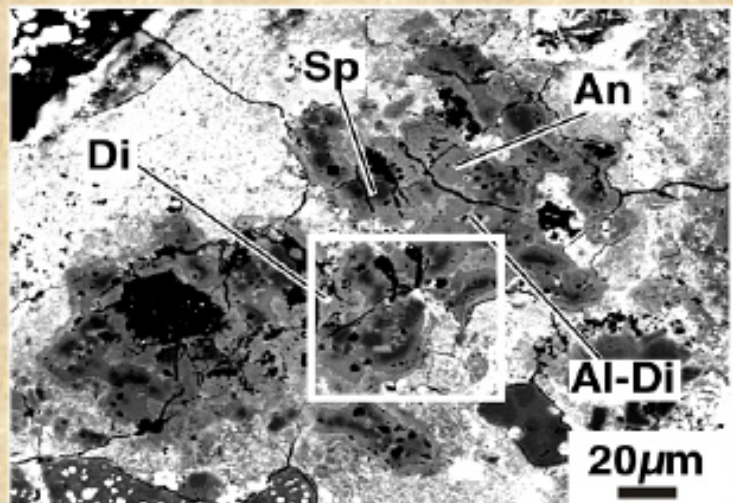


凝縮起源?

- 結晶が小さい
(~5 μ m以下)
 - 外形が不規則
 - 同心円状に結晶成長
- (MacPherson et al., 1988)

難揮発性包有物(粗粒CAIと細粒CAI)

細粒CAI (ガスから結晶化)

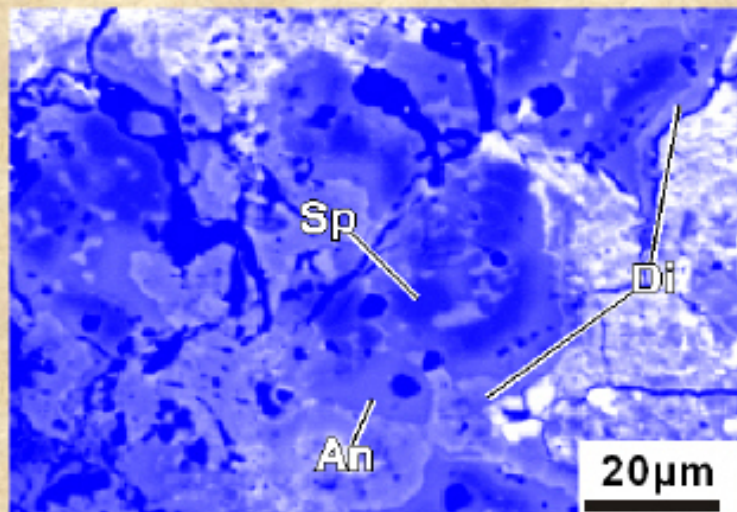


凝縮起源?

- 結晶が小さい
($\sim 5\mu\text{m}$ 以下)
- 外形が不規則
- 同心円状に結晶成長
(MacPherson et al., 1988)

難揮発性包有物(粗粒CAIと細粒CAI)

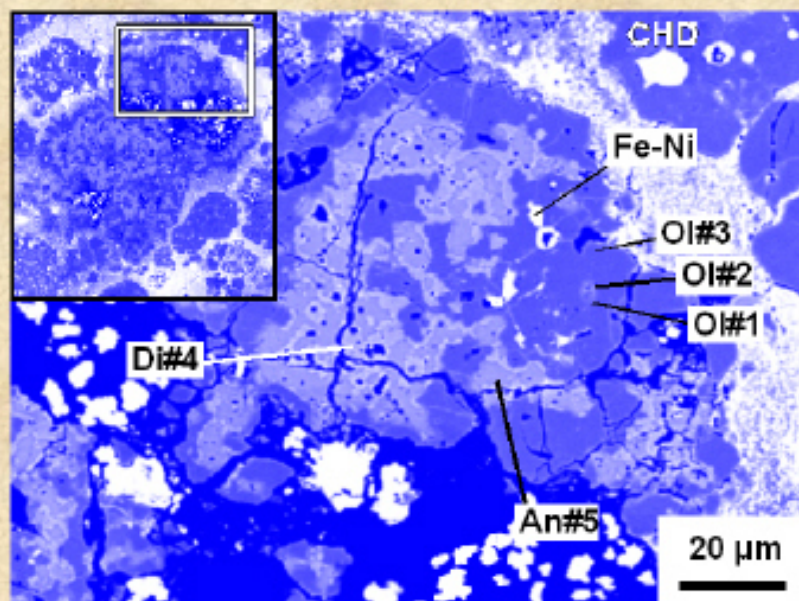
細粒CAI (ガスから結晶化)



凝縮起源?

- 結晶が小さい
(~5μm以下)
- 外形が不規則
- 同心円状に結晶成長
(MacPherson et al., 1988)

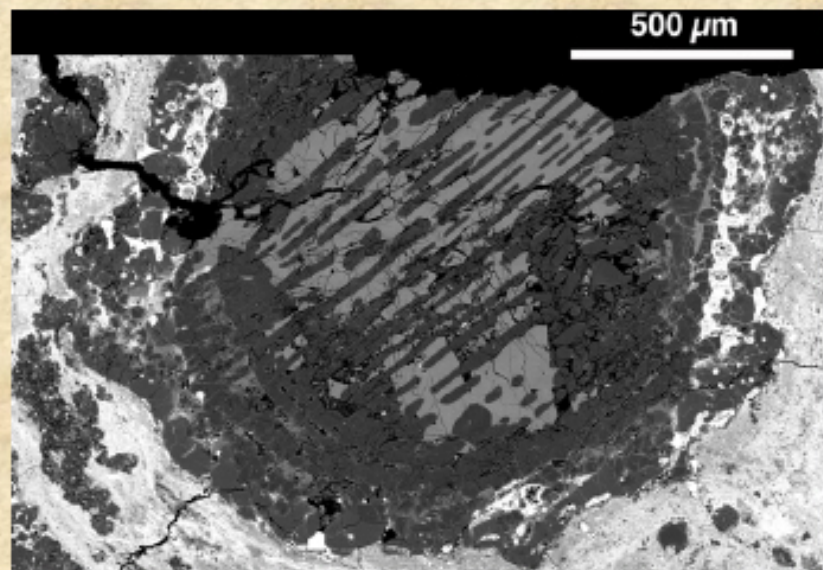
難揮発性包有物 (オリビン集合体:AOAs)



凝縮起源？

- 結晶が小さい
($\sim 5\mu\text{m}$ 以下)
- 外形が不規則
- 結晶格子間にメルトが存在
(Komatsu et al., 2003)

コンドリュール



溶融起源

- 結晶が大きい

(mmサイズ)

- 外形が丸い物か不定形
までさまざま

- 急冷結晶が存在

形成環境(1)物理化学

crystallization Peak Temp. Cooling rate

難揮発性包有物

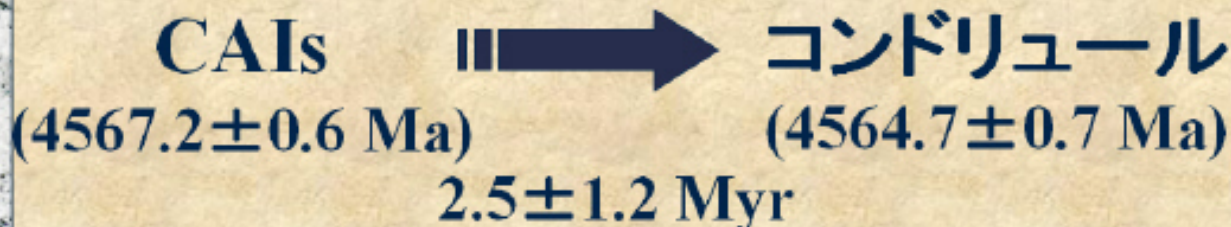
✓ 粗粒CAI	Melting	$>1400^{\circ}\text{C}^{*1}$	$\sim 1-100 \text{ (K/h)}^{*1}$
✓ 細粒CAI	Condensation?	$>1300^{\circ}\text{C}^{*2}$	?
✓ AOAs	Condensation?	$>1300^{\circ}\text{C}^{*2}$	?

コンドリュール	Melting	$1500-1900^{\circ}\text{C}^{*3,4}$	$10-1000 \text{ (K/h)}^{*4}$
---------	---------	------------------------------------	------------------------------

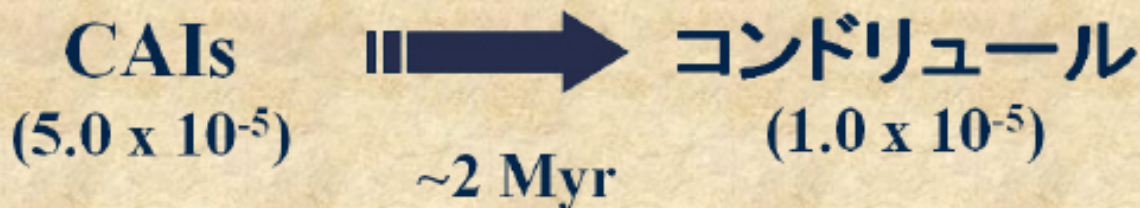
*1 Stolper, 1982; *2 Ebel and Grossman., 2001; *3 Lofgen, 1996; *4 Hewins and Connolly, 1996

時間軸 (1) (時間差200万年)

Pb-Pb model age (Amelin et al. 2002)



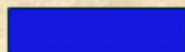
Al-Mg model age (e.g., Kita et al. 2000)



時間軸 (1) (時間差200万年続き)

Al-Mg CAI

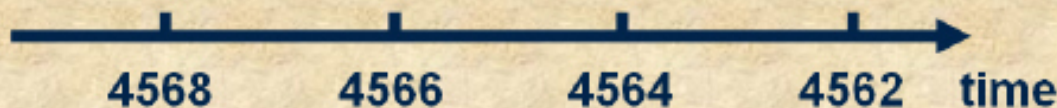
Pb-Pb CAI



Pb-Pb CHD



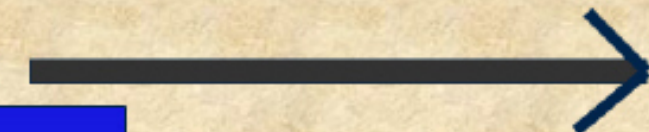
Al-Mg CHD



時間軸 (1) (時間差200万年続き)

Al-Mg CAI

Pb-Pb CAI



Pb-Pb CHD

Al-Mg CHD



4568

4566

4564

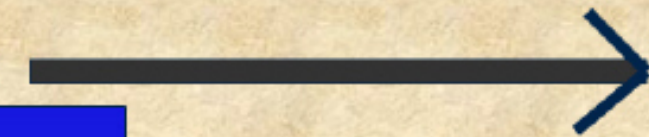
4562

time

時間軸 (1) (時間差200万年続き)

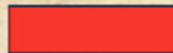
Al-Mg CAI

Pb-Pb CAI



Pb-Pb CHD

Al-Mg CHD



4568

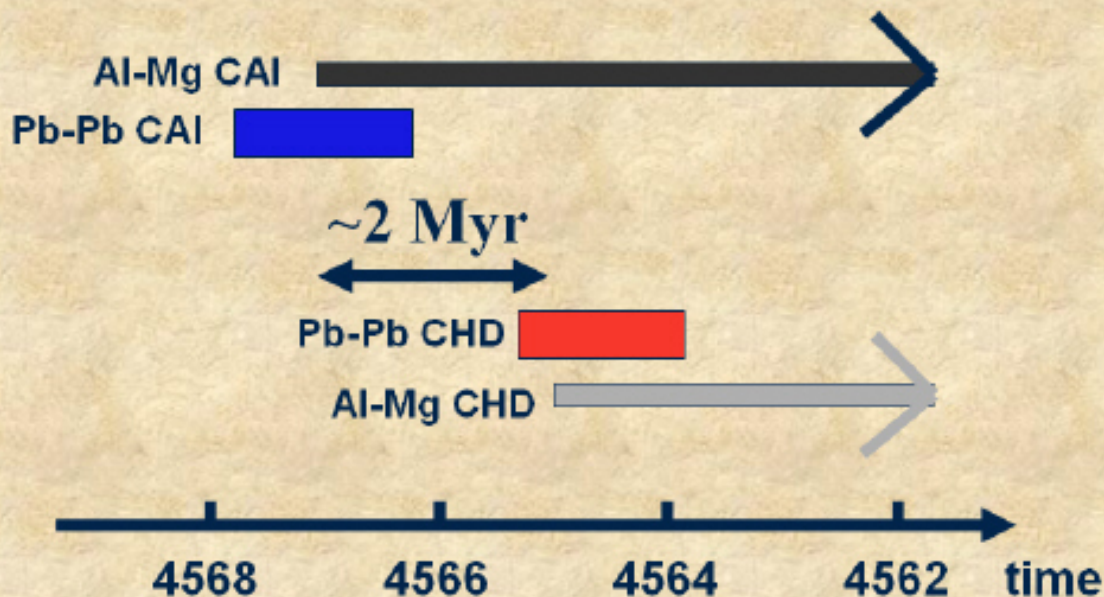
4566

4564

4562

time

時間軸 (1) (時間差200万年続き)



