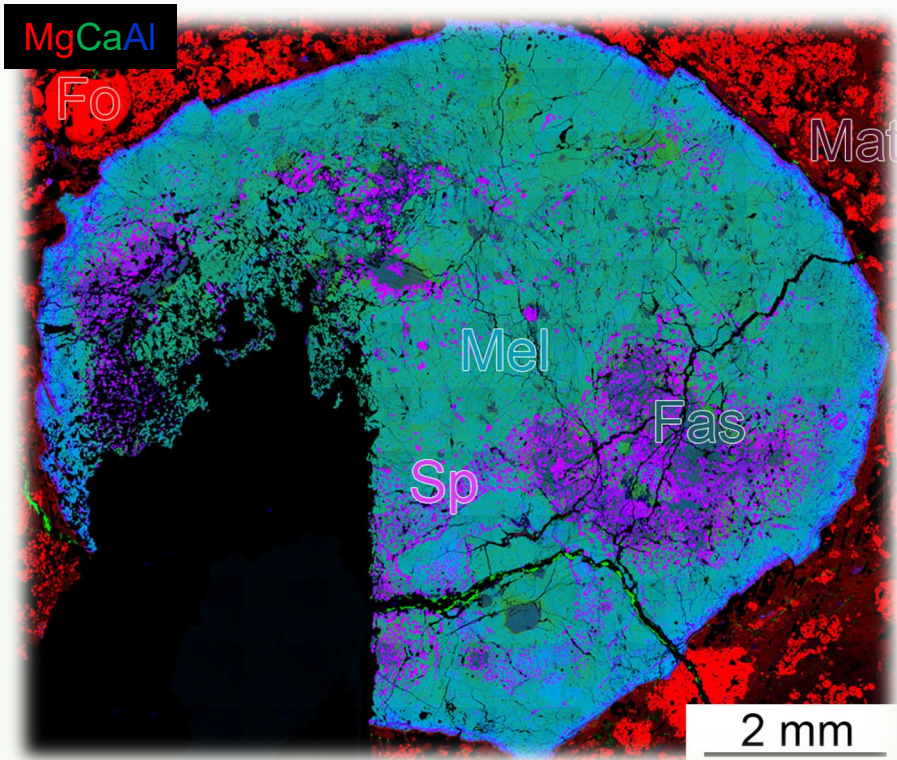


CAIの結晶成長に沿った化学・同位体分析による 初期太陽系環境進化の推定

惑星物質科学のフロンティア 2026/3/5

信州大 鈴木明政

Ca-Al-rich Inclusions (CAIs)



- 始原的なコンドライト隕石に含まれる
- 45億6700万年前の太陽系最古の物質

(e.g., Amelin et al., 2002; Connelly et al., 2012)

