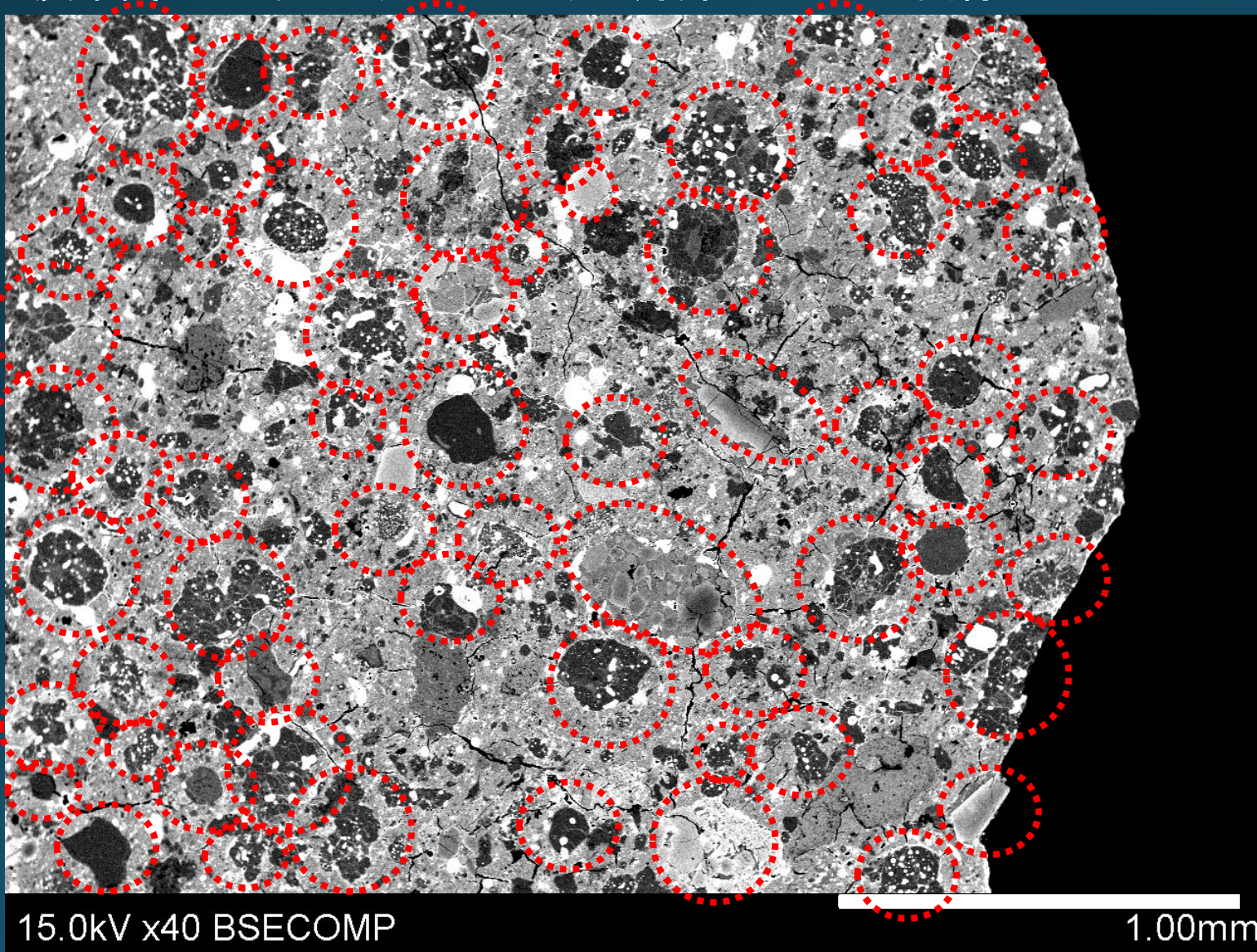


酸素同位体比から推定される コンドロール形成環境

牛久保 孝行
(海洋研究開発機構 高知コア研究所)

Chondrule (コンドルール)

炭素質コンドライト(Acfer 094)の薄片 SEM-BSE画像



➤ 原始太陽系円盤環境で
熔融した珪酸塩粒子

冷却速度 $\sim 10\text{s} - 10^3\text{s } ^\circ\text{C/h}$

➤ 形成年代

45.65 ~ 45.63(?)億年前

➤ 大量に、広範に存在

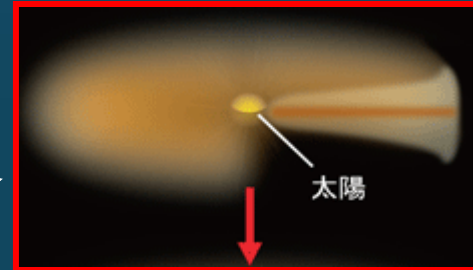
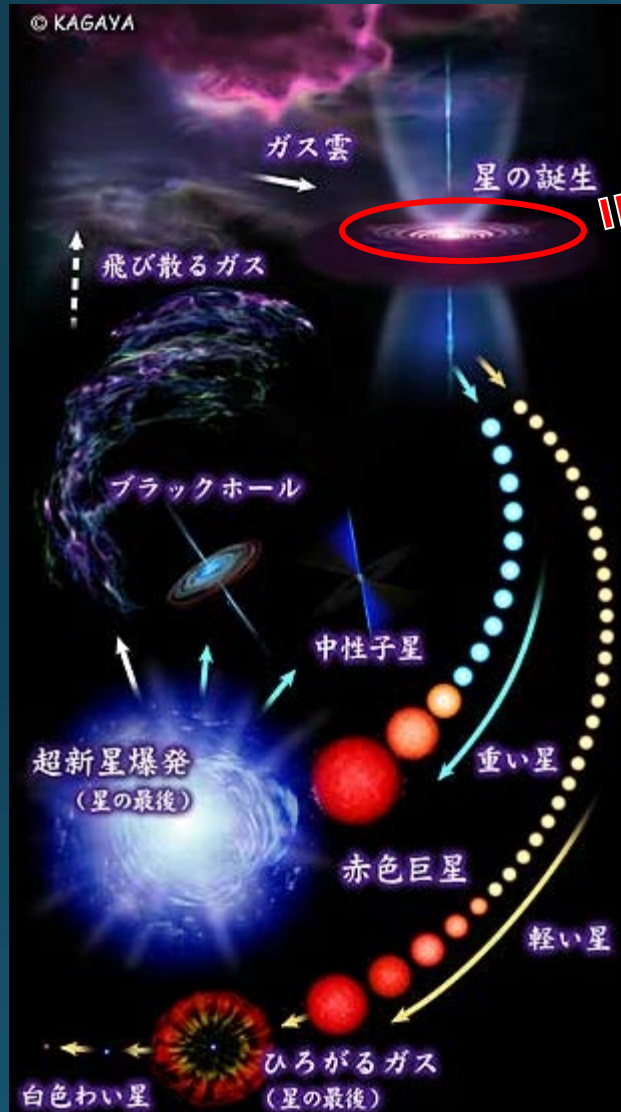
普通コンドライト: 60-80%

炭素質コンドライト: 20-60%

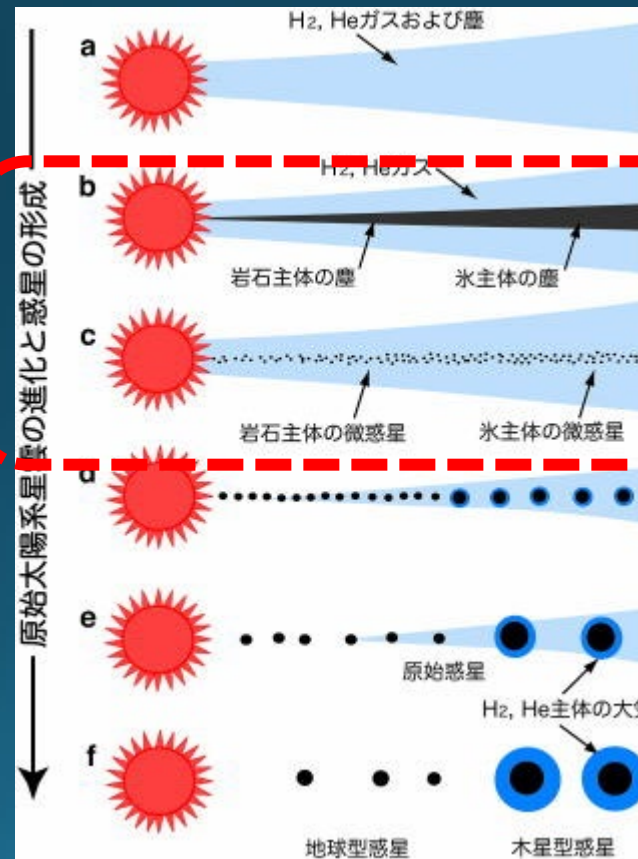
CIコンドライト: <5%

Comet 81P/Wild: ごく僅か?
(vol. %)

コンドロールの形成



Protoplanetary Disk
“惑星系の母体”



Sub-mmダストの形成から
微惑星形成にかけての時期

(提唱されている主な形成機構)

- 微惑星衝突
- 微惑星による衝撃波
- 円盤スケールの衝撃波
- 雷放電

(Desch+ 2012 MAPS)