時間軸(2) 同時形成

Al-Mg spot CAI

Pb-Pb CAI

Pb-Pb CHD

Al-Mg spot CHD

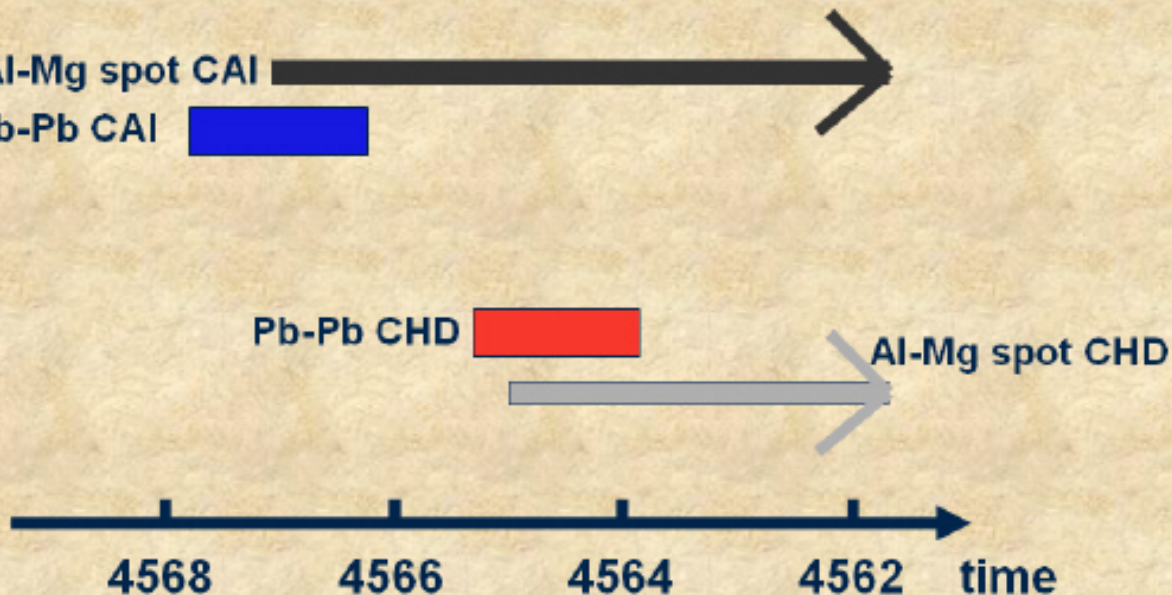
4568

4566

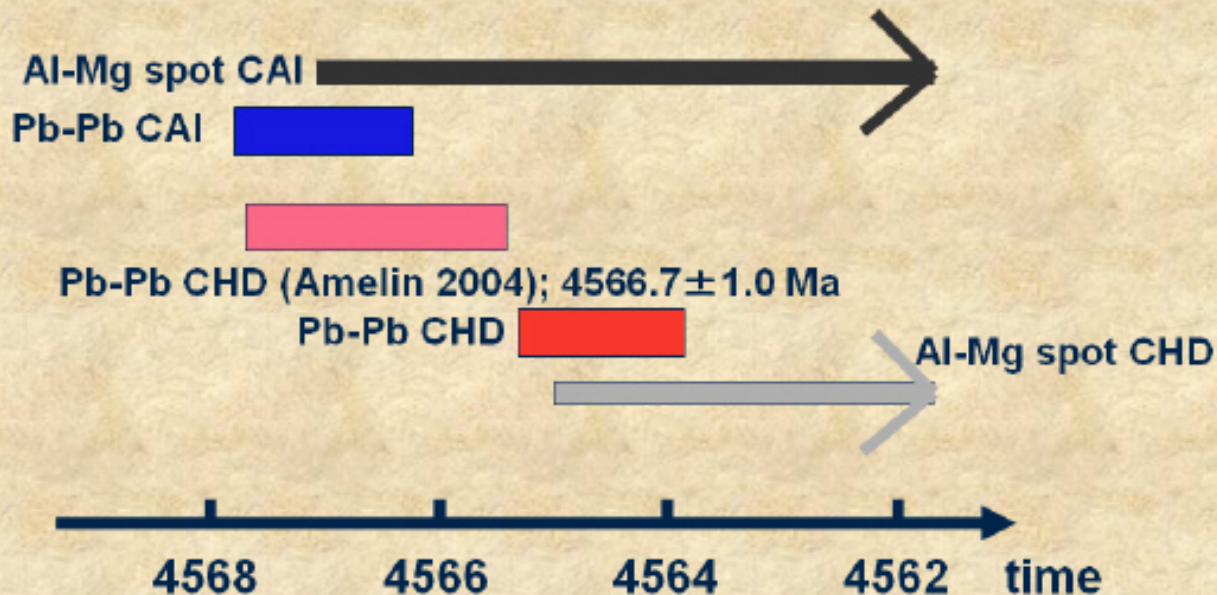
4564

4562

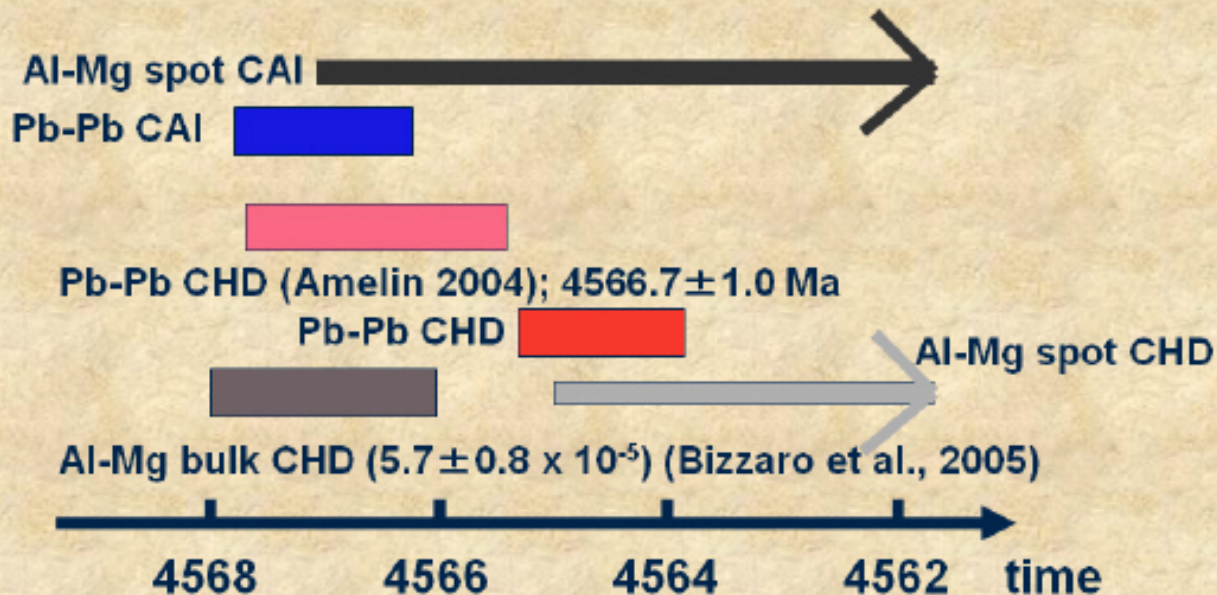
time



時間軸(2) 同時形成

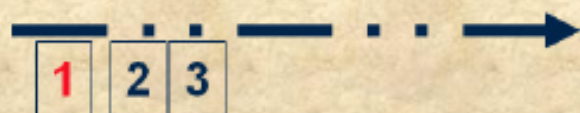


時間軸(2) 同時形成

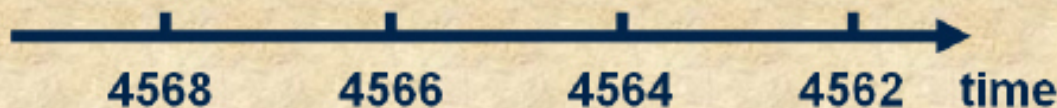


複数回加熱イベントによる年代考察

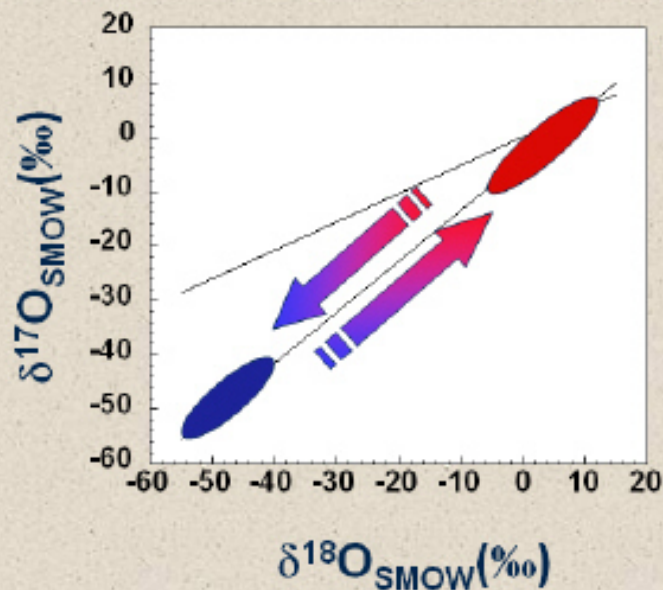
Al-Mg spot CAI



Al-Mg spot CHD



酸素同位体トレーサー



結晶時の酸素同位体環境を反映

1st: ^{16}O -rich, 2nd ^{16}O -poor

1st: ^{16}O -poor, 2nd: ^{16}O -rich

環境変動

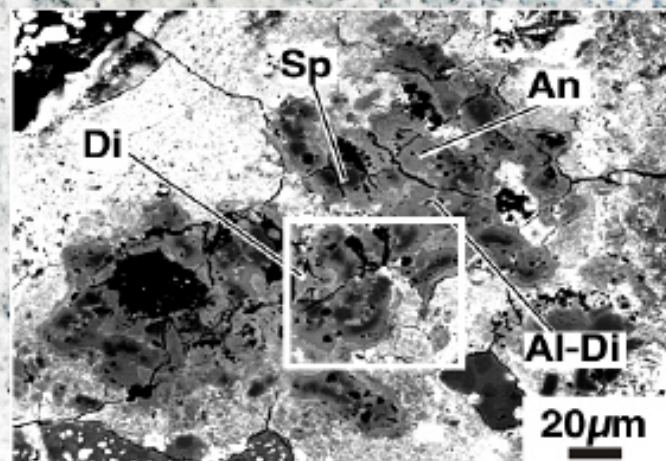
^{16}O -rich $\Rightarrow$ ^{16}O -poor

^{16}O -poor $\Rightarrow$ ^{16}O -rich

$$\delta^i\text{O}_{\text{SMOW}} (\text{‰}) = ((i\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{unk}} / (i\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{std}} - 1) \times 1000 \quad (i=17, 18)$$

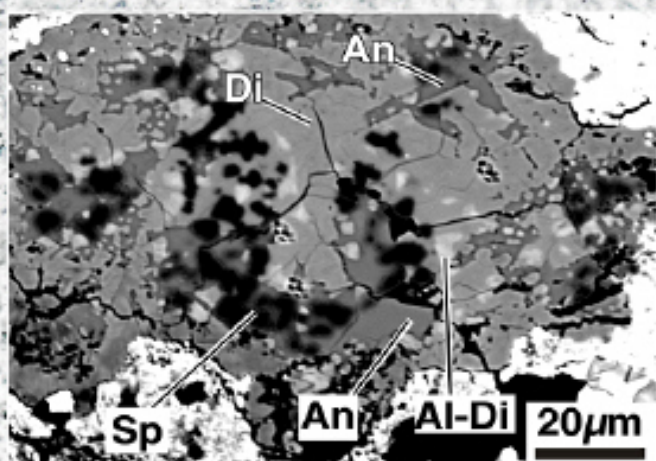
複数回加熱イベントの例(細粒CAIを例にして)

凝縮起源



隠微晶質
他形

部分溶融起源



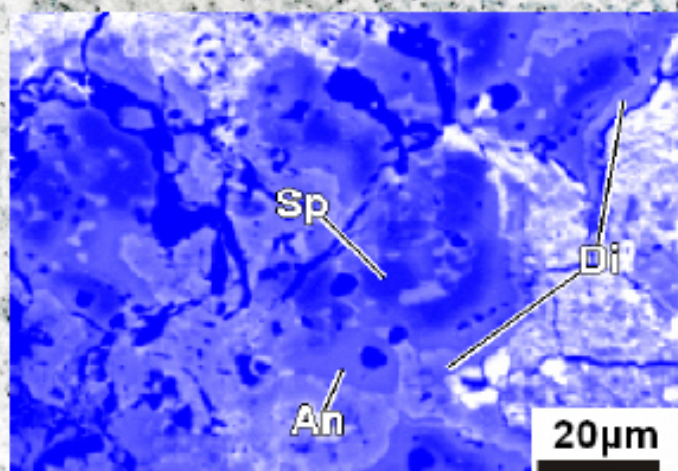
微晶質

Bulkの化学組成一致

自形性強い

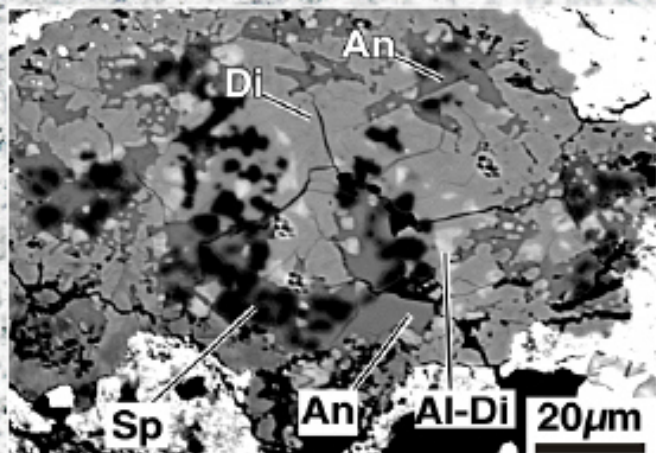
複数回加熱イベントの例(細粒CAIを例にして)

凝縮起源



隠微晶質
他形

部分溶融起源



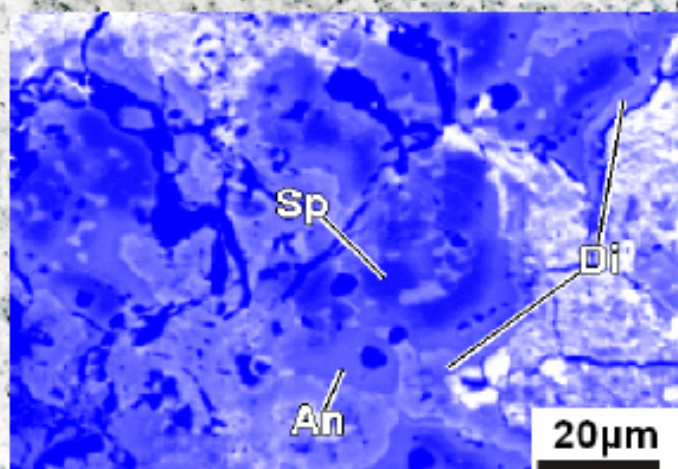
微晶質

Bulkの化学組成一致

自形性強い

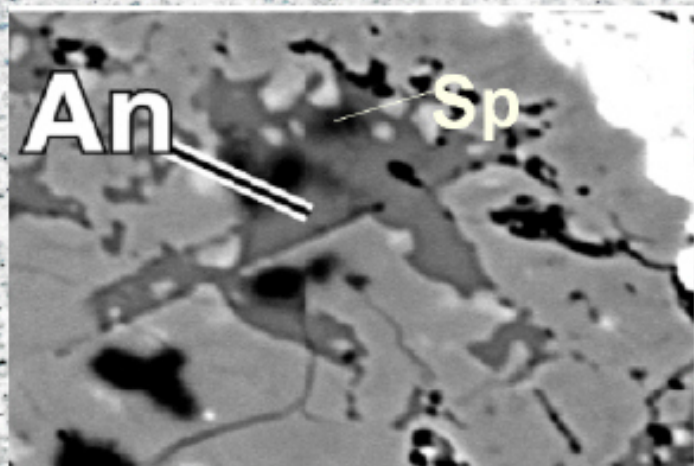
複数回加熱イベントの例(細粒CAIを例にして)