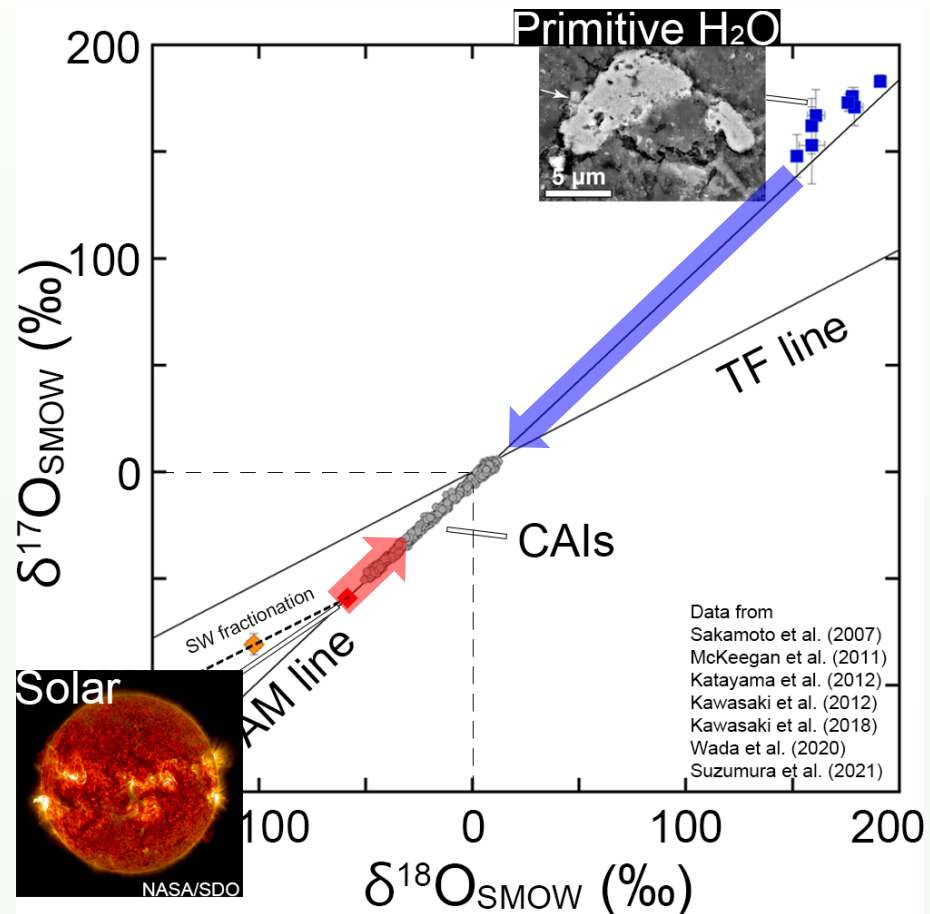


一番最初！かっこいい！

天体物理学・天文観測と物質科学を繋げるベンチマーク

固体物質進化を理解する上で最初の物質を理解することは重要

酸素同位体異常



- 最大50‰の酸素同位体異常
- 傾き1の質量に依存しない分布
(e.g., Clayton et al. 1973, 1977, 1993)



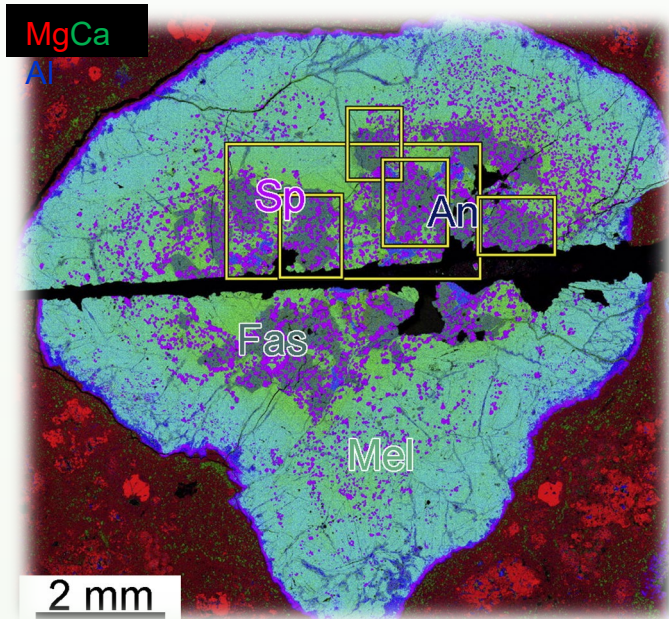
2つの端成分の混合によって生成

^{16}O -rich = Solar (McKeegan et al., 2011)

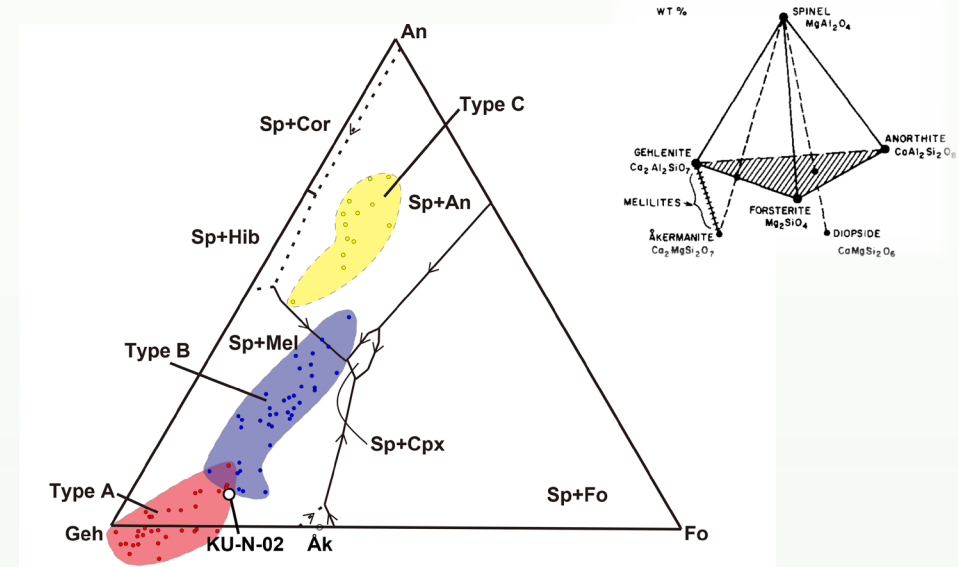
^{16}O -poor = 始源氷 H_2O (Sakamoto et al., 2007)