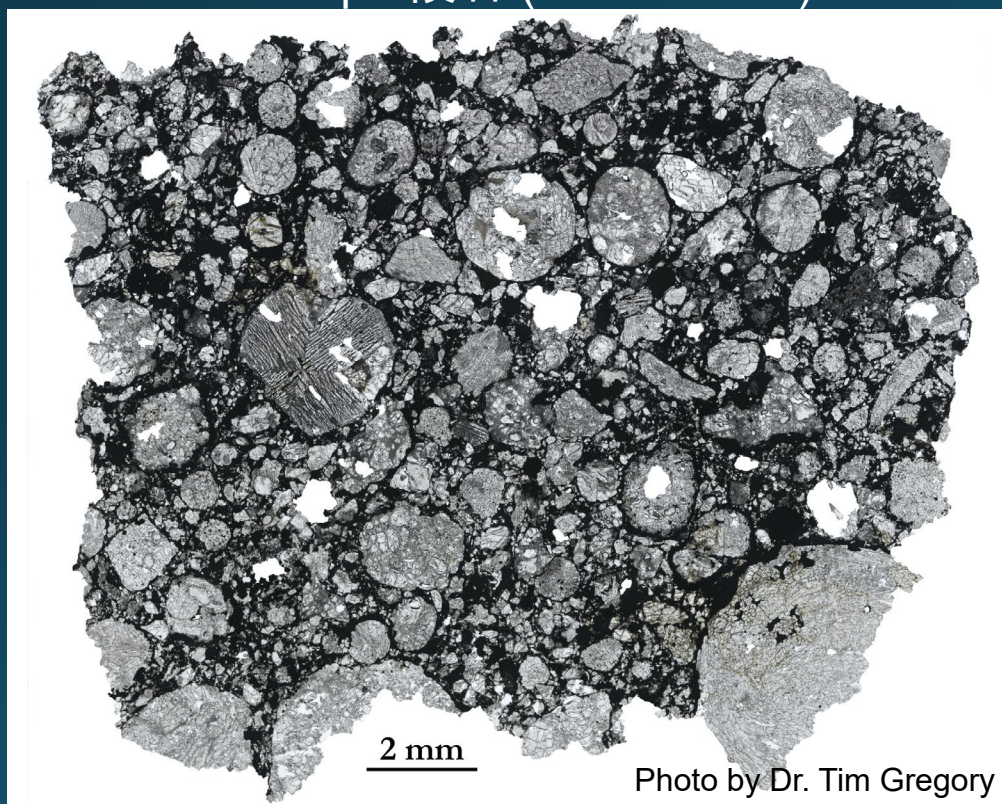
どのモデルであれ、説明されるべき
酸素同位体比の主な特徴は何か

コンドロールの多様性

形成領域 (≡ 母天体の集積領域)

Non-carbonaceous (NC)

Bishunpur隕石 (LL chondrite)



Carbonaceous (CC)

NWA 801隕石 (CR chondrite)

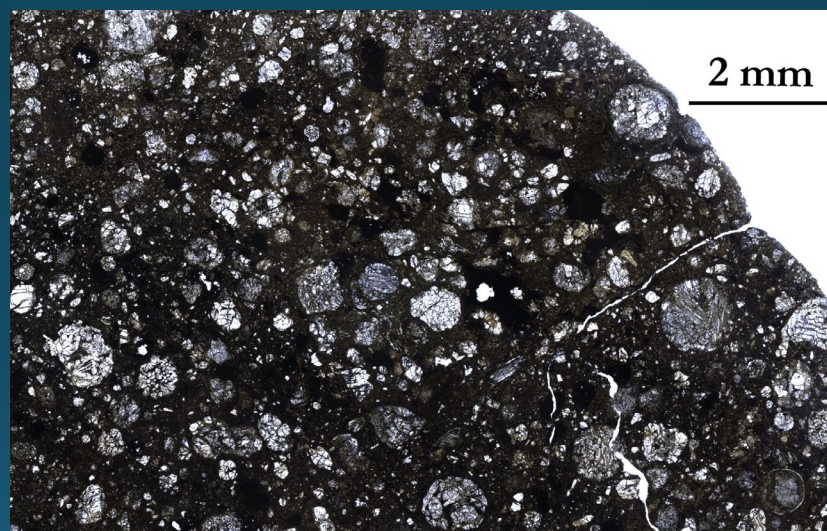
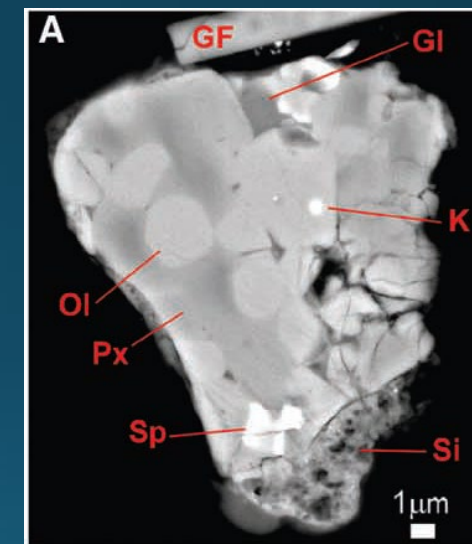


Photo by Dr. Tim Gregory

Cometary

81P/Wild particle



Nakamura+ 2008 *Science*

酸素同位体比の特徴はNCとCCのコンドロールで異なる

コンドルールの多様性

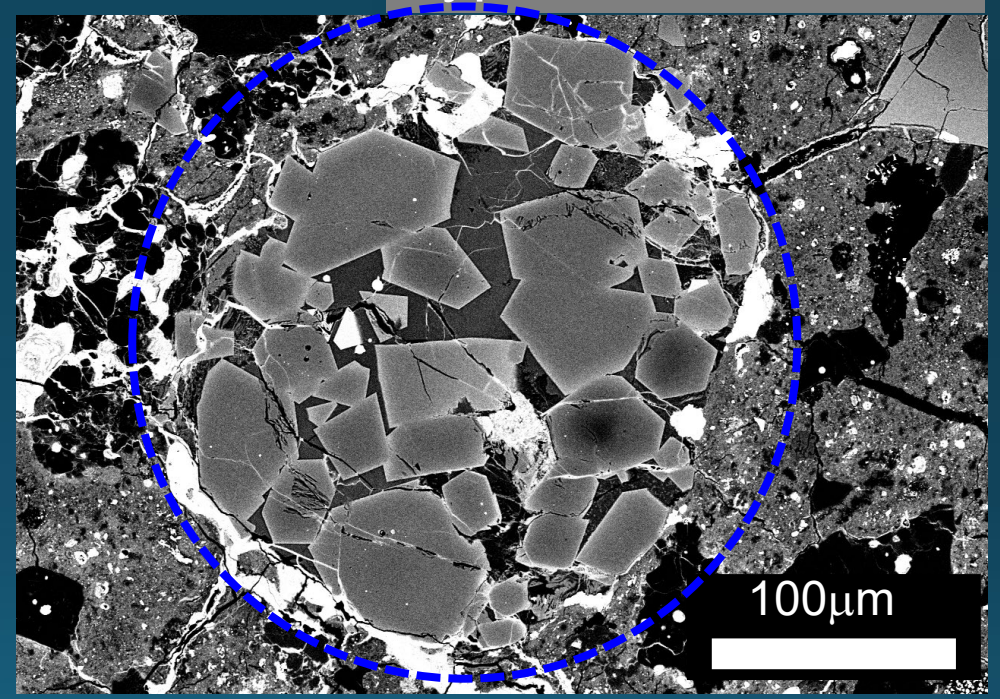
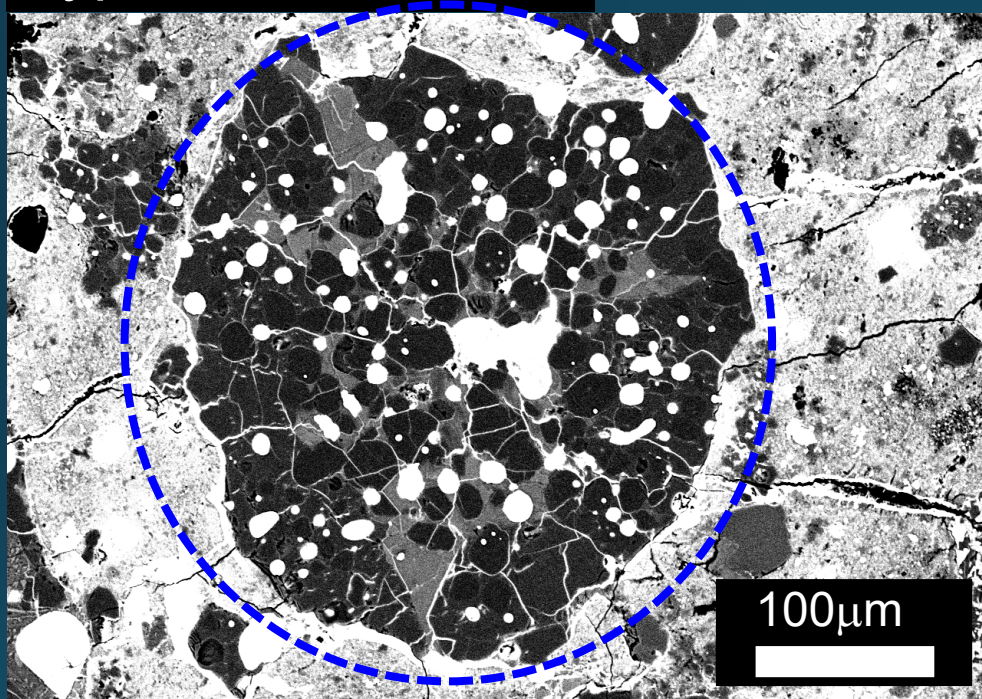
還元的 & 酸化的 環境で形成

※同じ隕石に存在

Type I (90%以上)

電子顕微鏡のBSE像(組成像)

Type II (10%未満)



$\text{MgO} + \text{Fe} (+ \text{O})$
(還元的: $\log f\text{O}_2 \sim \text{IW}-3.5$)