凝縮起源



隠微晶質
他形

部分熔融起源



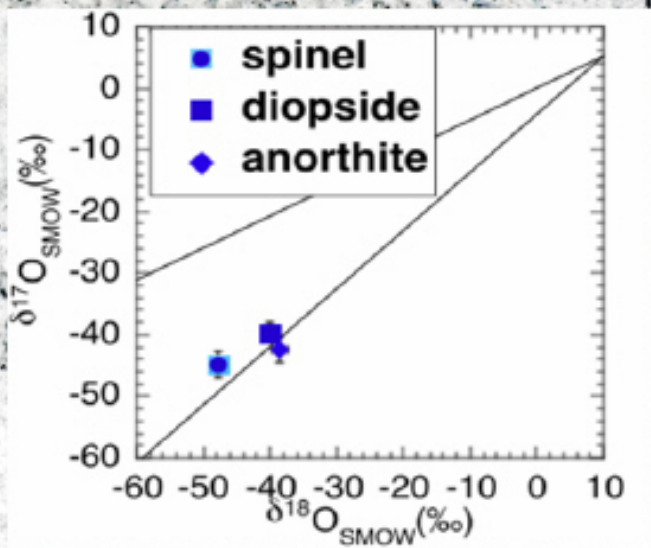
微晶質

Bulkの化学組成一致

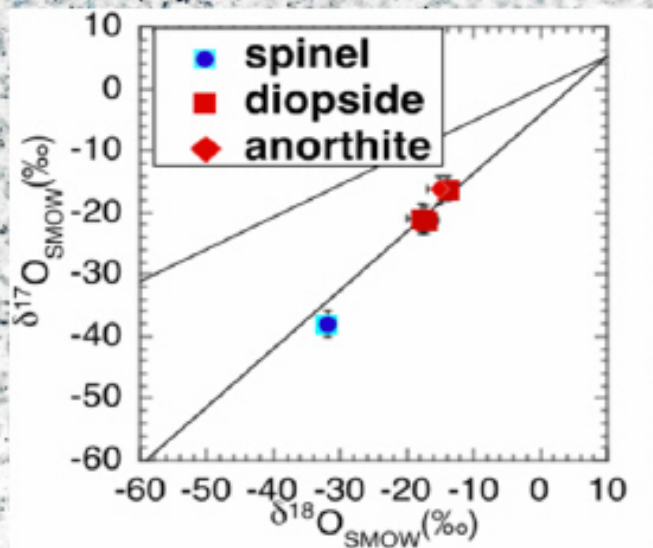
自形性強い

複数回加熱イベントの例(細粒CAIを例にして)

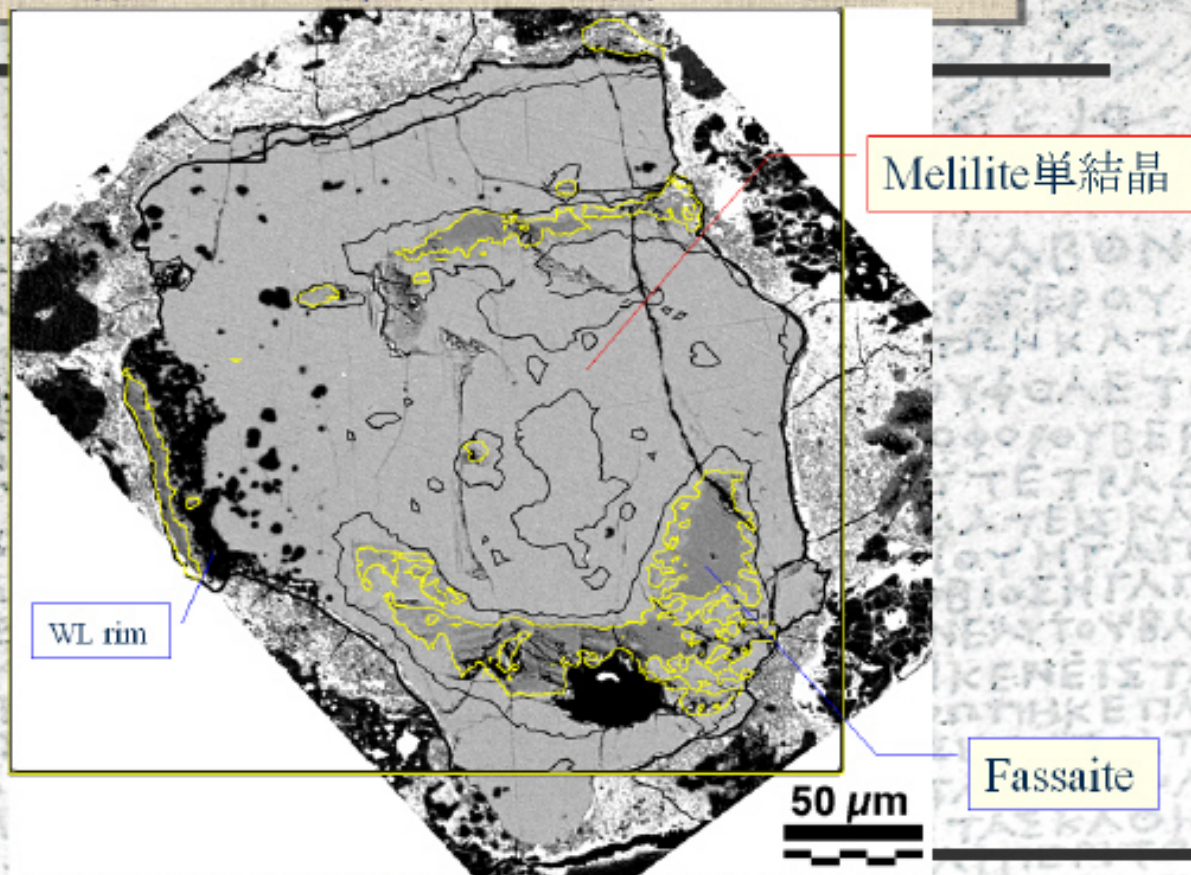
凝縮起源



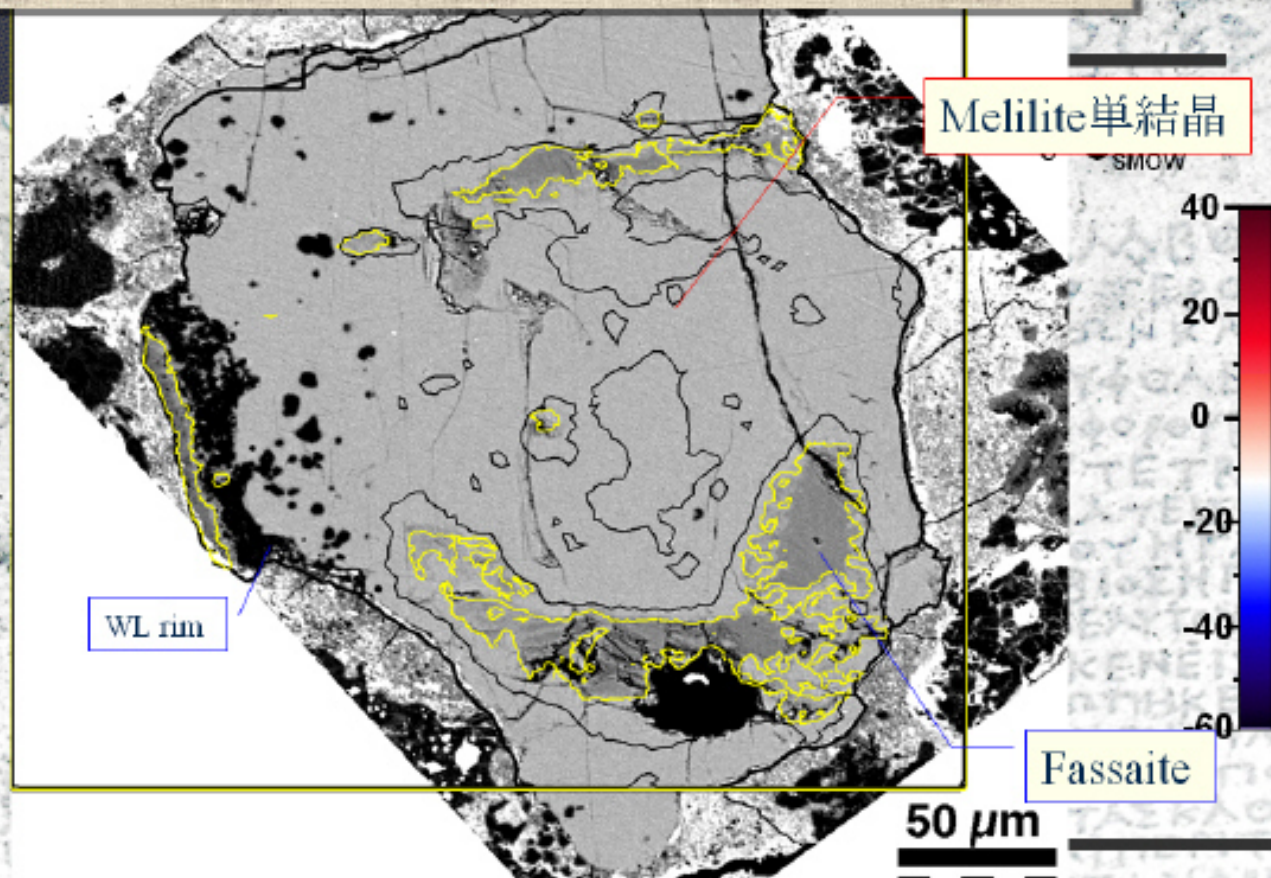
部分熔融起源



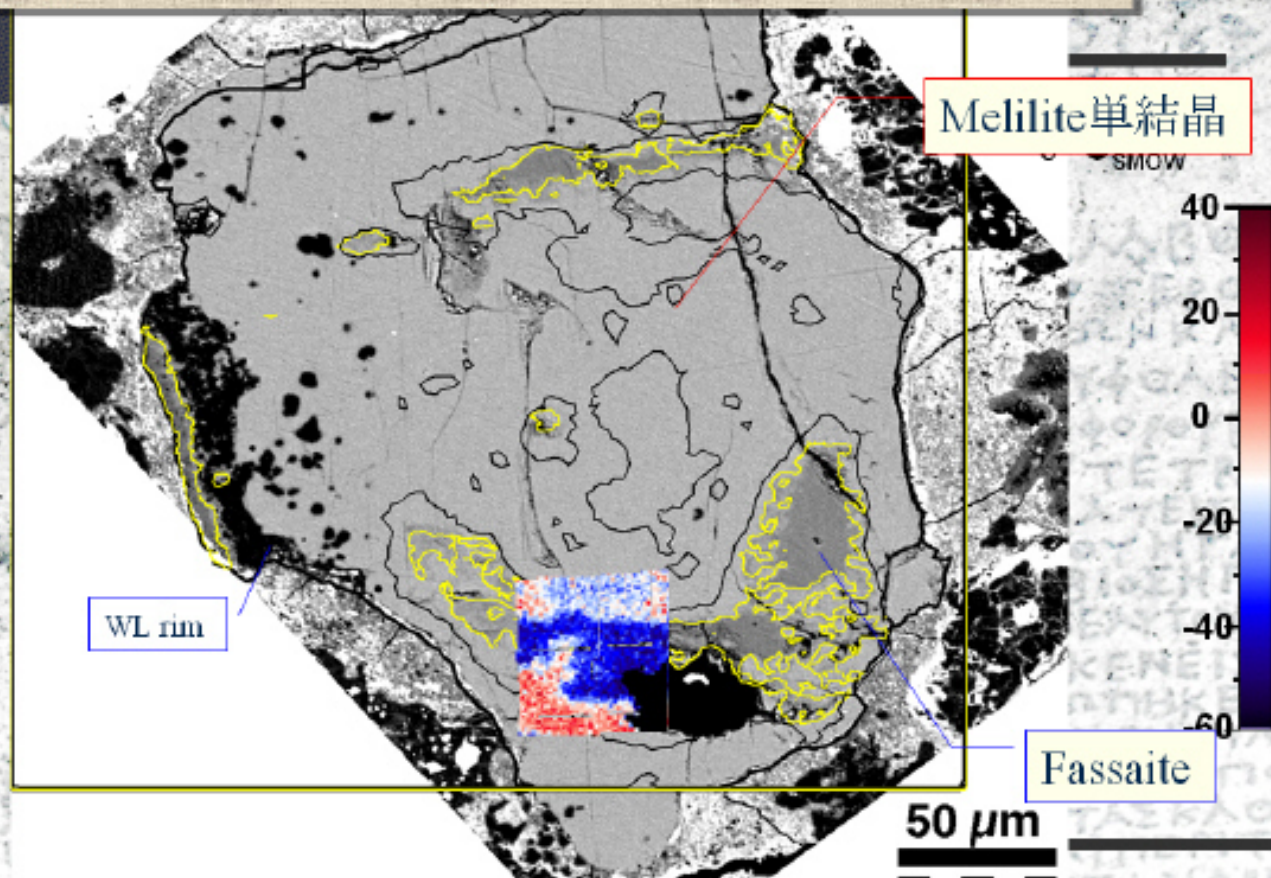
複数回加熱イベント(粗粒**CAI**を例にして)