ガス環境がCAI形成中に変化した？

火成CAIs



TS34 type B Modified form Kawasaki et al. (2018)

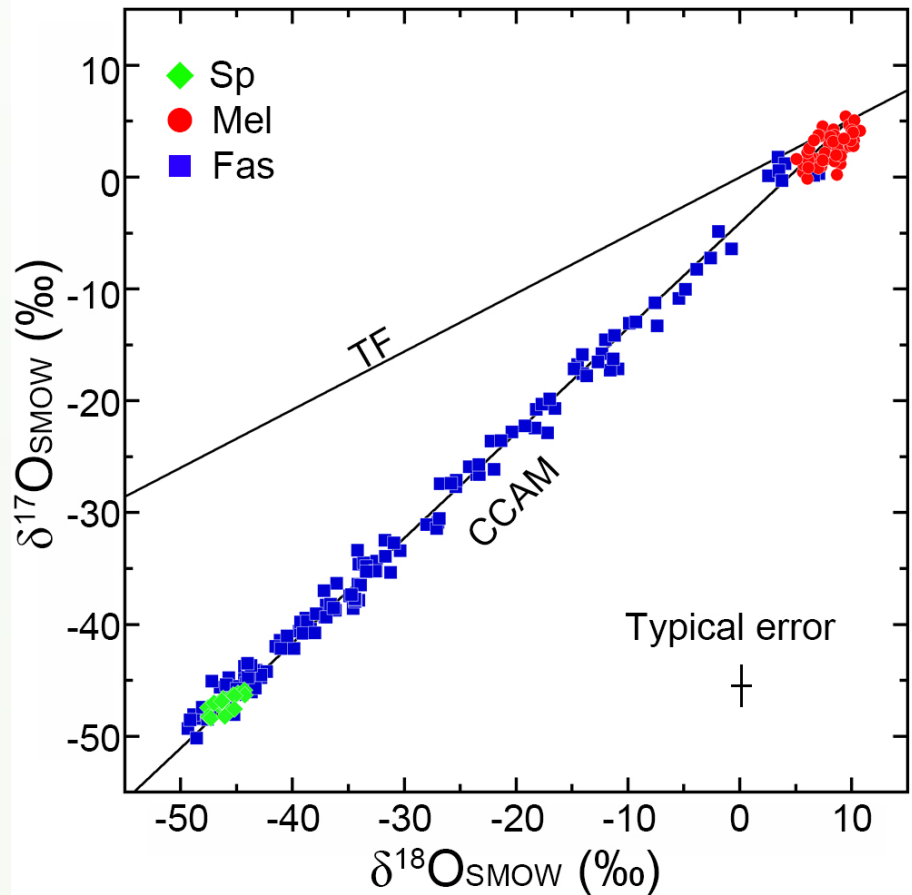


(e.g., Stolper 1982, Stolper and Paque 1984)

- 前駆物質の溶融と結晶化により形成 MacPherson and Grossman, 1981, Grossman 1975, 1980
- 結晶化順序 : Spinel($MgAl_2O_4$) \rightarrow Melilite($Ca_2(Al,Mg)(Si,Al)_2O_7$) \rightarrow Anorthite, Fassaite($Ca(Mg, Ti, Al)(Al, Si)_2O_6$)

形成の進行に対応して環境の時間的な変化を保存していると予想される

Igneous CAIの酸素同位体変化



Data from Suzumura et al. (2021)