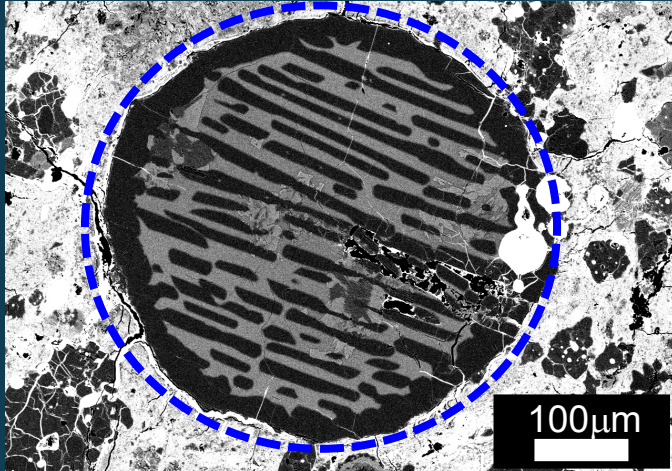
$\text{MgO} + \text{FeO}$
(酸化的: $\log f\text{O}_2 \sim \text{IW}-2$ to $\text{IW}-1$)

CCのコンドルールでは酸素同位体比に違いが見られる

コンドルールの多様性

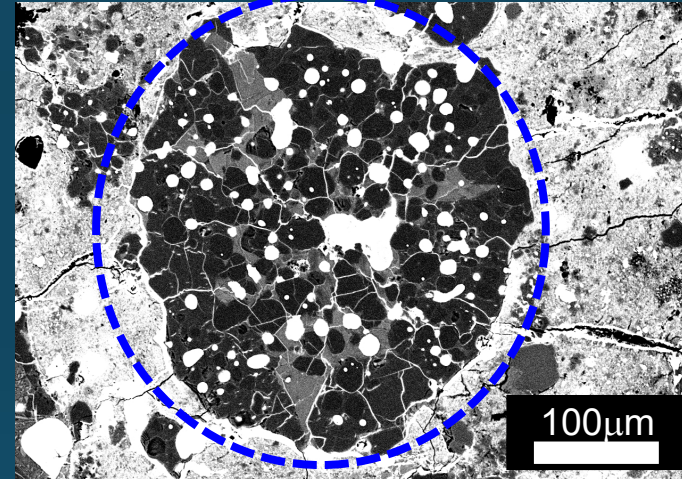
鉱物・組織的特徴

急冷結晶組織

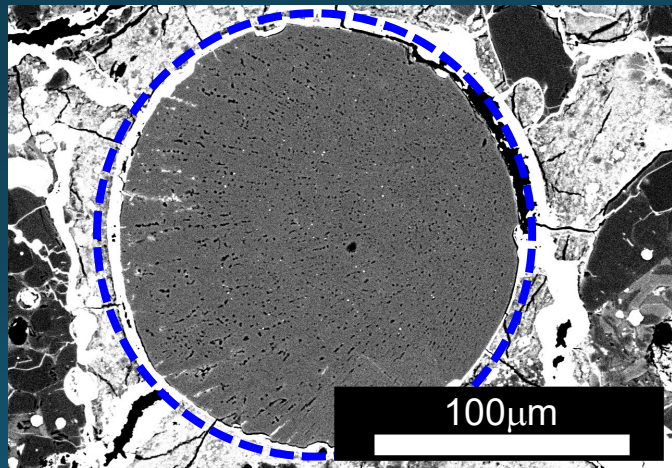


Barred Olivine
(Mg_2SiO_4 -rich)

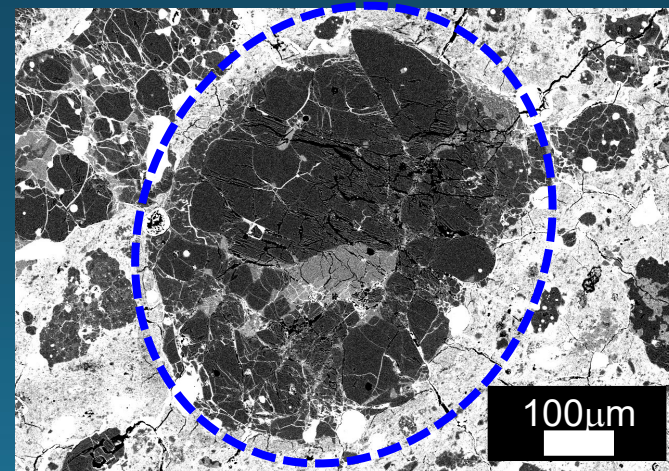
斑状組織



Porphyritic
(Fe-metalが多い)



Radial Pyroxene
(MgSiO_3 -rich)



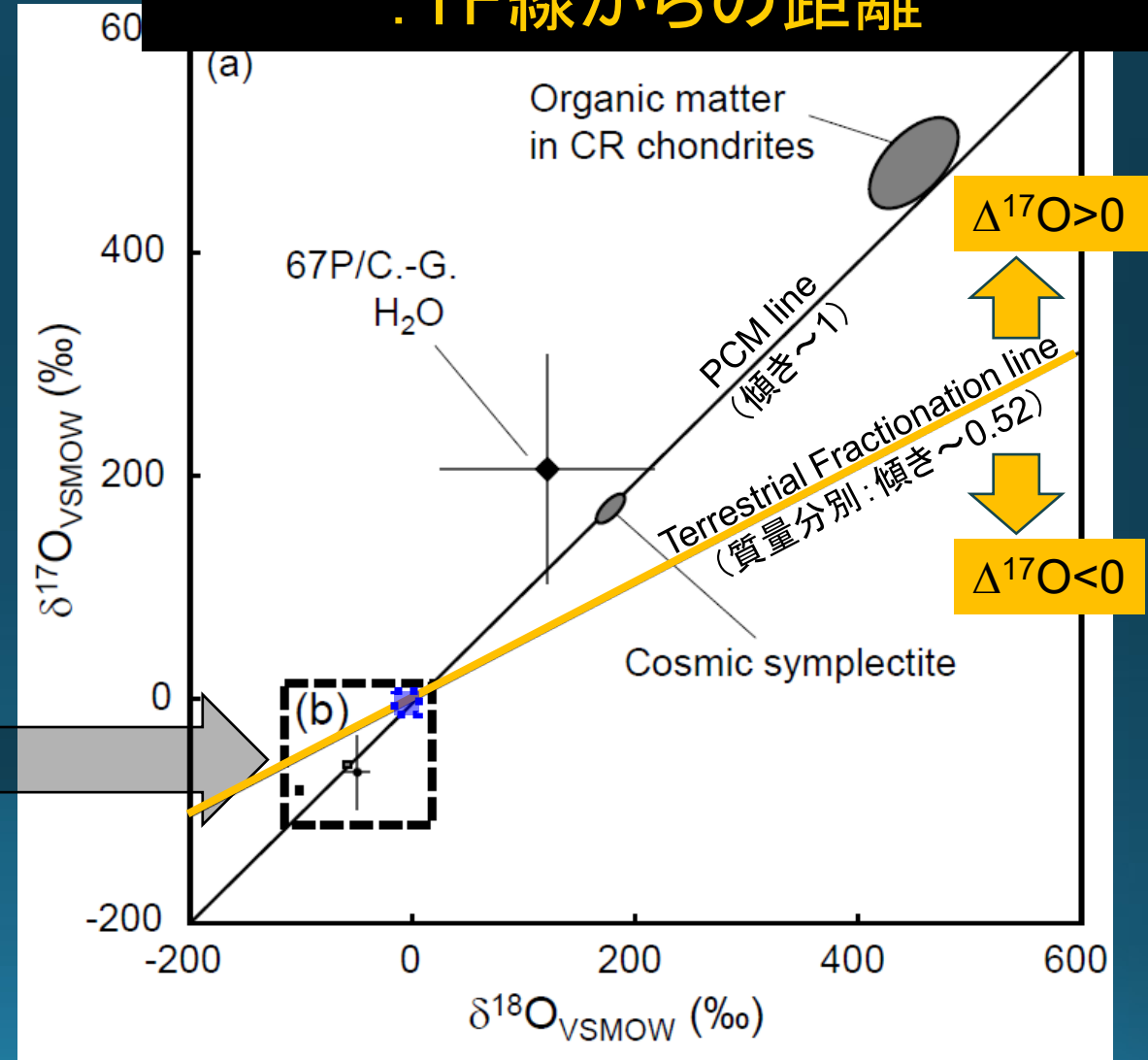
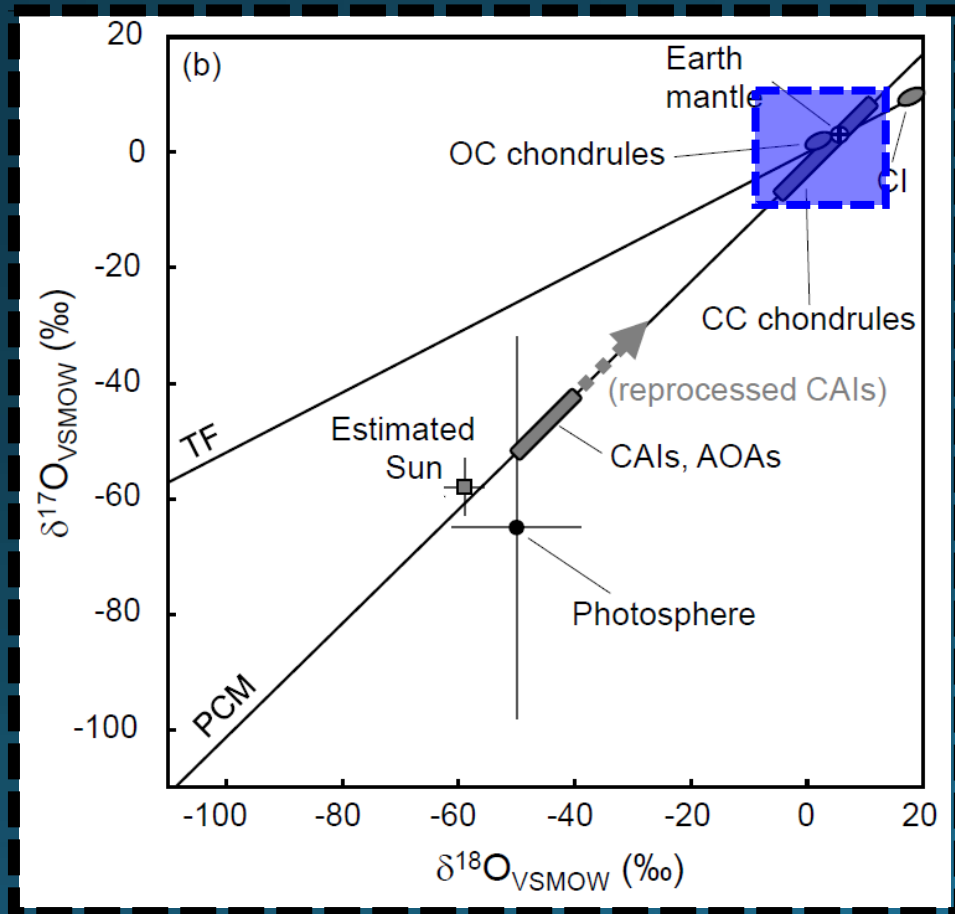
Porphyritic
(Fe-metalが少ない)