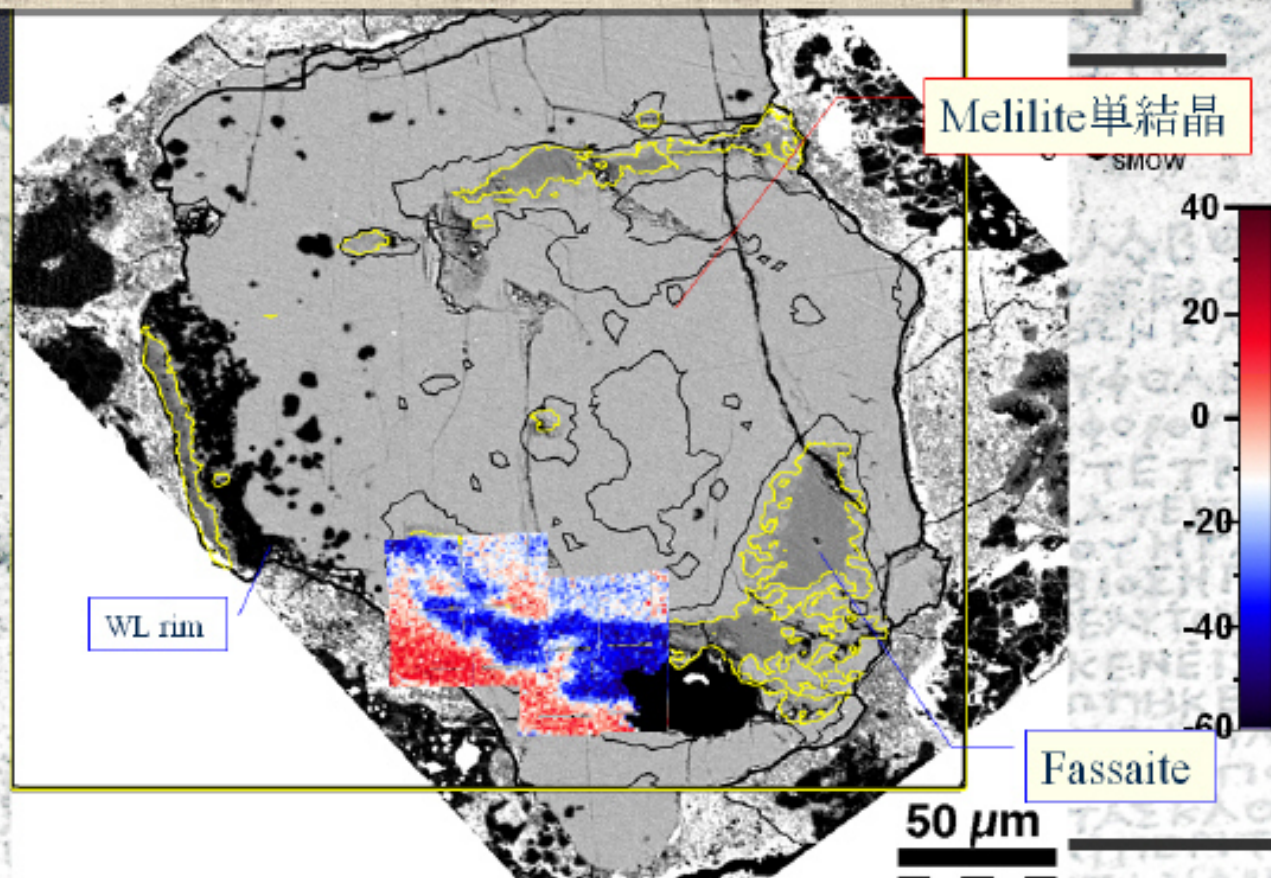
複数回加熱イベント(粗粒CAIを例にして)



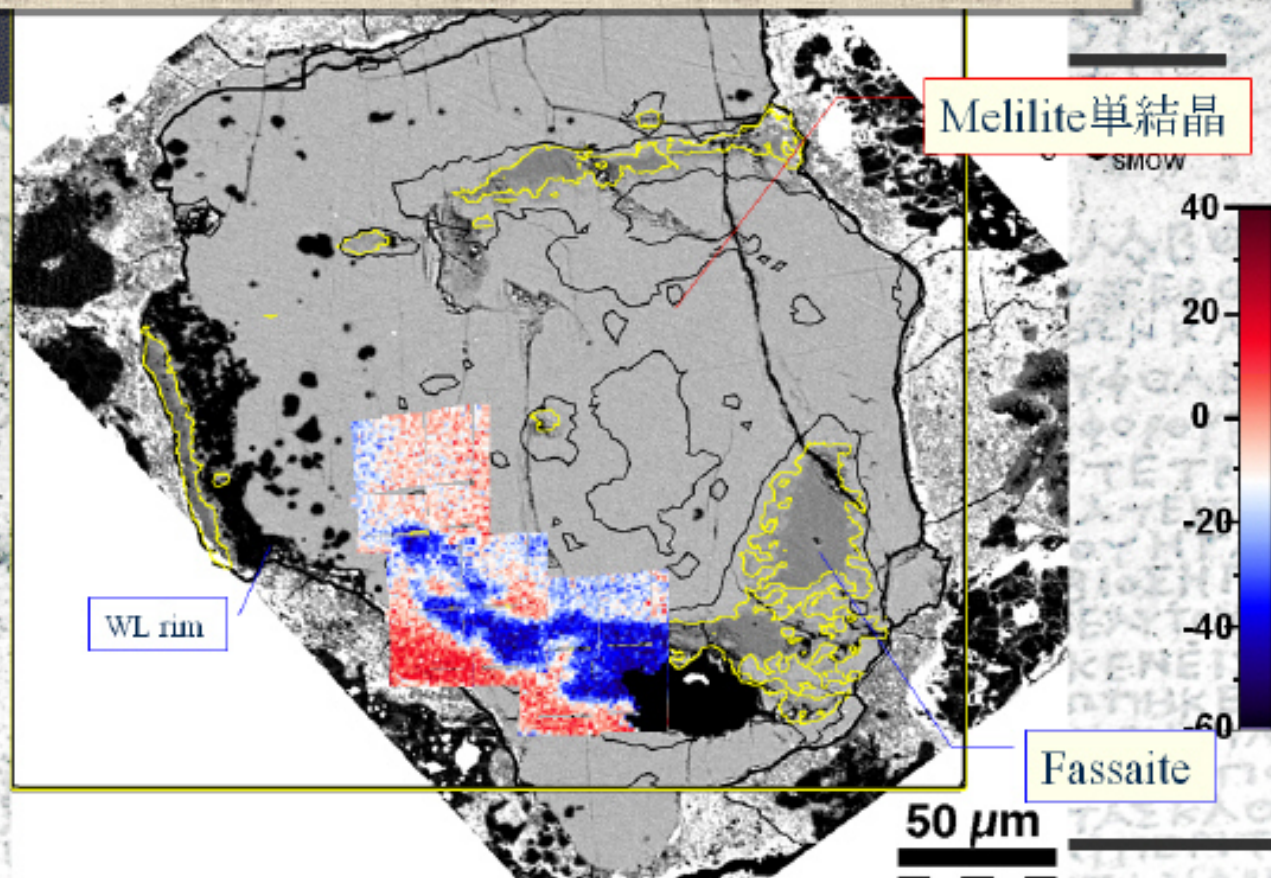
複数回加熱イベント(粗粒**CAI**を例にして)



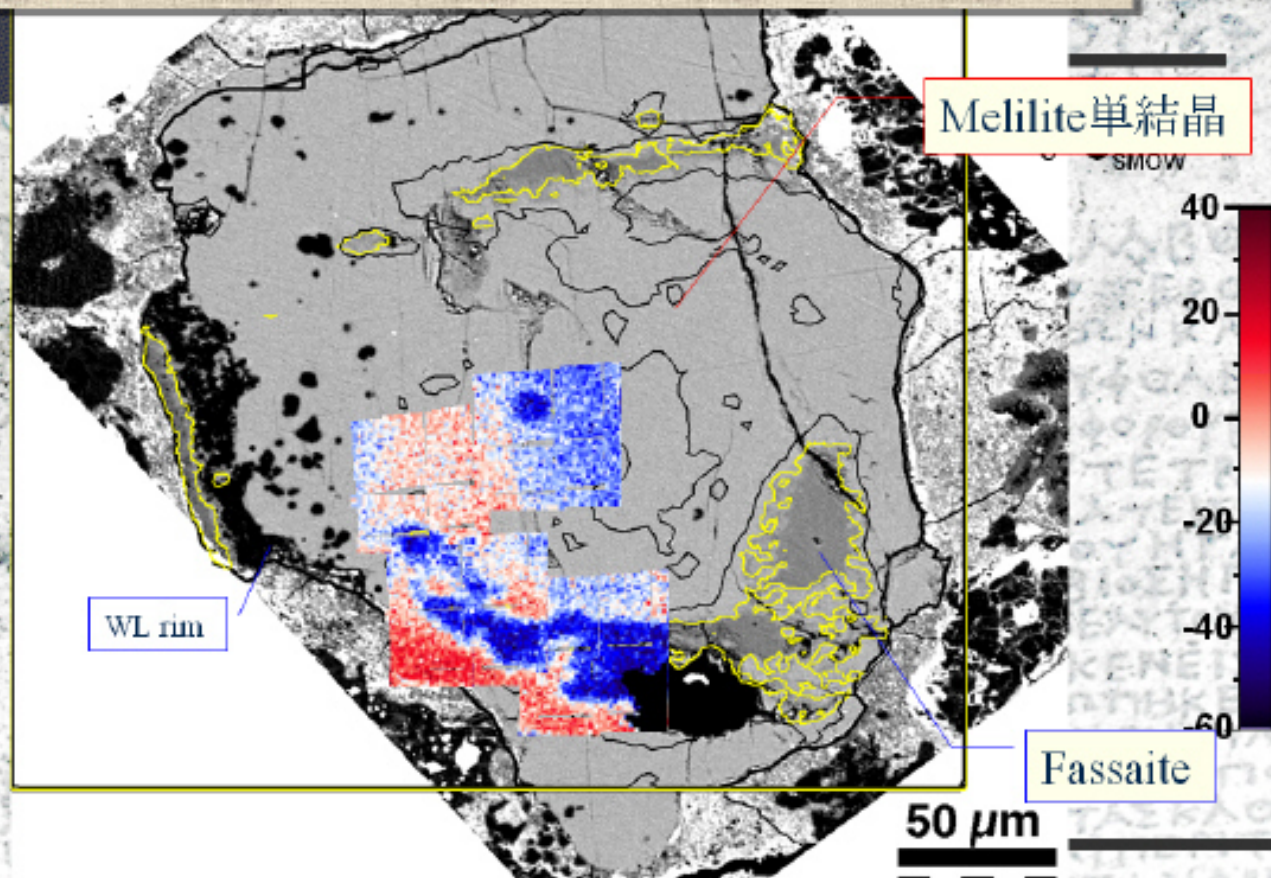
複数回加熱イベント(粗粒CAIを例にして)



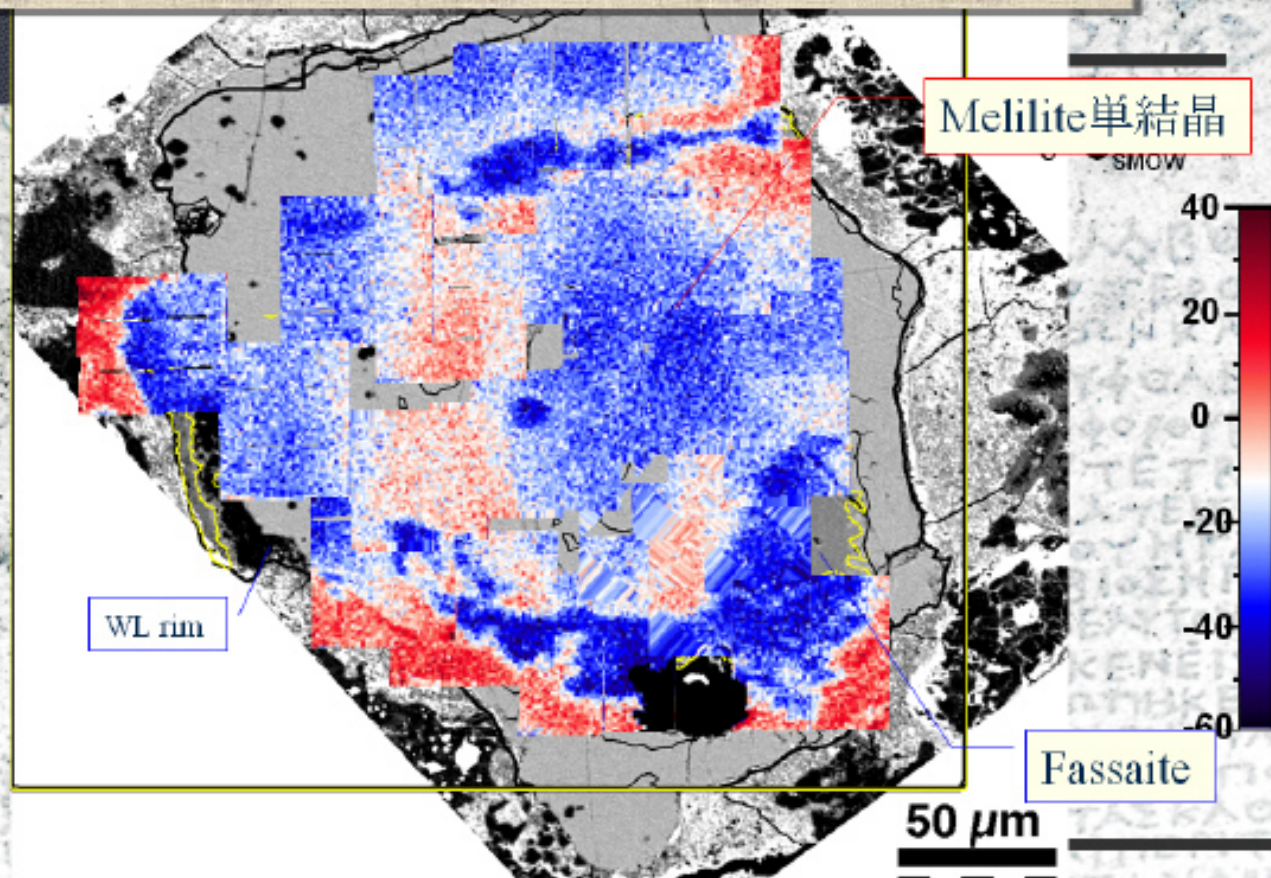
複数回加熱イベント(粗粒CAIを例にして)



複数回加熱イベント(粗粒CAIを例にして)



複数回加熱イベント(粗粒**CAI**を例にして)



複数回加熱イベントの例
(コンドリュールを例にして)