結晶化順

酸素同位体

Spinel

均質に ^{16}O -rich

Melilite

均質に ^{16}O -poor

Fassaite

^{16}O -poor ~ ^{16}O -rich

^{16}O -richから ^{16}O -poorへの単調変化では酸素同位体分布を説明不可能

詳細な結晶化履歴・結晶成長を考慮した酸素同位体分析

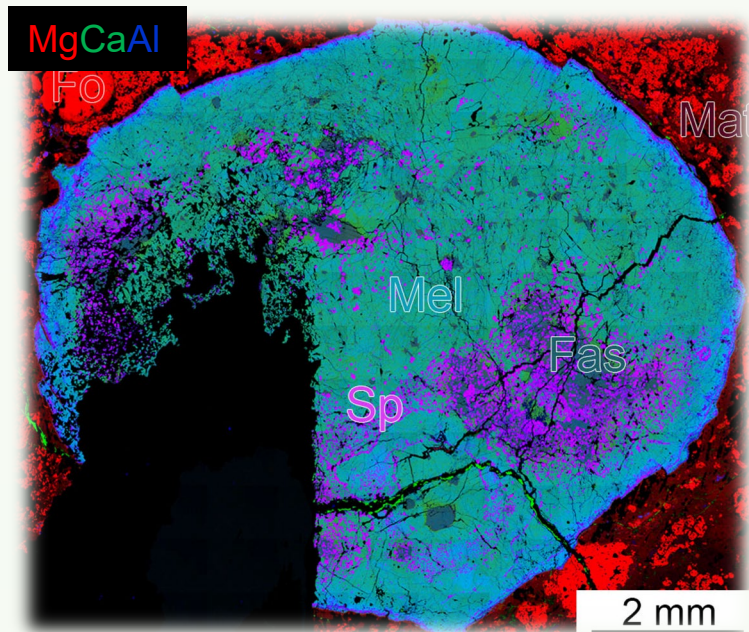
⇒ CAI形成領域における酸素同位体の進化を明らかにする

- 特に研究例が少ないCompact Type A(CTA: melilite-rich) CAIがターゲット
- NWA7865 reduced CV3 chondrite中のCTAを使用
- 二次変質鉱物がほぼなく、二次的な酸素同位体変化の可能性が低い

手法と岩石組織特徴

組織観察 : FE-SEM-EDS-EBSD @Kyoto Univ.

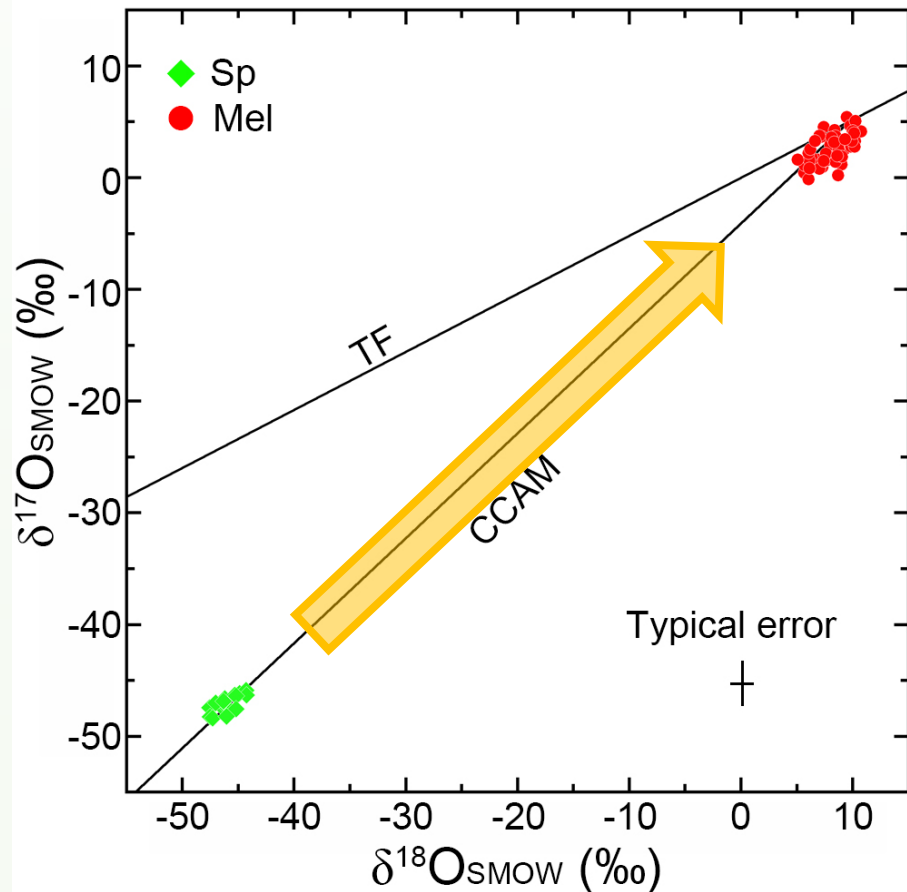
酸素同位体分析 : SIMS @Hokkaido Univ.