酸素同位体比は組織や鉱物組み合わせ(形成条件や化学組成)とは無関係

太陽系物質の酸素同位体分布

- 傾き~1の直線上に分布 PCM線: ushikubo+ (2012) GCA
- 難揮発性物質は ^{16}O -rich、揮発性成分は ^{16}O -poor
- 同位体分別作用とMixingを分けて議論できる

$\Delta^{17}\text{O}$ 値 ($= \delta^{17}\text{O} - 0.52 \times \delta^{18}\text{O}$)
: TF線からの距離

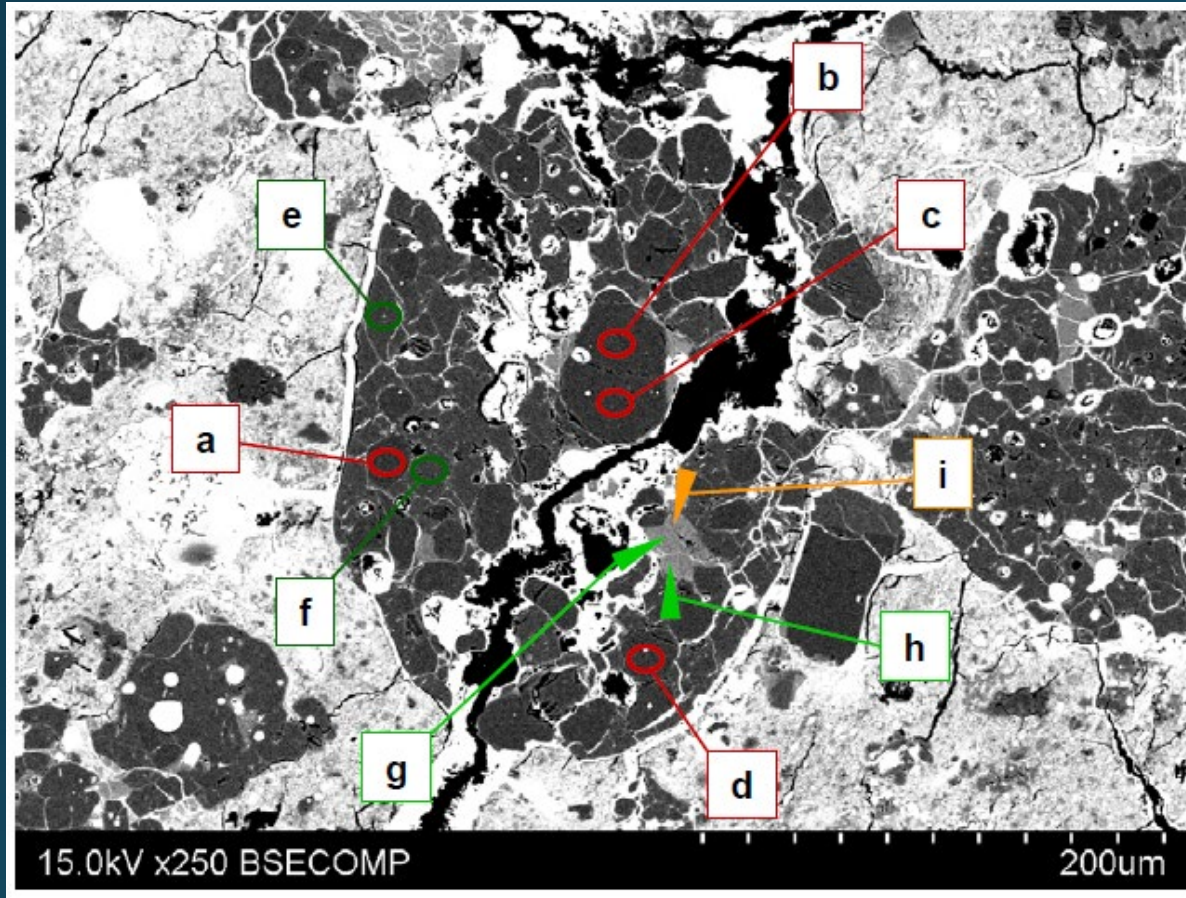


コンドルールの酸素同位体比の特徴

1. 個々のコンドルールの大部分は均質