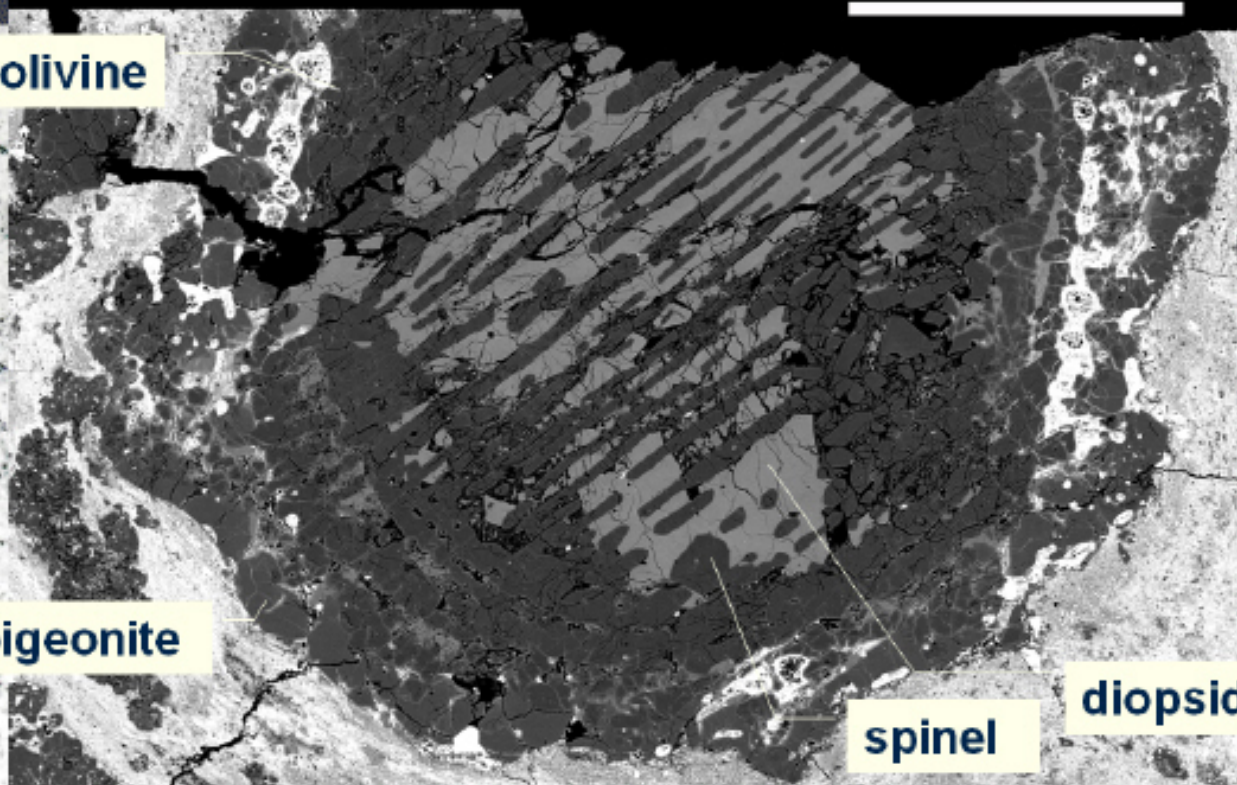
500 μm

olivine

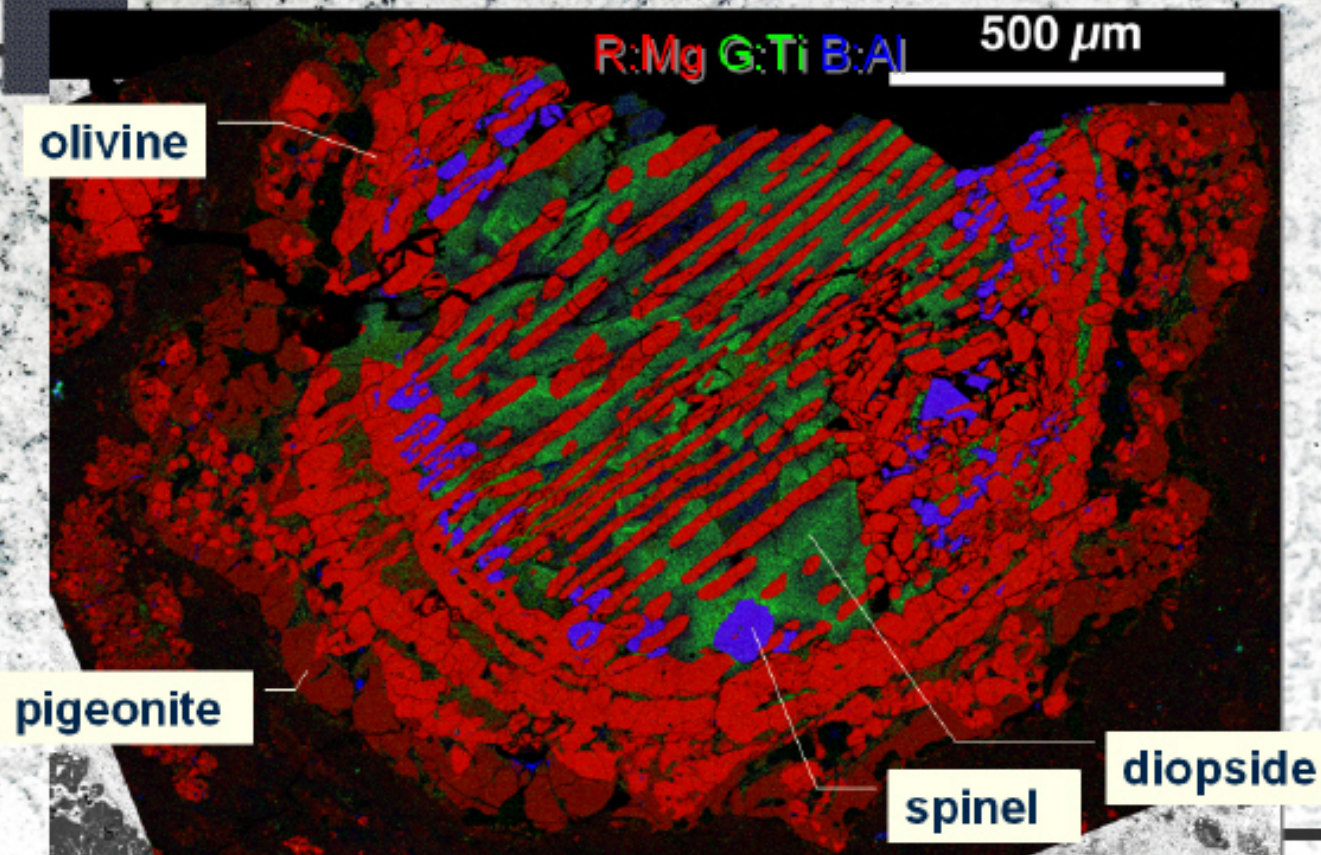
pigeonite

spinel

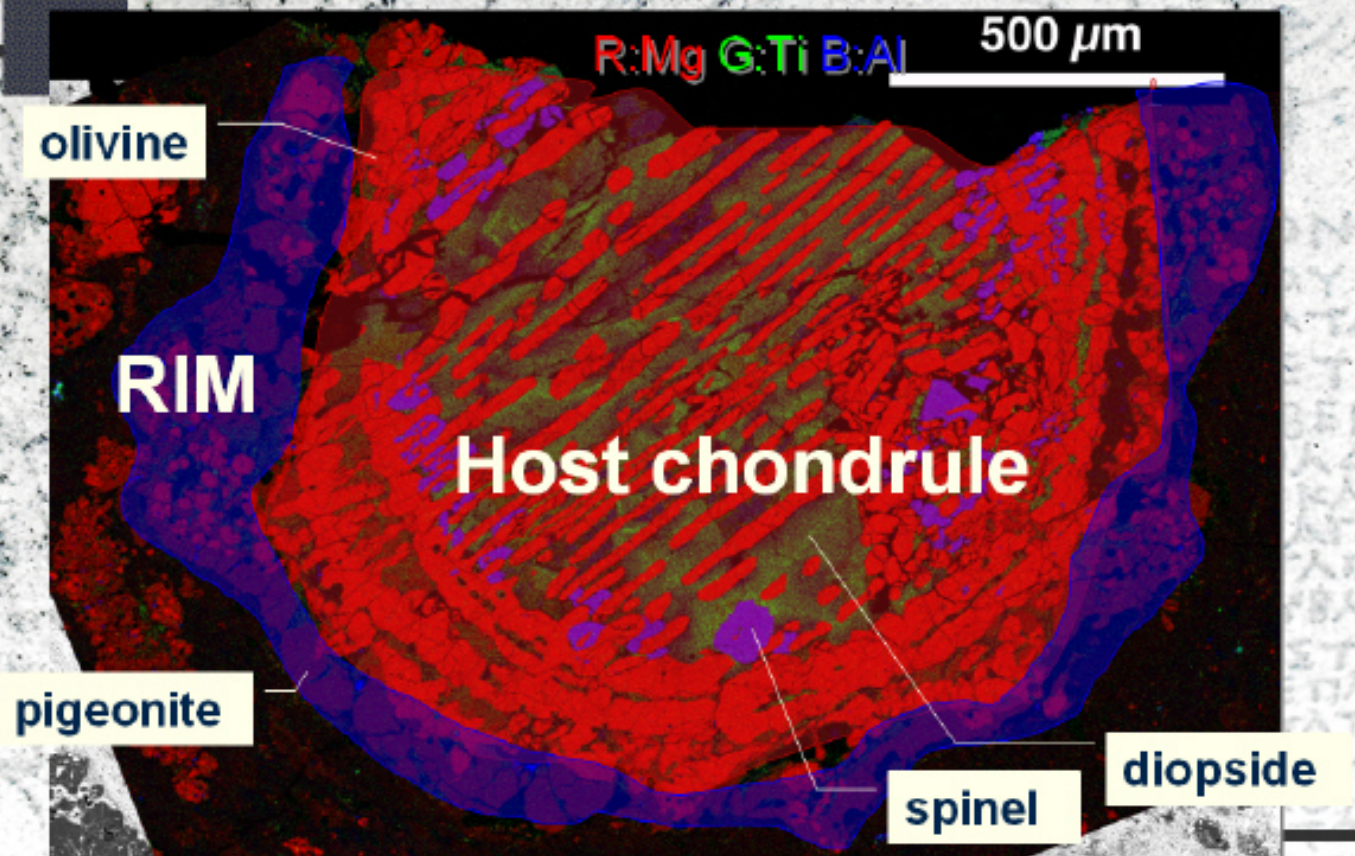
diopside



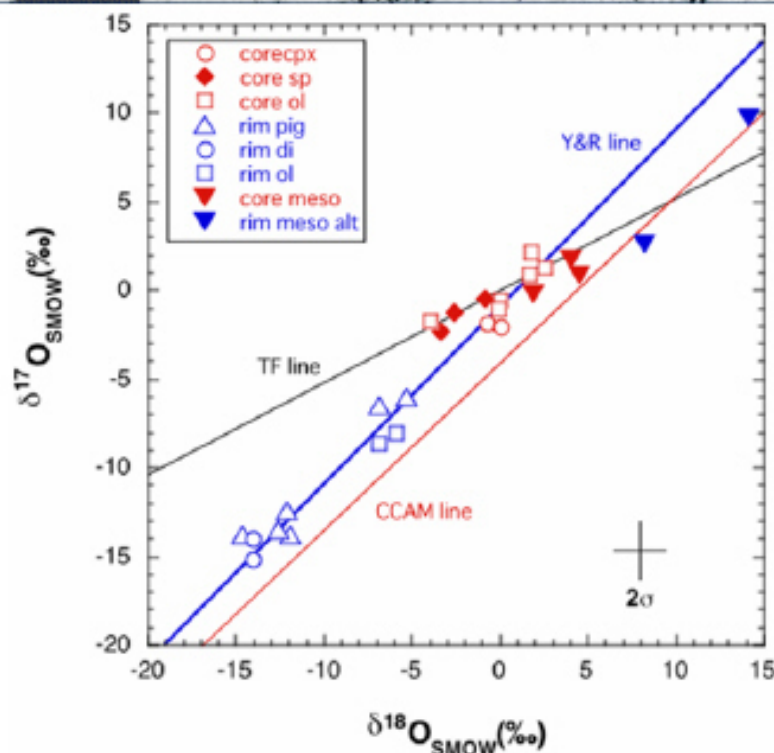
複数回加熱イベントの例
(コンドリュールを例にして)



複数回加熱イベントの例
(コンドリュールを例にして)



複数回加熱イベントの例 (コンドリュールを例にして)



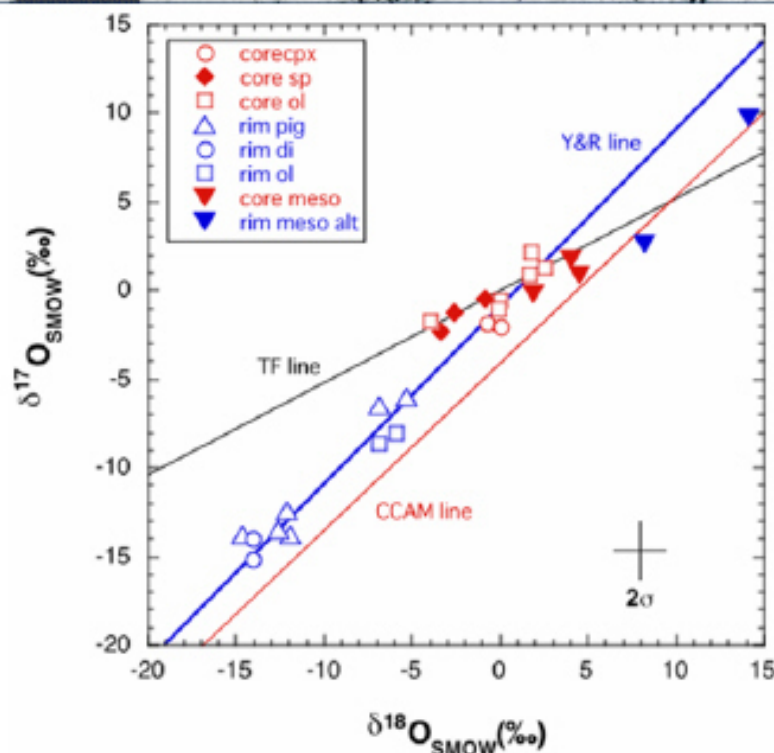
Host :

- ^{16}O -poor signature
($\delta^{17,18}\text{O}_{\text{SMOW}} \sim -10 \text{‰}$)

Igneous rim :

- ^{16}O -rich relative to that of host
($\delta^{17,18}\text{O}_{\text{SMOW}} \sim -5 \text{ to } -15 \text{‰}$)

複数回加熱イベントの例 (コンドリュールを例にして)



Host :

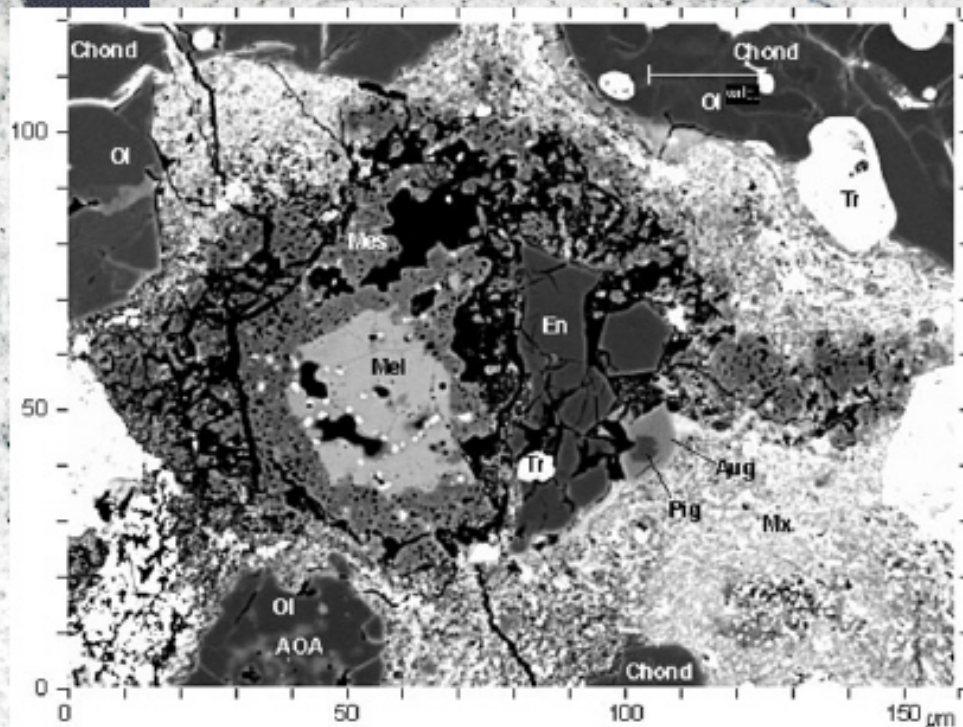
- ^{16}O -poor signature
($\delta^{17,18}\text{O}_{\text{SMOW}} \sim -10 \text{‰}$)