- Spinel, Melilite, Fassaiteで構成
- 結晶化順はSpinel→Melilite→Fassaite

⇒ 結晶化順・結晶成長に沿った酸素同位体分析

SpinelおよびMelilite



Spinel 均質に ^{16}O -rich($\Delta^{17}\text{O} = -23 \text{ ‰}$)

Melilite 均質に ^{16}O -poor($\Delta^{17}\text{O} = -2 \text{ ‰}$)

^{16}O -rich メルト と ^{16}O -poor ガス間の

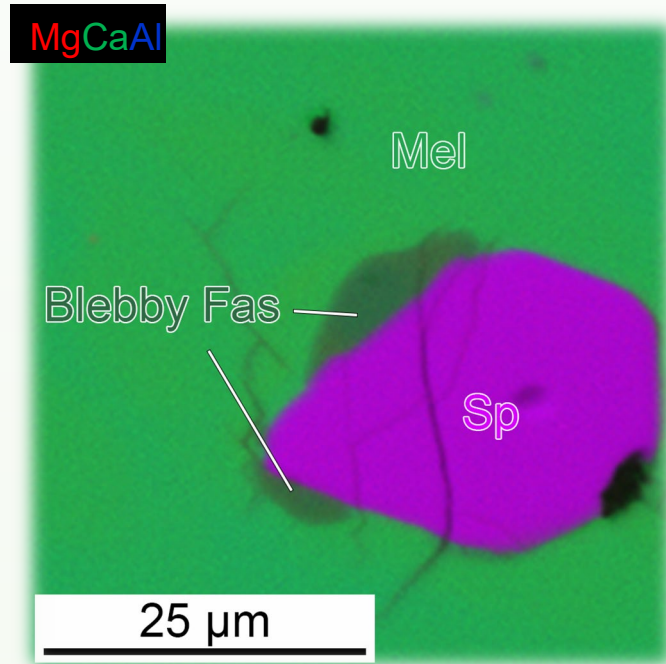
酸素同位体交換を伴った部分溶融現象

(Spinelは溶け残り) (e.g., Yurimoto et al., 1998)