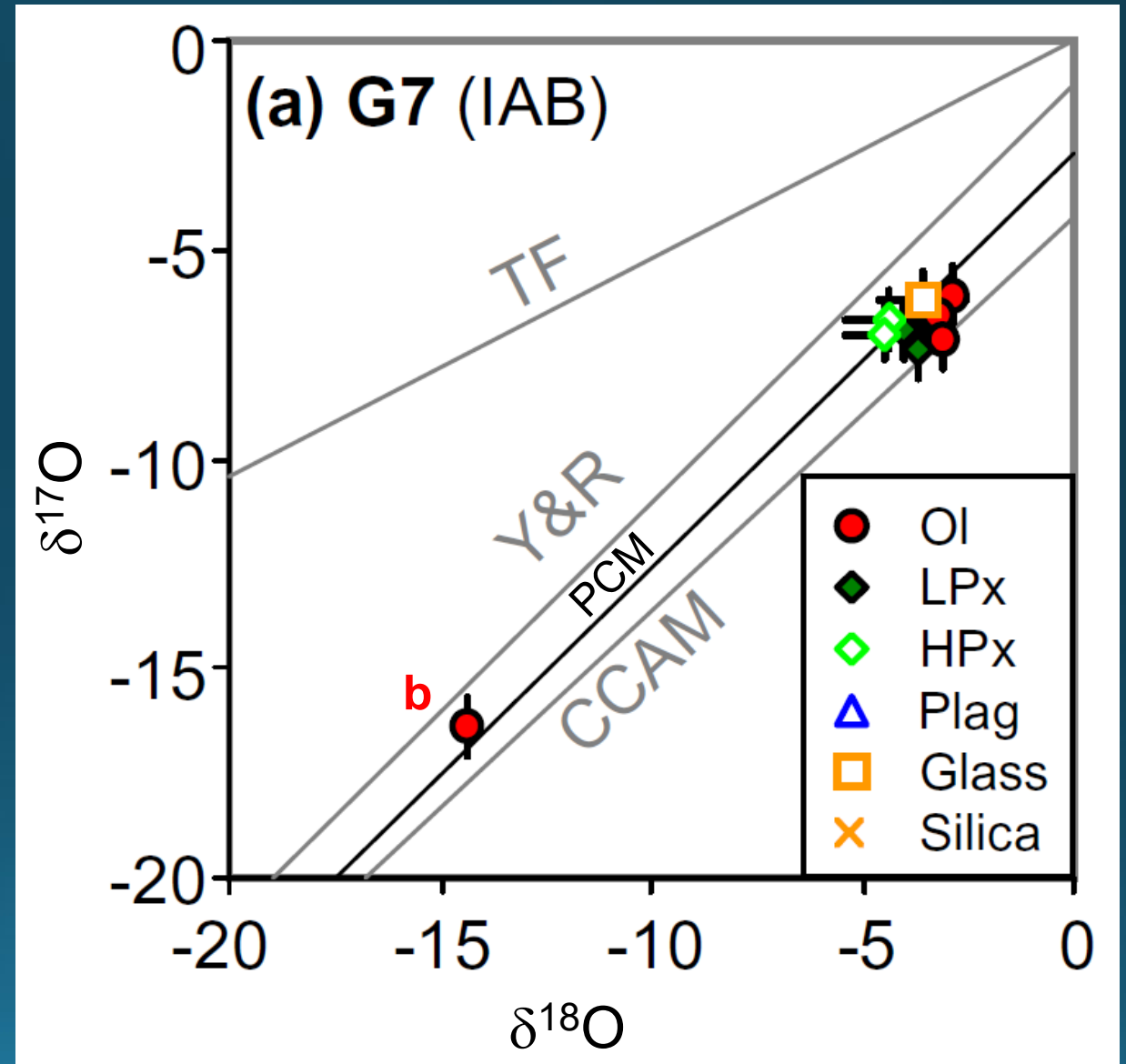
複数点分析の例

Ushikubo+ 2012 GCA

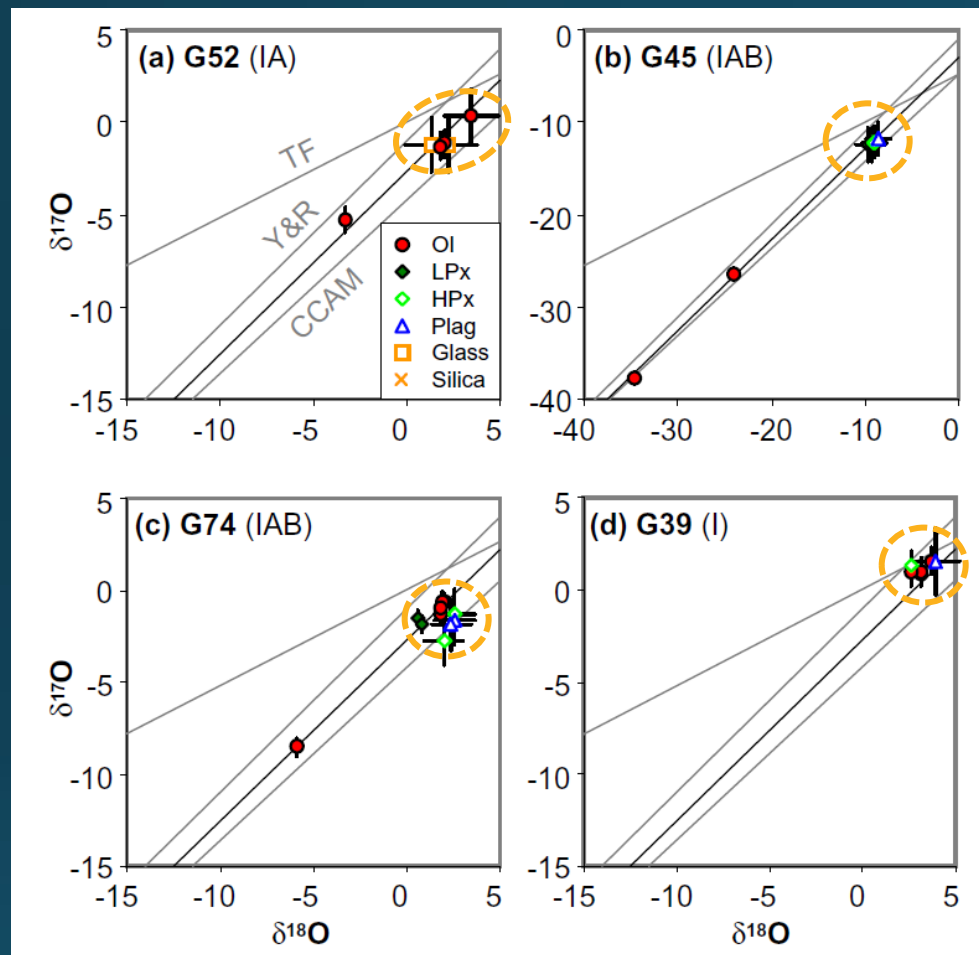


大部分は酸素同位体比が均質なメルト
から結晶・ガラスが形成している

※ 熔け残り粒子(b)を除く



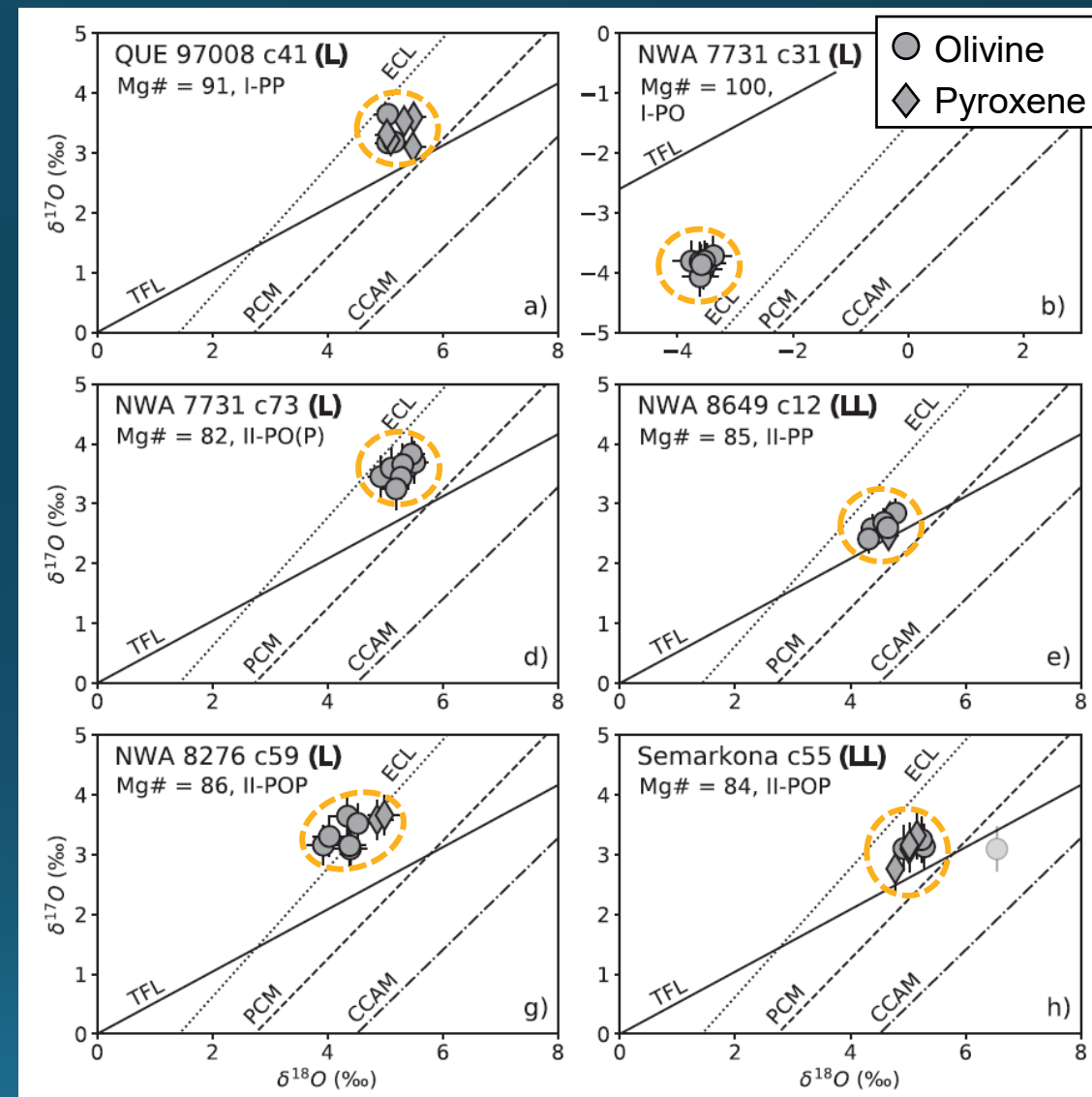
CC隕石 コンドルール例



↑ Ushikubo+ 2012 GCA

Siron+ 2022 GCA →

NC隕石 コンドルール例



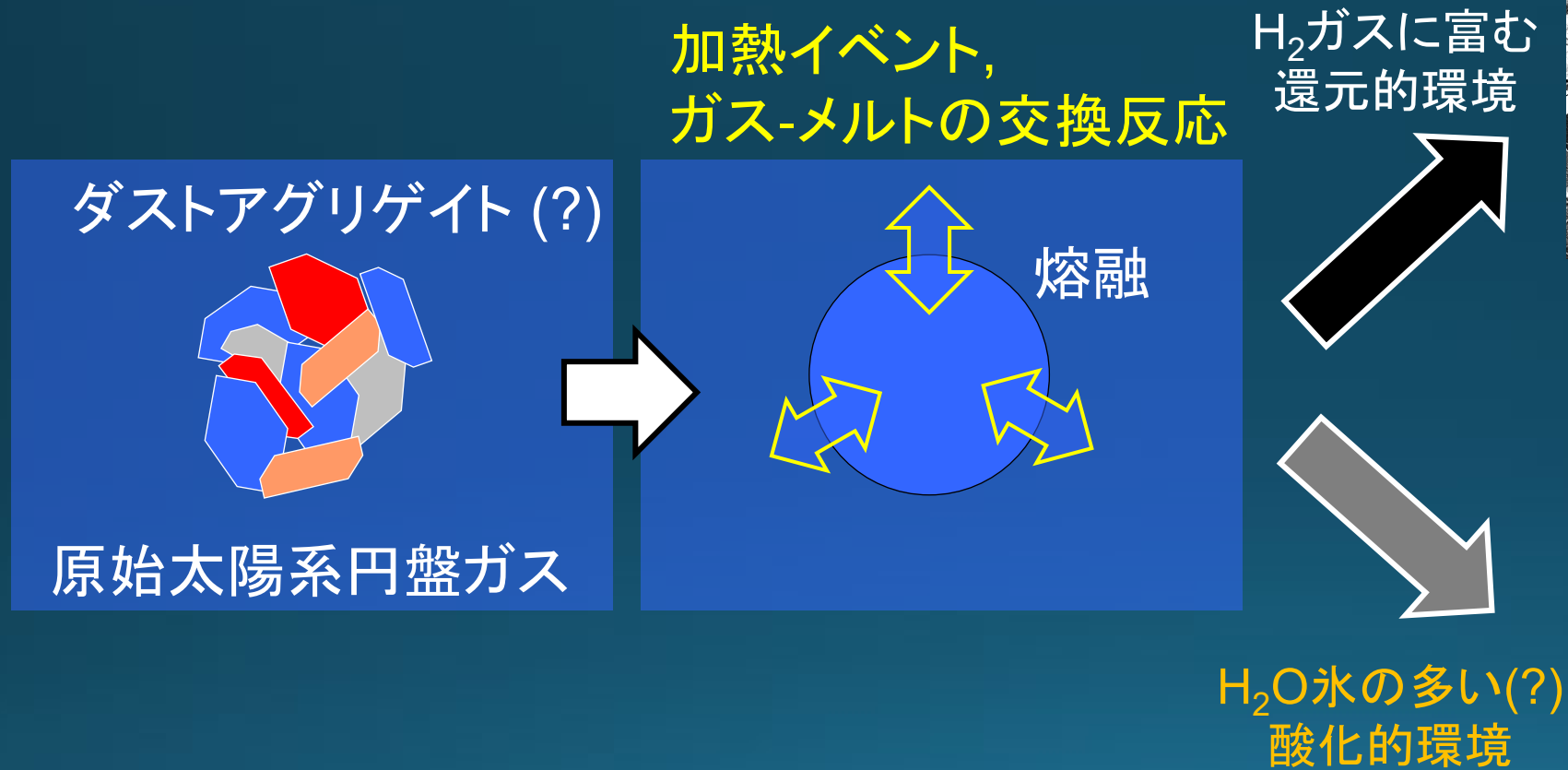
隕石タイプ毎のコンドルール酸素同位体比分布:

熔け残り粒子を除く部分 ($\Delta^{17}\text{O}$ 値分析精度 3σ 以内) の 平均値 を示す

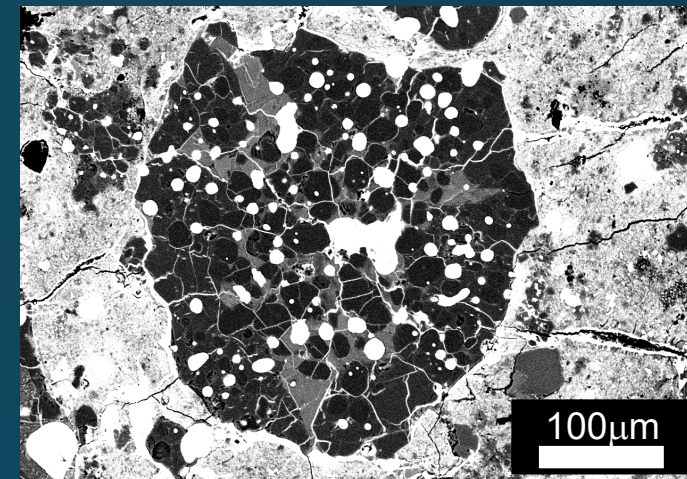
コンドルールの酸素同位体比の特徴

2. CC隕石： H_2O 氷の影響を示唆する 酸化還元状態との相関

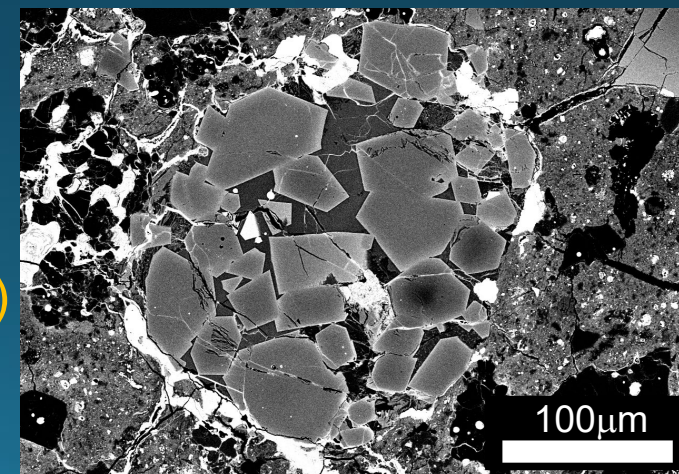
コンドルールの形成環境



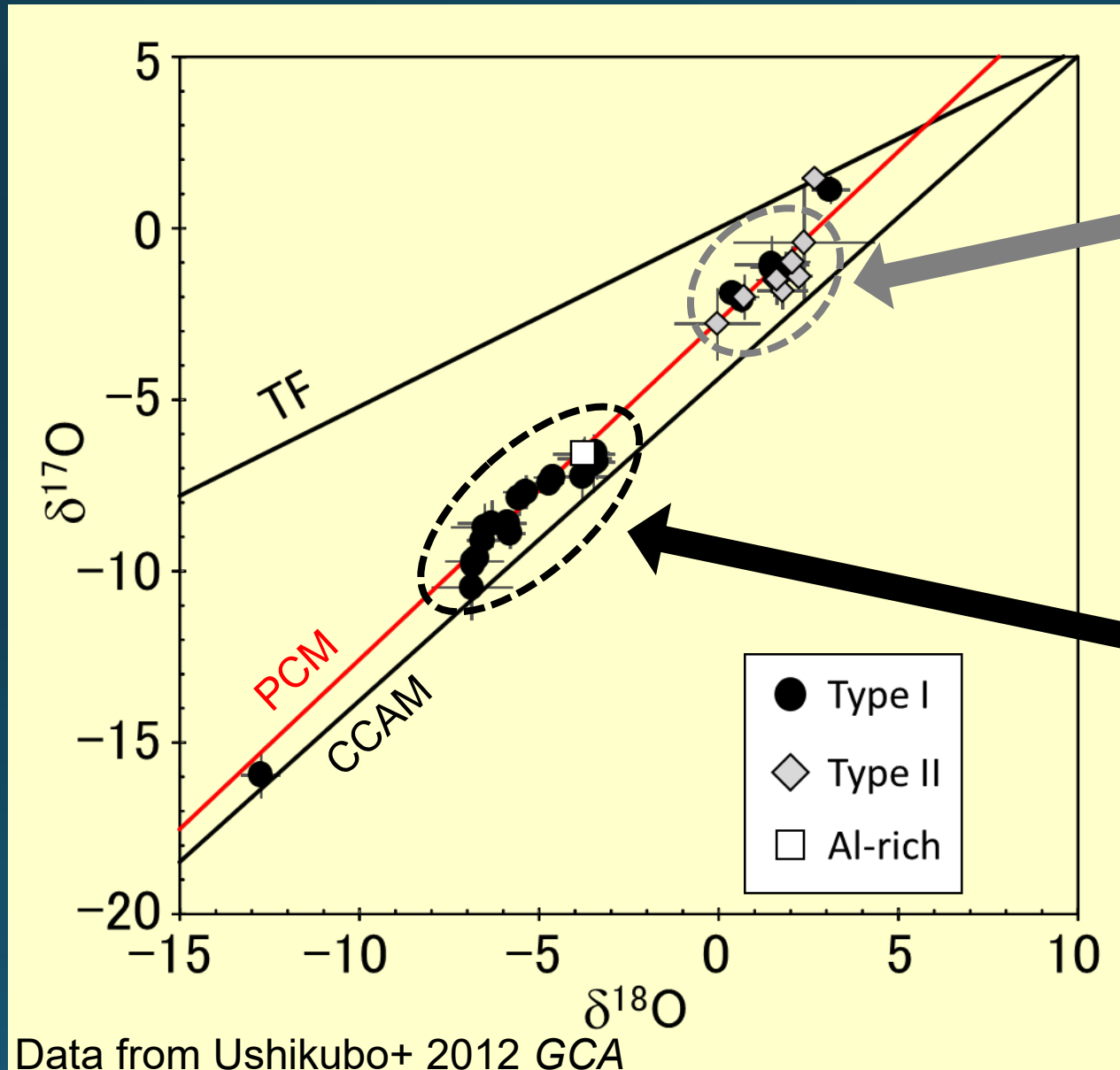
Type I: MgO-rich



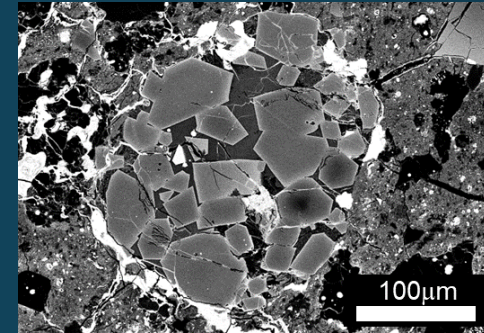
Type II: FeO-rich



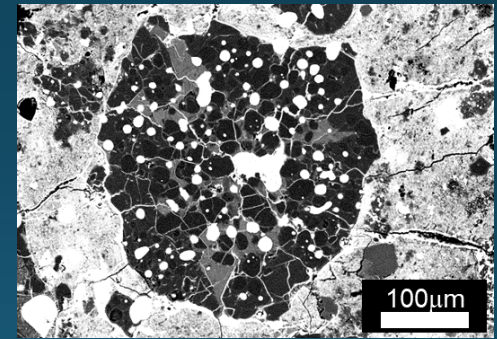
酸化的なType IIコンドルールは $\Delta^{17}\text{O}$ 値が高い