Igneous rim :

- ^{16}O -rich relative to that of host
($\delta^{17,18}\text{O}_{\text{SMOW}} \sim -5 \text{ to } -15 \text{‰}$)

**Oxygen isotope disequilibrium
between host and igneous rim.**

複数回加熱イベントの例 (コンドリュールを内包するCAIを例にして)



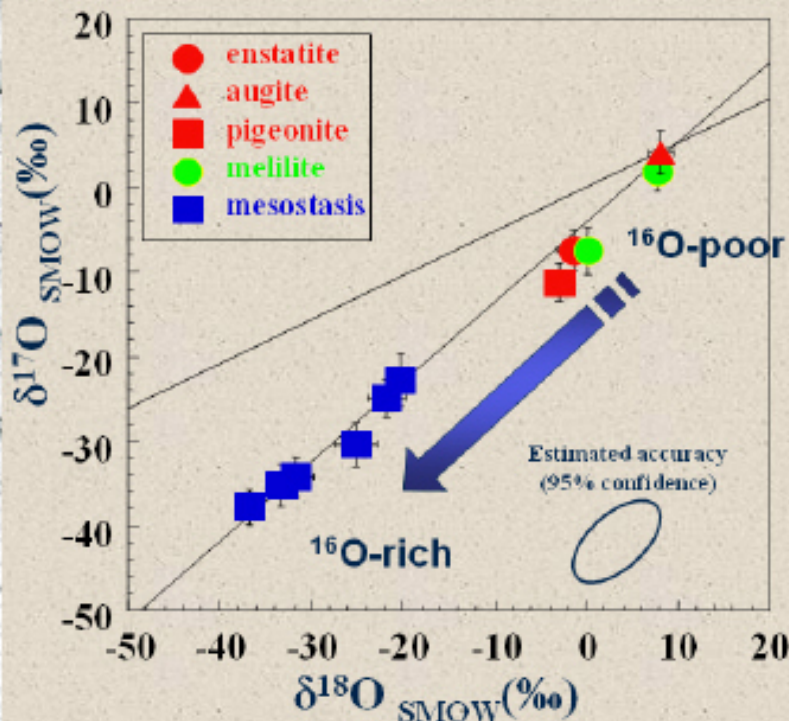
Mineral assemblages

Type A or B CAI
Melilite (Åk_{10-13})

Type I Chondrule
Enstatite
Pigeonite
Augite

Ca-Al-rich liquids
Igneous mesostasis

複数回加熱イベントの例 (コンドリュールを内包するCAIを例にして)

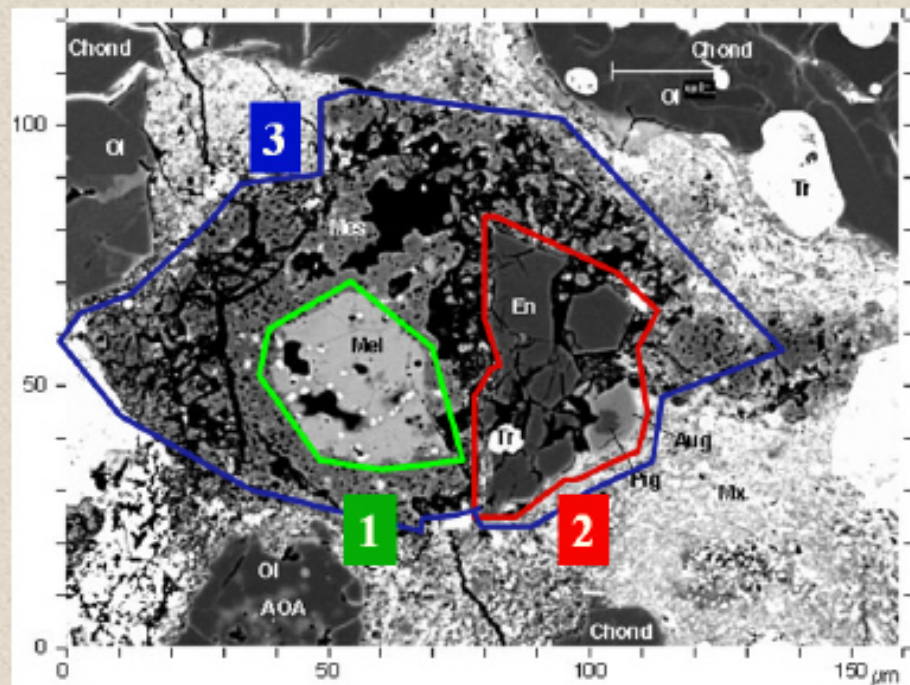


^{16}O -poor
コンドリュール
粗粒CAI

^{16}O -rich
急冷結晶

酸素同位体変動を
伴う複数回加熱イベ
ントの証拠

複数回加熱イベントの例 (コンドリュールを内包するCAIを例にして)



1. A ^{16}O -poor
Type A or B
CGI
2. A ^{16}O -poor
Type I
chondrules
3. ^{16}O -rich
mesostasis of
Type C CAI

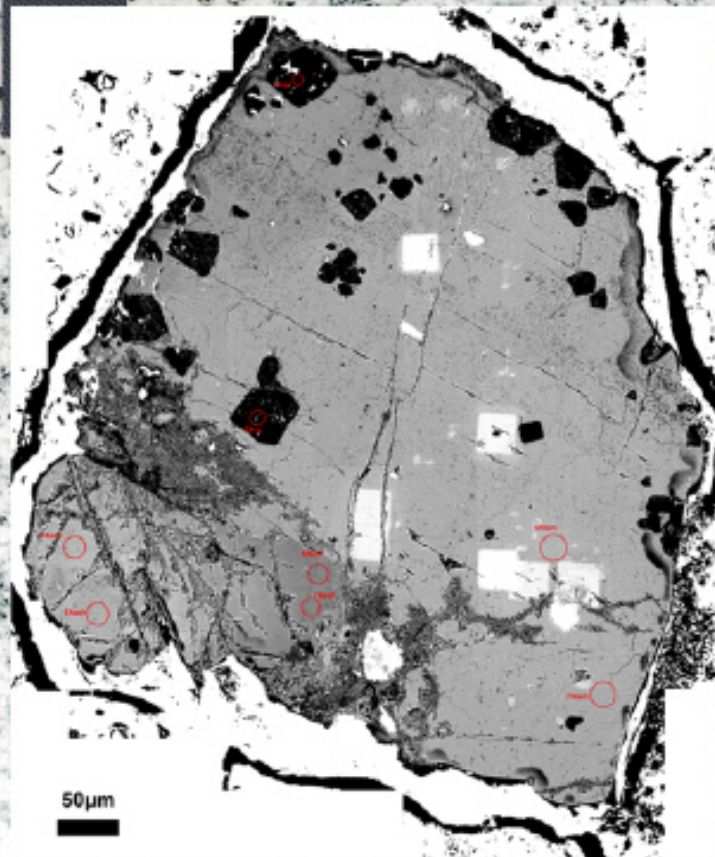
複数回加熱イベントまとめ

1. 細粒CAI, 粗粒CAI, コンドリュールにおいて酸素同位体変動を伴う複数回加熱イベントを確認した。
2. CAI中の各結晶における酸素同位体組成が変化していることから, 複数回加熱イベントにより年代もリセットされている可能性が高い。
3. コンドリュールは酸素同位体が等しいため, 年代が異なるかどうか不明瞭である。

目的

岩石学的研究及び酸素同位体分布から結晶化順序及び複数回加熱イベントが評価されている粗粒CAI及びコンドリュールに高精度Al-Mgモデル年代を適応し、時間軸を評価する。

複数回加熱イベントの年代確認(粗粒CAI)

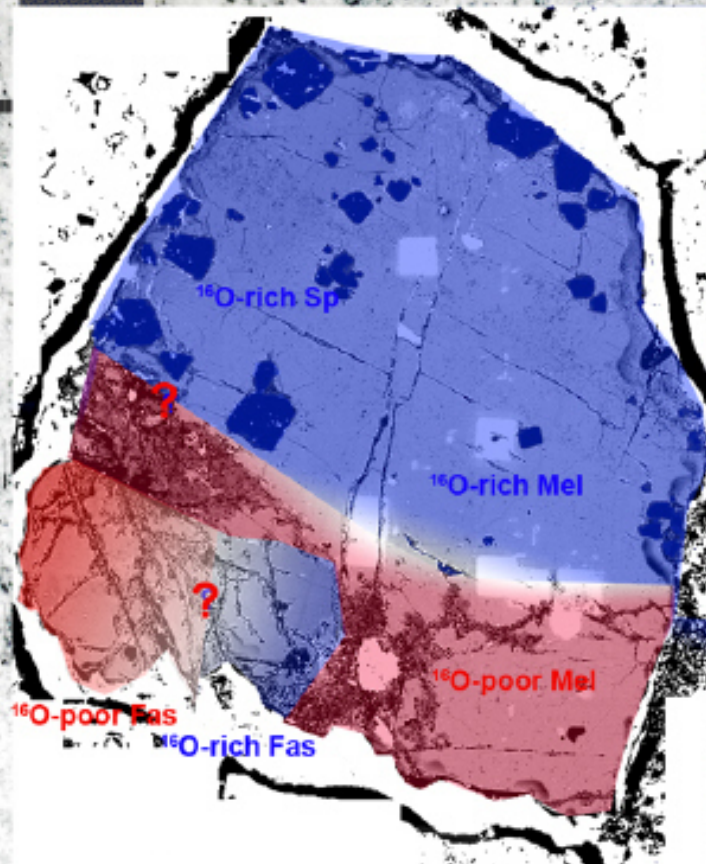


Yurimoto et al. (1998)
Ito et al. (2004)

複数回加熱イベントによる結晶化
順番を評価。

^{16}O -richな液滴から結晶化後、複
数回急加熱イベントにより、 ^{16}O -
rich meliliteの部分溶融が生じ、
 ^{16}O -poorに変化した。

酸素同位体分布の見積もり



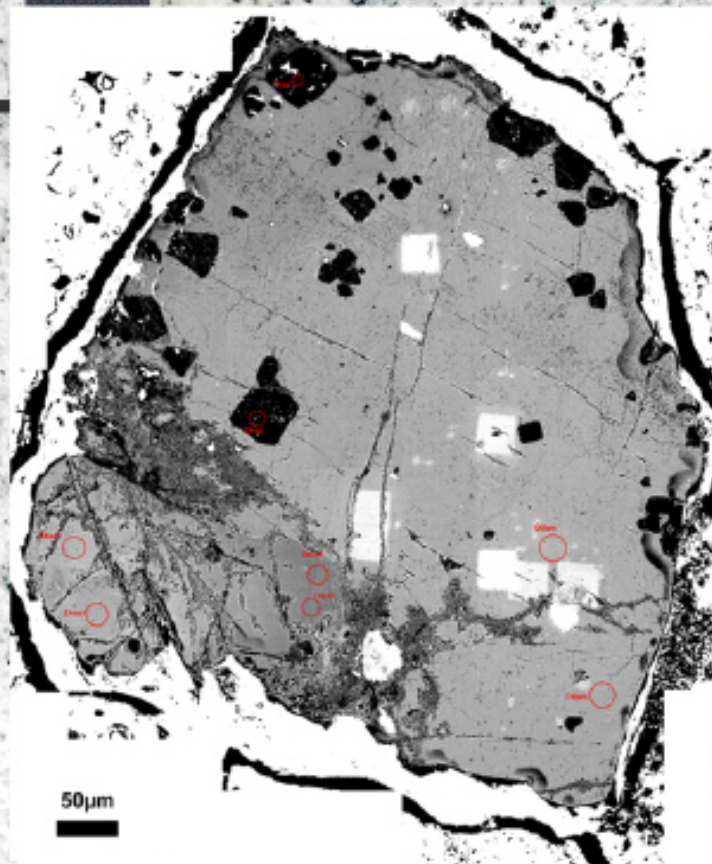
Yurimoto et al. (1998)
Ito et al. (2004)

結晶化順序

- ^{16}O -rich spinel
- ^{16}O -rich melilite
- ^{16}O -rich fassaite
- ^{16}O -poor melilite
- ^{16}O -poor fassaite

Al-Mgモデル年代を適応し結
晶化順序を評価する。

酸素同位体分布の見積もり



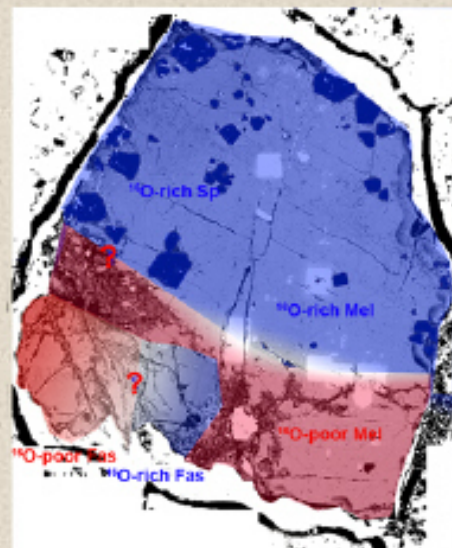
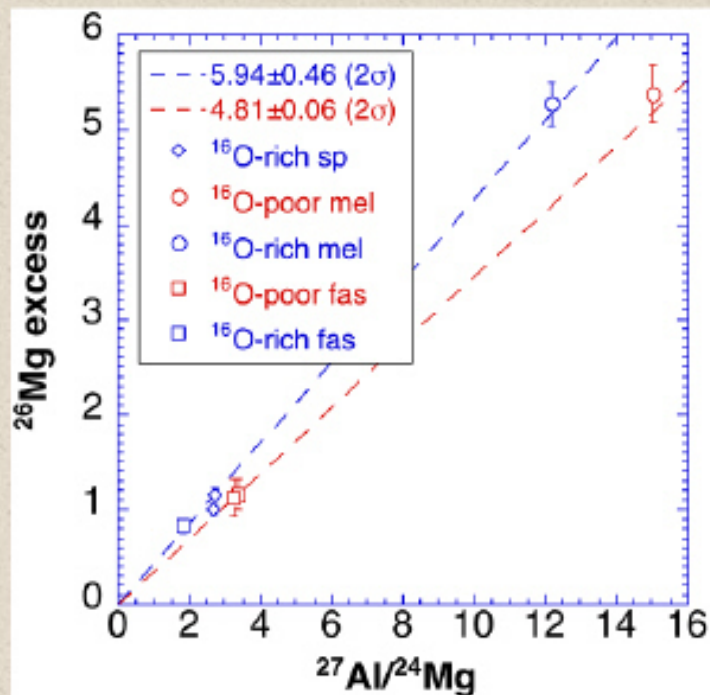
Yurimoto et al. (1998)
Ito et al. (2004)