CAI形成環境は ^{16}O -richから ^{16}O -poorへ進化

Fassaiteの産状

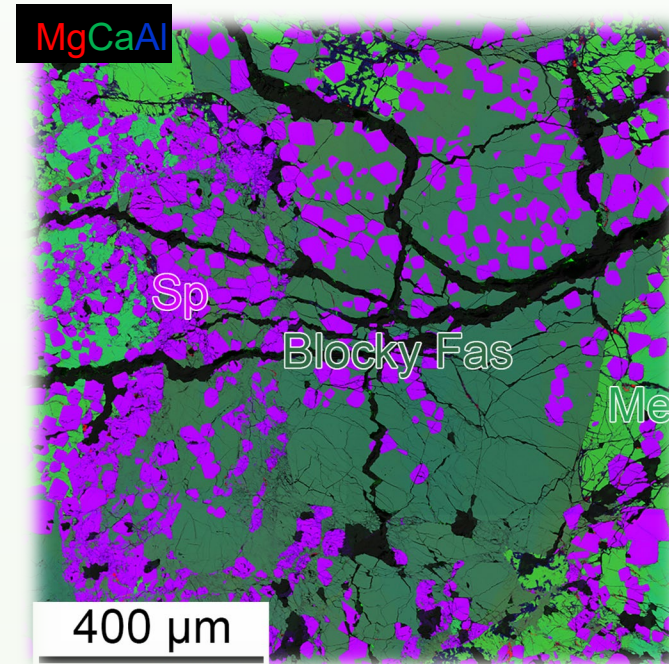
Fassaiteには複数の産状があることを確認



Blebby

Melilite単結晶内部に存在

→相図とは逆関係の不思議な組織

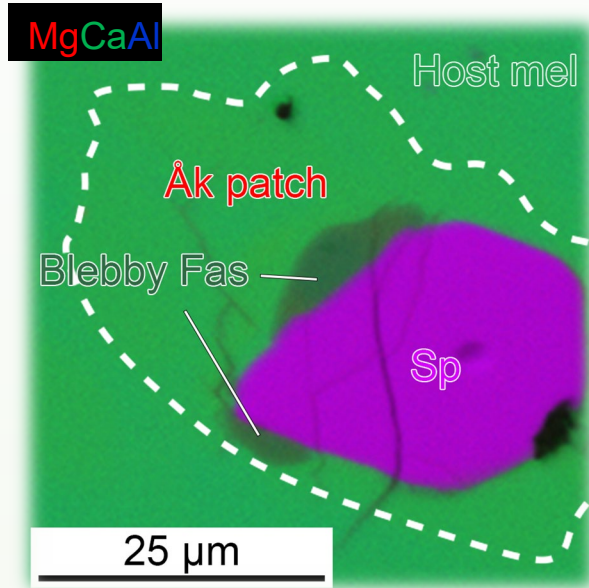


Blocky

Melilite結晶粒間に存在

→相図の予想と一致した残渣メルトから最終結晶相

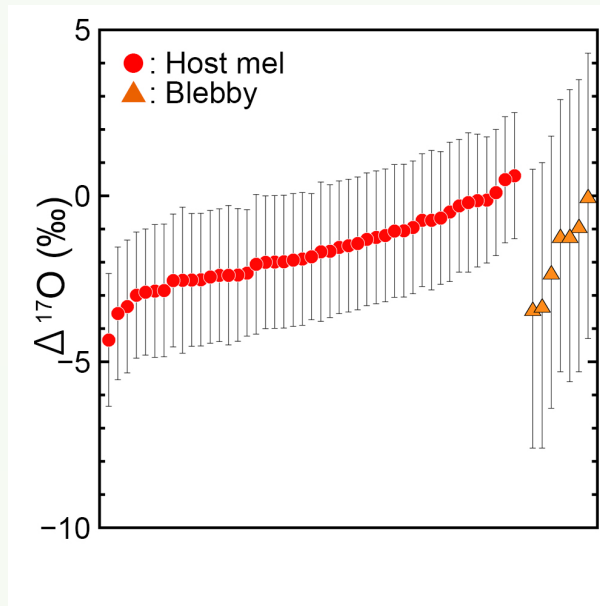
Blebbby fassaiteの形成



- 周りのmelilite(Åk patch)の組成分布からSpinel方向へ結晶成長
- Åk patch/Blebbby fasのモード比 \approx Mel/Blocky fasのモード比
- Blebbby fasのTi量 \approx Blocky fasのTi量