Type II コンドルール
 $\Delta^{17}\text{O} \sim -2\text{‰}$



Type I コンドルール
 $\Delta^{17}\text{O} \sim -5\text{‰}$

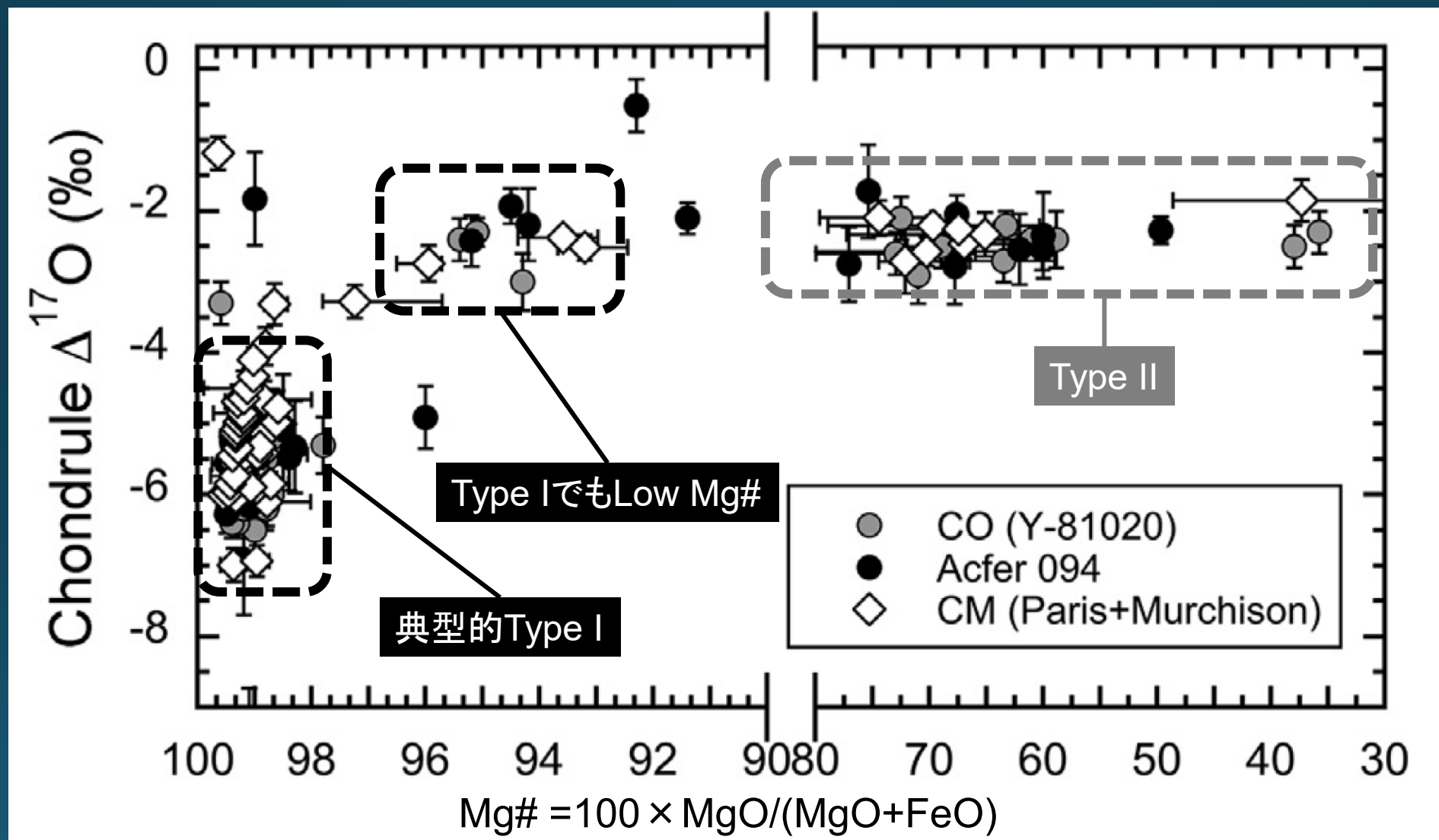


高い $\Delta^{17}\text{O}$ 値を持つ
酸化剤成分(H_2O ?)の増加が原因

酸素同位体比($\Delta^{17}\text{O}$ 値)と酸化還元状態(Mg#)の相関

CM/COコンドライト (C型小惑星起源)

Shaumard+ 2021 GCA

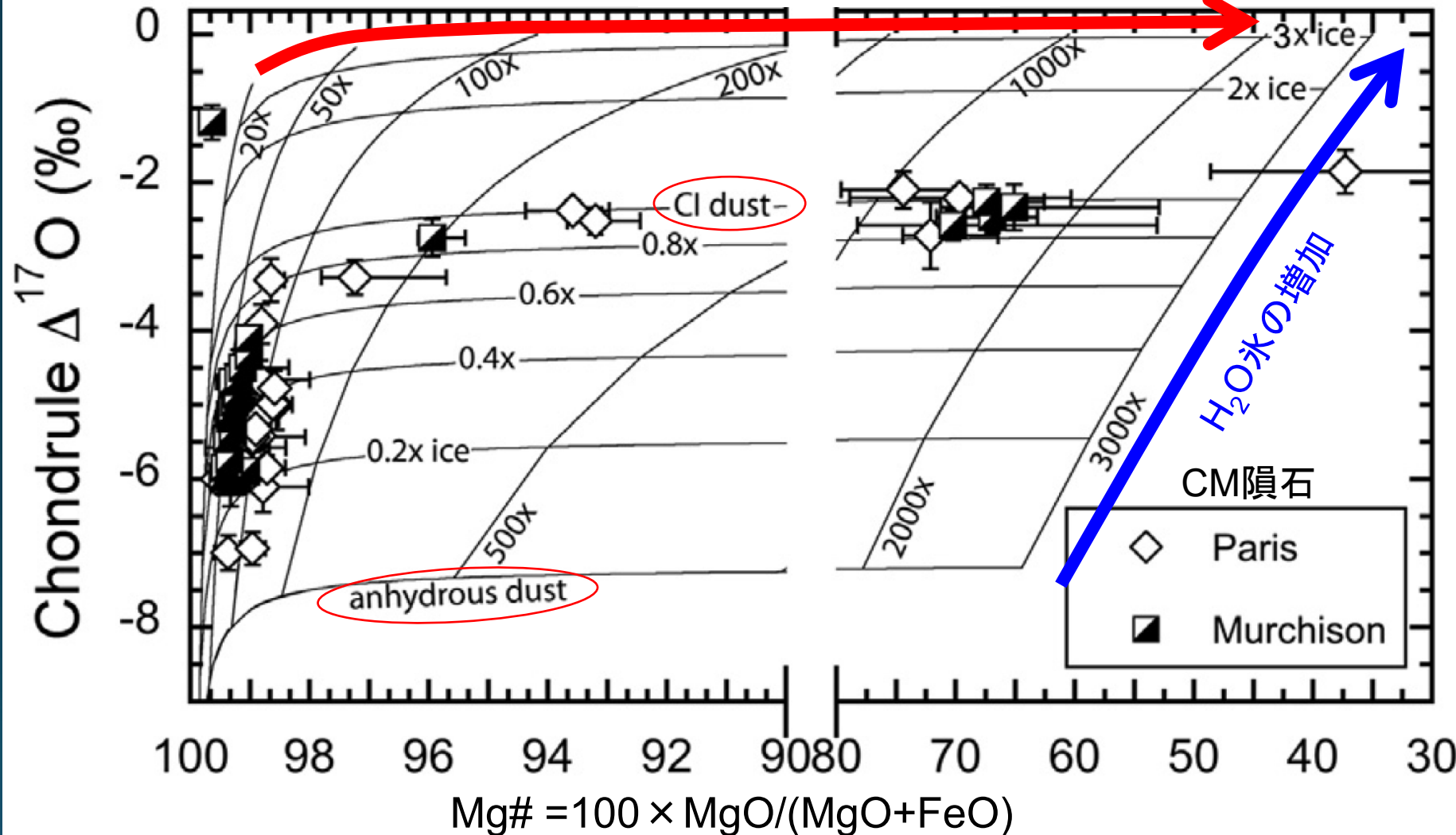


(還元的)

(酸化的)

酸素同位体比($\Delta^{17}\text{O}$ 値)と酸化還元状態(Mg#)の相関

ダスト/ガス比の増加



Tenner+ 2015 GCA
Hertwig+ 2018 GCA

コンドルール分布は
『太陽組成円盤ガス』
に対して
『無水珪酸塩と H_2O 氷
の混合ダスト』
が濃集することで説明可能。

図の場合

Solar Gas: $\Delta^{17}\text{O} = -28.4\text{‰}$
有機物: $\Delta^{17}\text{O} = +11\text{‰}$
Silicates: $\Delta^{17}\text{O} = -8\text{‰}$
 H_2O 氷: $\Delta^{17}\text{O} = +2\text{‰}$
で計算。

(Chaumard+ 2021 GCA)