結晶化順序

- ^{16}O -rich spinel
- ^{16}O -rich melilite
- ^{16}O -rich fassaite
- ^{16}O -poor melilite
- ^{16}O -poor fassaite

Al-Mgモデル年代を適応し結
晶化順序を評価する。

Al-Mgアイソクロン図(粗粒CAI)



目的及び背景（コンドリュール）

従来、測定できなかったコンドリュール中の spinel や pyroxene に高精度 Al-Mg モデル年代を適応する。

複数回加熱イベントを経験したと考えられるコンドリュールを選び、最初の固化イベントを見積もることを目的とした。

測定した場所(コンドリュール)

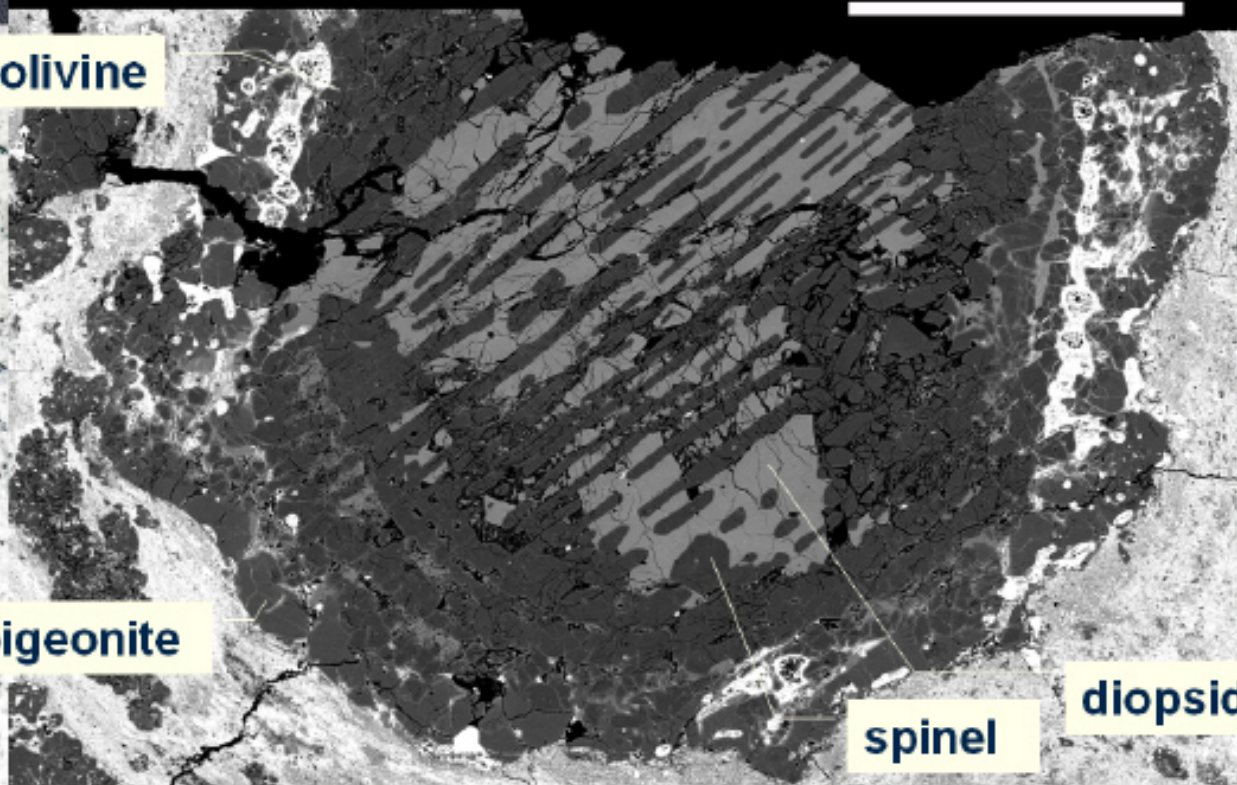
500 μm

olivine

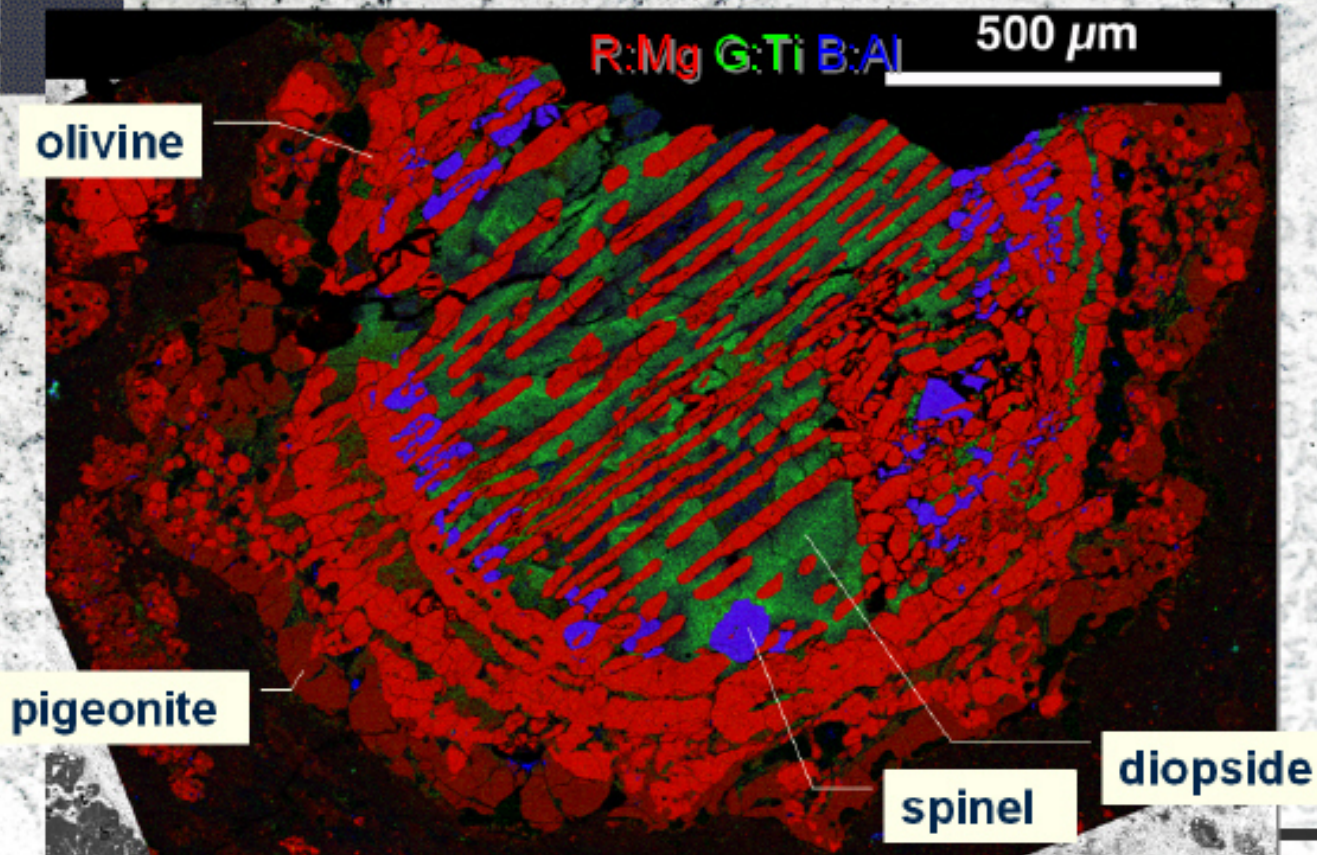
pigeonite

spinel

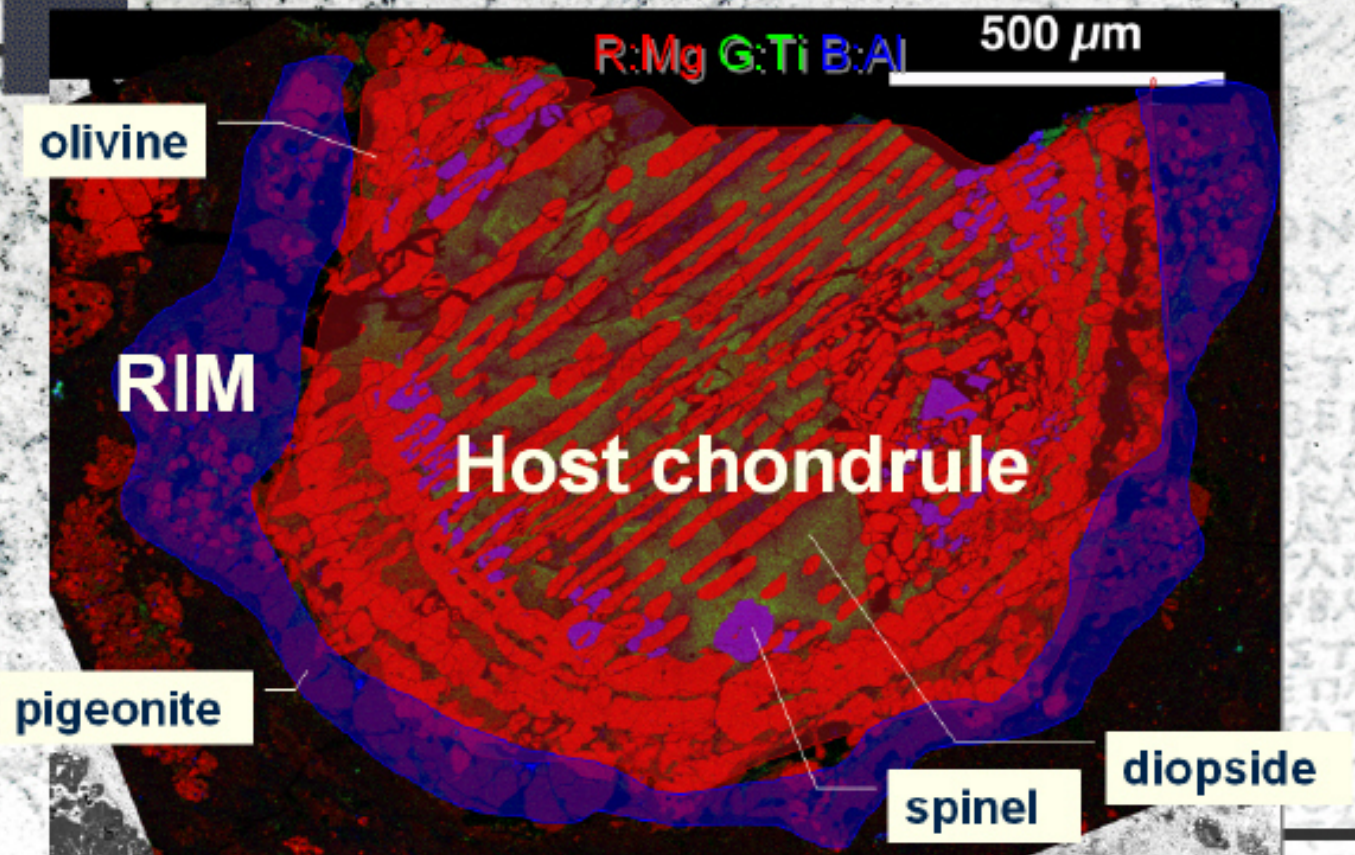
diopside



測定した場所(コンドリュール)

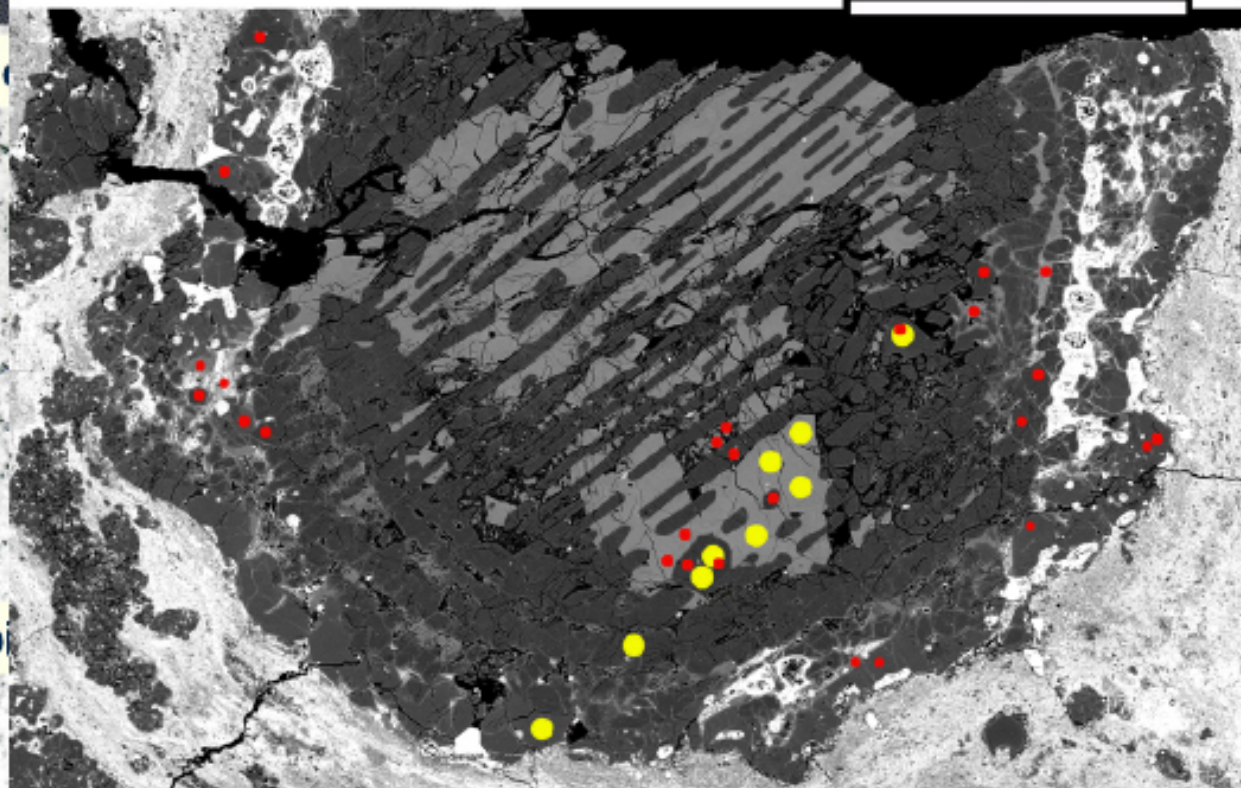


測定した場所(コンドリュール)