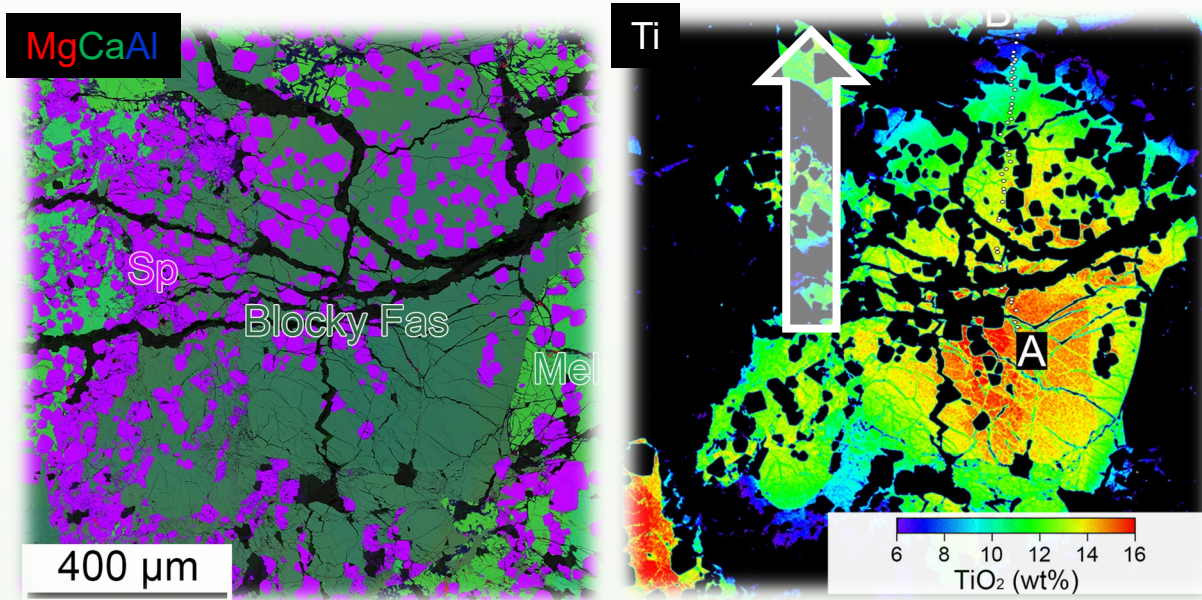
Host melに取り込まれたメルトインクルージョンから結晶化
周りのHost meliliteと同じ酸素同位体組成を示すはず！