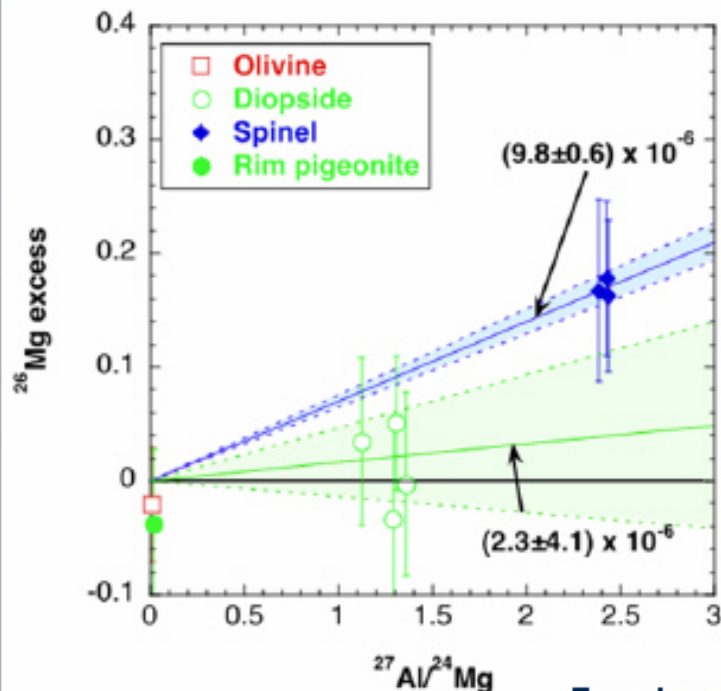


測定した場所(コンドリュール)

500 μm



Al-Mg アイソクロン図 (コンドリュール)



^{26}Al initial ratio:

$$\text{Sp: } (9.8 \pm 0.6) \times 10^{-6} \text{ c/m}$$

↓

$$\text{Dt: } (2.3 \pm 4.1) \times 10^{-6} \text{ c/m}$$

$$\Delta T_{\text{chd}} = 1.5^{+1.1}_{-6.4} \text{ Myr}$$

Errors are 2σ .

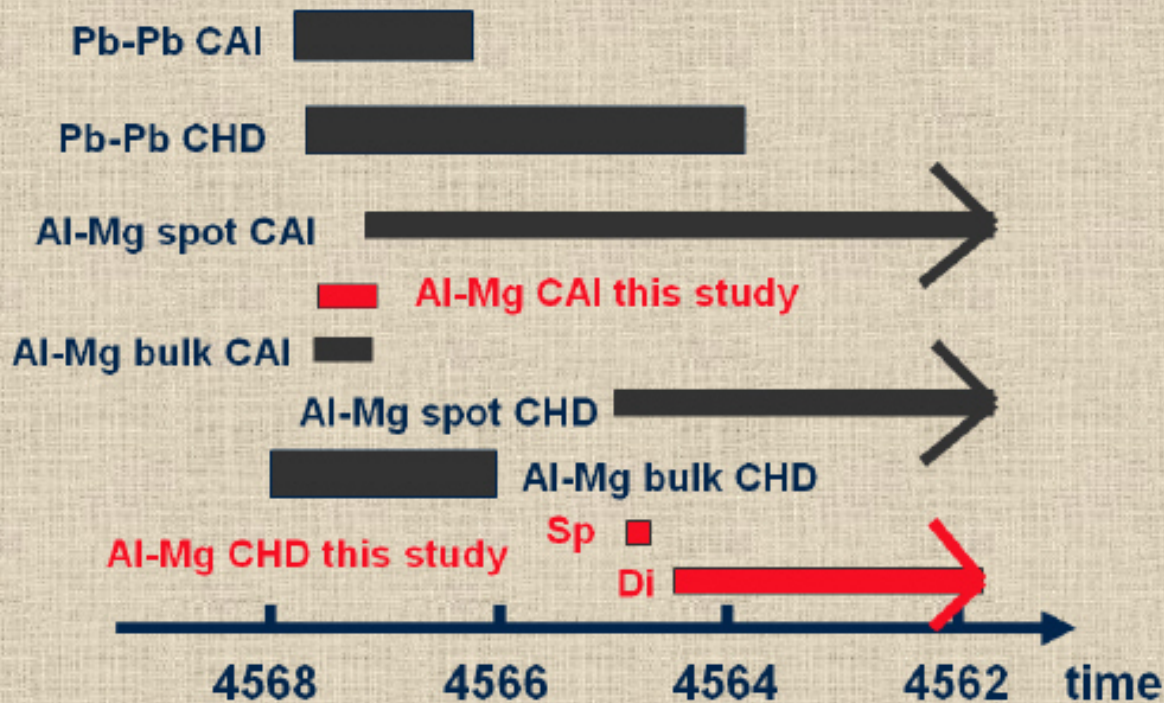
少なくとも0.4Myrの年代差

Error bars are $2\sigma_{\text{mean}}$

まとめ

1. 従来測定できなかったAl/Mg比の低いspinelやpyroxeneに高精度Al-Mgモデル年代を適応し、複数加熱イベントによる年代のリセットについて評価した。
2. 複数加熱イベントにより結晶化順序のわかっている粗粒CAI構成鉱物にAl-Mgモデル年代を適応し、両者の結晶化順序と一致した。
3. コンドリュール構成鉱物にAl-Mgモデル年代を適応し、最初に固化したspinelとそれより後に結晶化したdiopsideに年代差があることがわかった。
4. 最初の固化イベントからCAIとコンドリュールの年代差を見積もる必要性があることが示唆された。

今後の課題



今後の課題

数多くのコンドリュールのspinelやpyroxeneにAl-Mgモデル年代を適応し、コンドリュール形成がいつはじまったか詳細にきめる。

CAI及びコンドリュールの形成期間。点分析が長く見積もる結果となったのはなぜか？

CAI, コンドリュールの形成期間が長い？

変成, 変質でリセットされた？

コンドリュール形成を経験したCAI

CAI-コンドリュール複合物質の存在

今後の課題

細粒CAI及びAOAのPb-Pb年代及びAl-Mg年代の比較。

凝縮起源とされる包有物の絶対年代は求まっていない。

AOA形成は、どの形成にも属さないのか？

岩石学的組織の類似から、細粒CAI形成とAOA形成は似ている。Al-Mg モデル年代は、CAIと一致している。酸素同位体組成は、 ^{16}O -richで一致しているある。

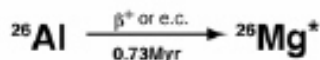
CAI形成とコンドリュール形成の違いは何か？

Al-rich コンドリュールとtype C CAIの化学組成が似ていることから両者は同じプロセスでできた？

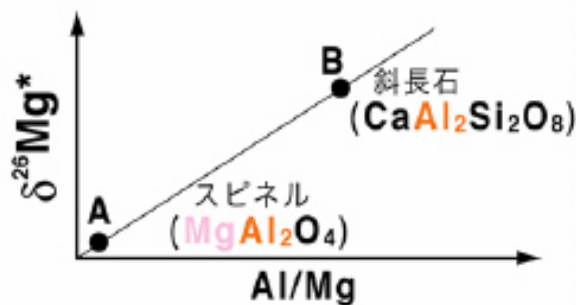
付録1

アイソクロン (同時刻に結晶化した鉱物に対して)

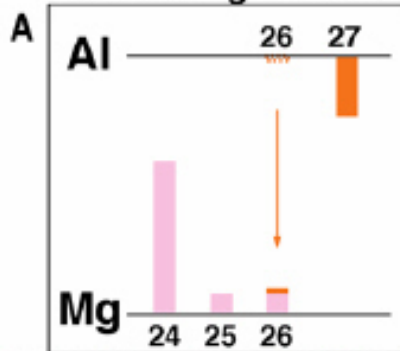
Chapter 1 Introduction



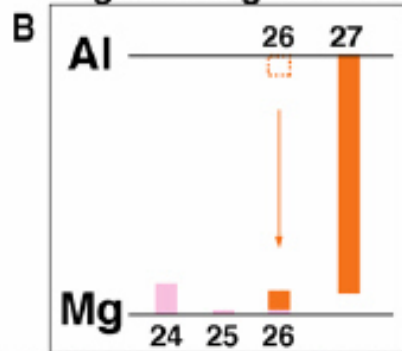
同じ時刻に結晶化したとき



Low-Al/Mg mineral



High-Al/Mg mineral



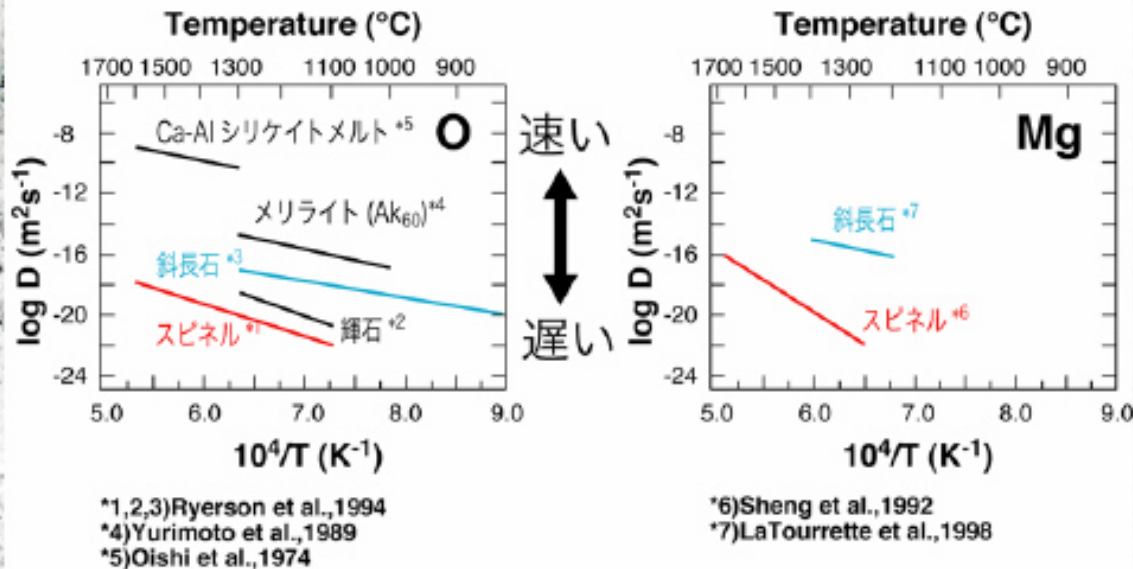
$$(^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg})^* = (^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_0 + (^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg})(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0 \exp(-jt)$$

$$\Delta t = 1/\lambda_{1/2} \ln((^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_{\text{CAI}} / (^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_{\text{sample}})$$

付録2

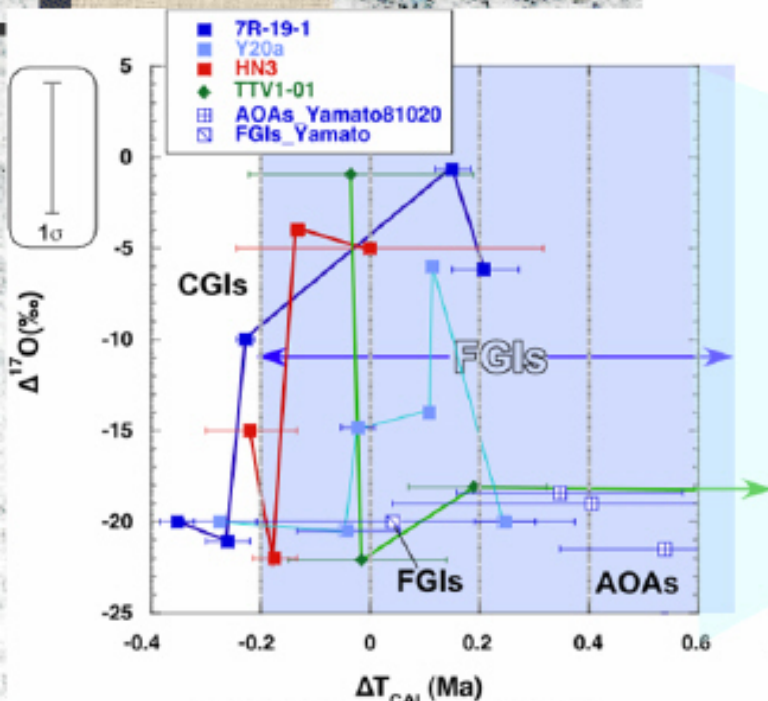
酸素およびマグネシムの自己拡散係数

Chapter 3: CAIs and condrules from Allende CV-chondrite

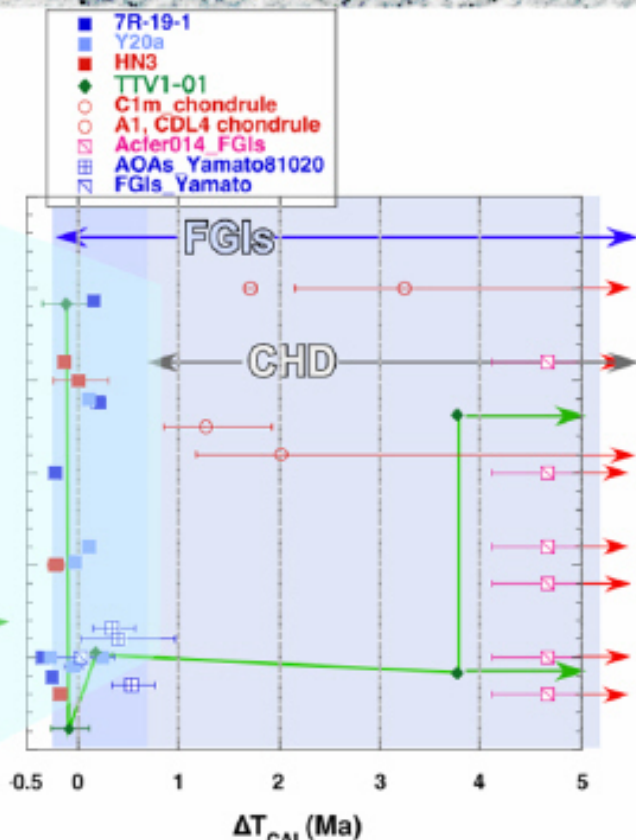


☼ 酸素およびマグネシウムの拡散速度はスピネルが最も遅い。

付録3



*Shaded area denotes the previous FGIs.
(e.g. Russell et al., 1998)



^aShaded area denotes the previous FGIs and chondrule data. (e.g. Kunihiro et al., 2004, Kita et al., 2000, Russell et al., 1998)

付録4