均質に ^{16}O -poor、Host meliliteと一致

Fassaite形成初期ではCAIメルトは ^{16}O -poorなガス環境下

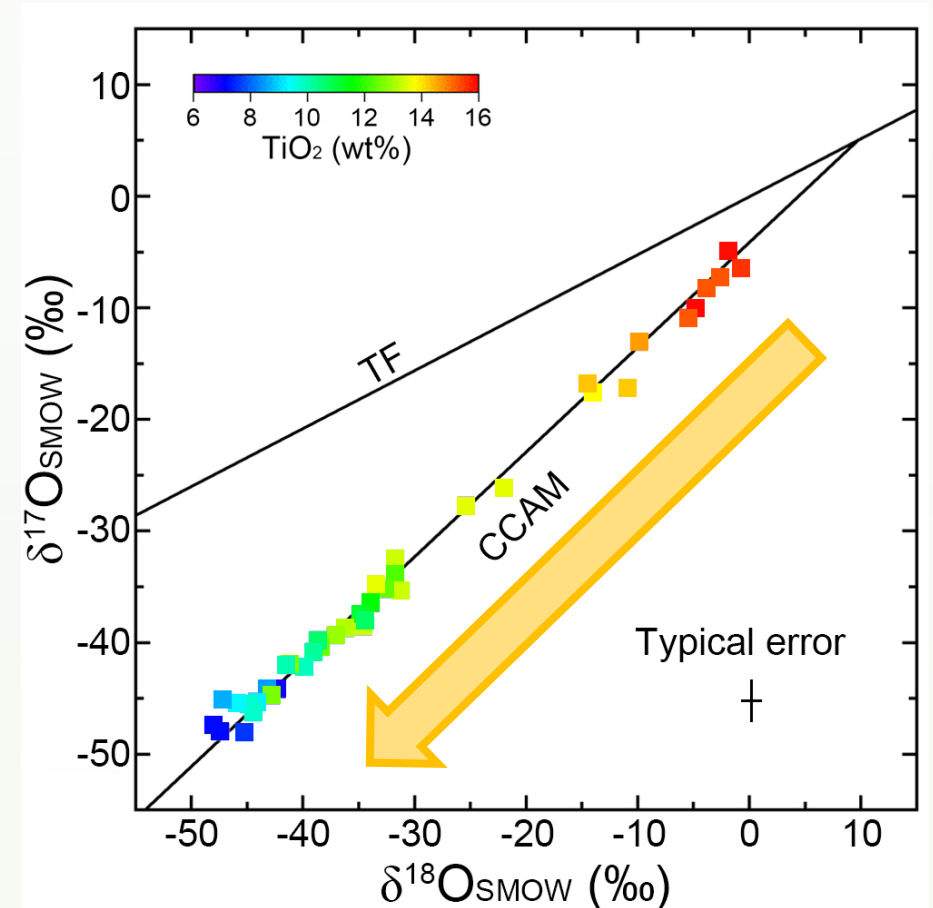
blocky fassaiteの形成



結晶成長にともないTi-richからTi-poorへ

^{16}O -poorから ^{16}O -richに変化

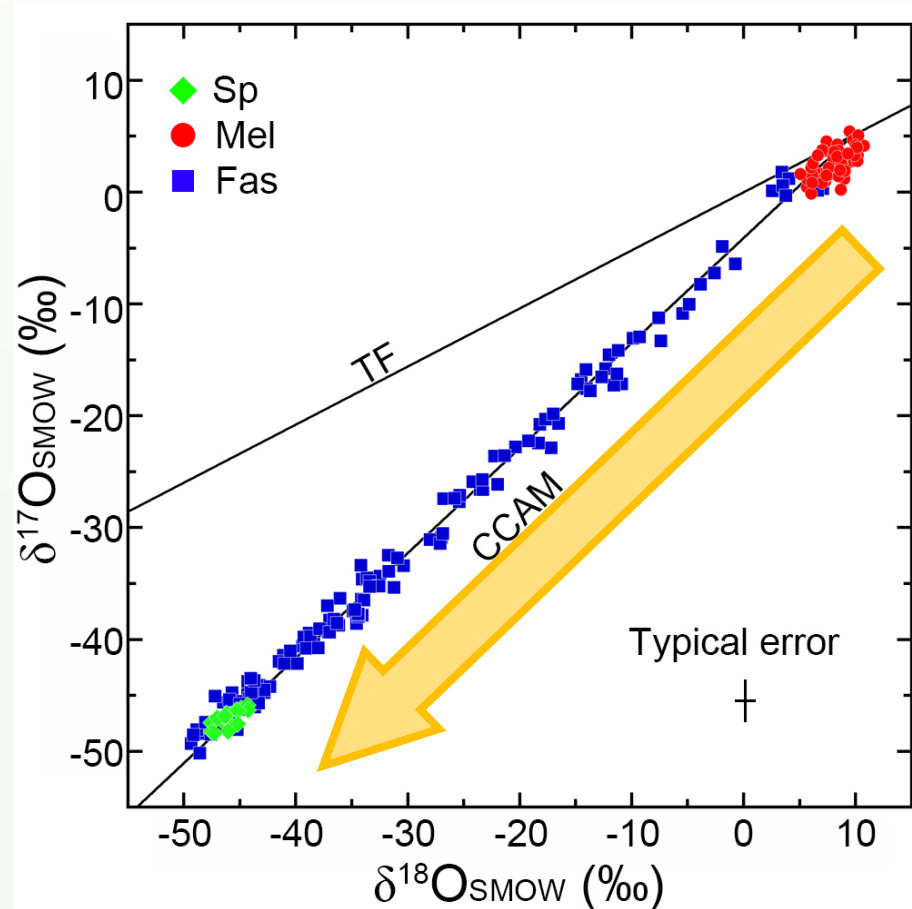
^{16}O -poorメルトと ^{16}O -richガスの同位体交換で説明



Type B CAIのFassaiteと同様 (e.g., Kawasaki et al., 2018)

CAI前駆物質の化学組成によらず同じような環境下で形成したことを示唆

酸素同位体の進化



ガス環境

CAIメルト

結晶化順

^{16}O -rich

^{16}O -rich

Spinel

^{16}O -poor

^{16}O -poor

Melilite

^{16}O -poor

^{16}O -poor

Blebbly fas

^{16}O -rich

^{16}O -rich

Blocky fas

火成CAIは同位体環境の進化を保存している

まとめ

- Blocky fassaite結晶成長とともに周囲のガスの酸素同位体が ^{16}O -poorから ^{16}O -richに変化
- Ti価数とEu負異常からBlocky fassaite結晶成長とともに周囲の環境が還元的に変化
- 酸素同位体とレドックスの変化の方向は ^{16}O -poor H_2O の減少で説明可能

**火成CAIの結晶化履歴・結晶成長を考慮した分析は
太陽系最初期のダイナミックな環境変動を明らかにできる**