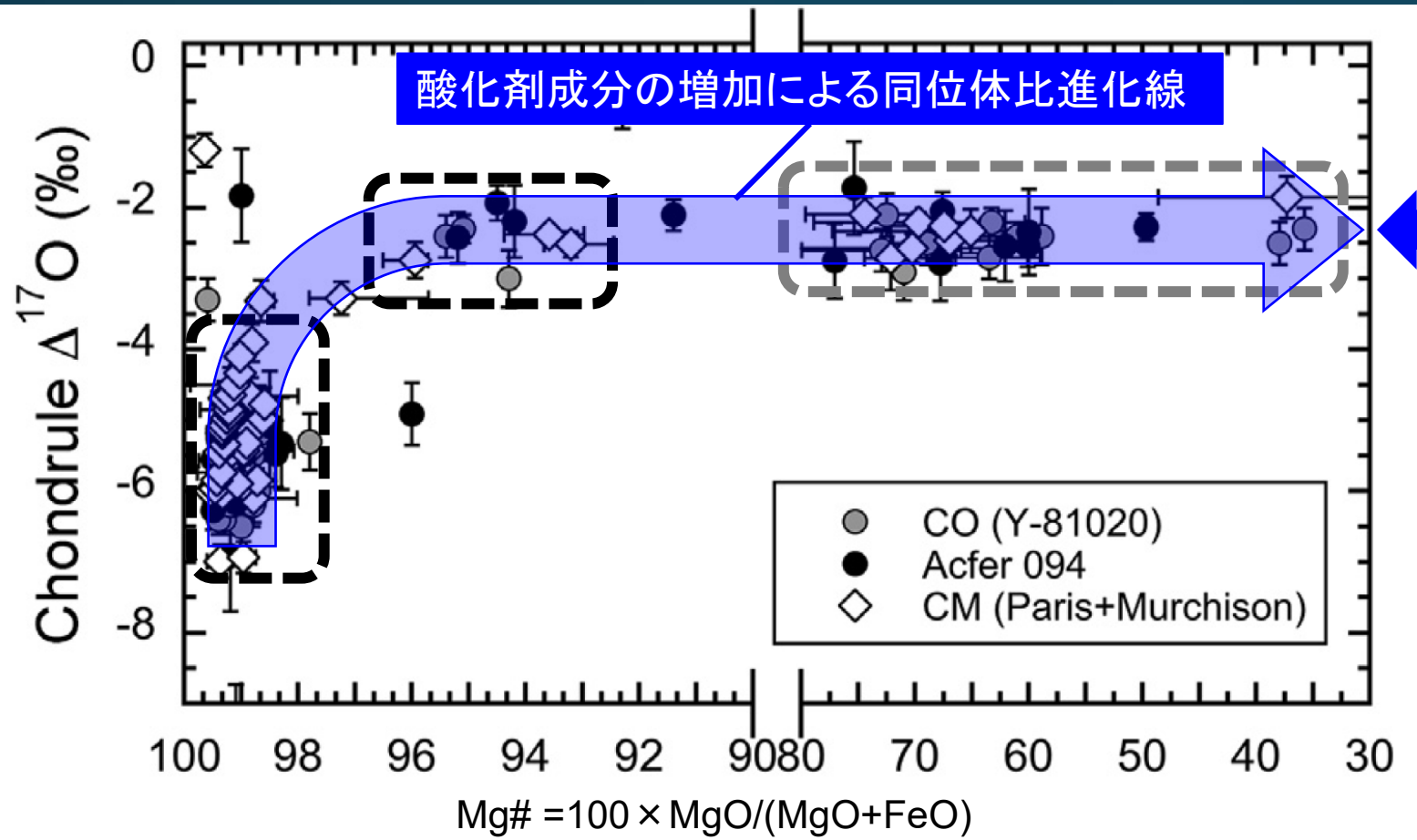
(還元的)

(酸化的)

酸化剤成分の酸素同位体比($\Delta^{17}\text{O}$ 値)の推定

CM/COコンドライト (C型小惑星起源)

Shaumard+ 2021 GCA



コンドライトの同位体比分布を

還元的
珪酸塩ダスト
($\Delta^{17}\text{O} \sim -8\text{‰}$)

と

酸化剤成分
($\Delta^{17}\text{O} \sim -2\text{‰}$)

の混合で説明すると

酸化剤成分
 $\Delta^{17}\text{O} \sim -2\text{‰}$

酸化剤成分が H_2O 氷の場合:

$$\Delta^{17}\text{O}(\text{H}_2\text{O氷}) = -2\text{‰}$$

CIコンドライト的物質の場合:

(酸素の44%:珪酸塩、54%: H_2O 、
2%:有機物)

$$\Delta^{17}\text{O}(\text{H}_2\text{O氷}) = +2.5\text{‰}$$

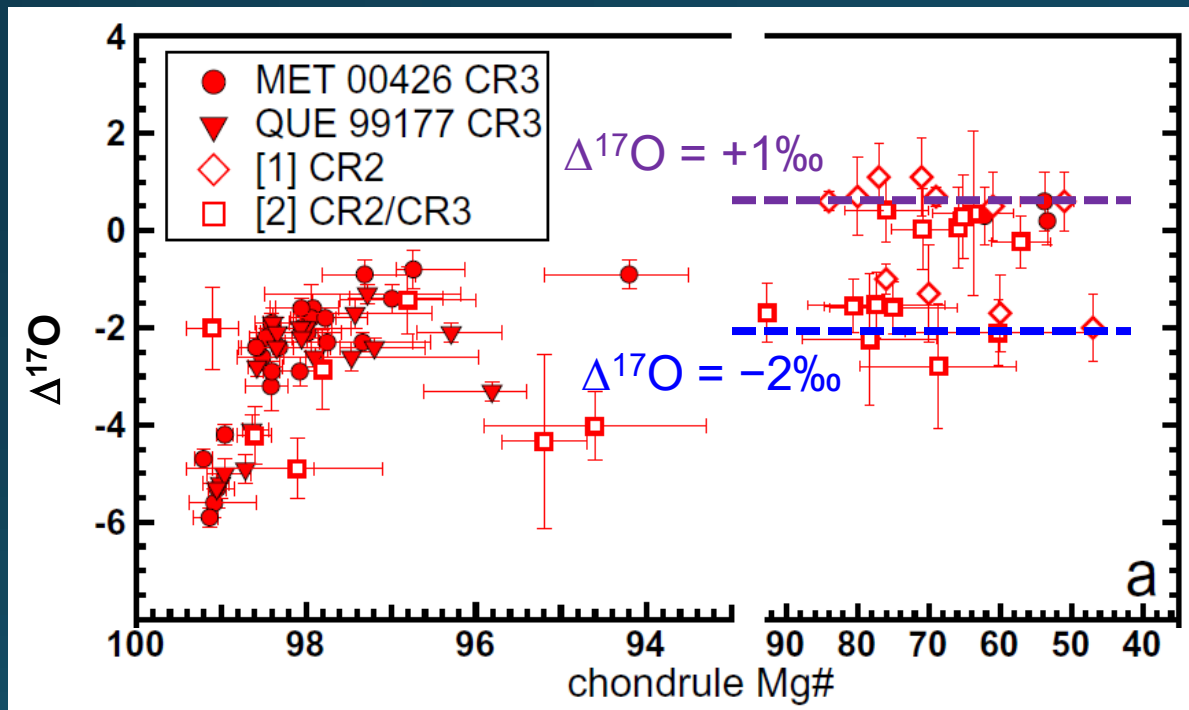
(還元的)

(酸化的)

さらに遠方の母天体中のコンドルール

さらに高い $\Delta^{17}\text{O}$ 値を持つ
Type II(酸化的)コンドルールが存在

CR隕石

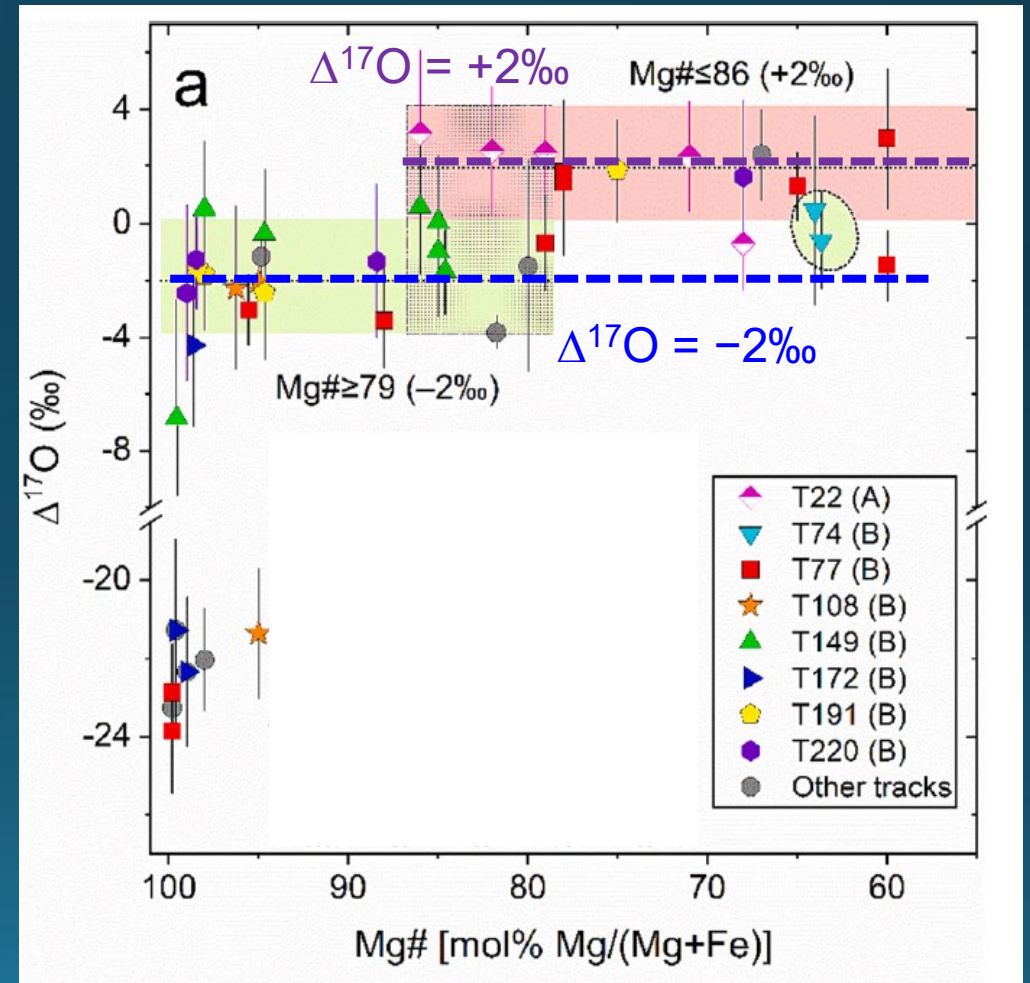


Tenner+ 2015 GCA

※高い $\Delta^{17}\text{O}$ 値を持つType II コンドルールは、
Tagish Lake (-like)隕石やCH隕石からも見つかる

Yamanobe+ 2018 *Polar Sci.*; Ushikubo & Kimura 2021 GCA; Nakashima+ 2024 GCA. etc.

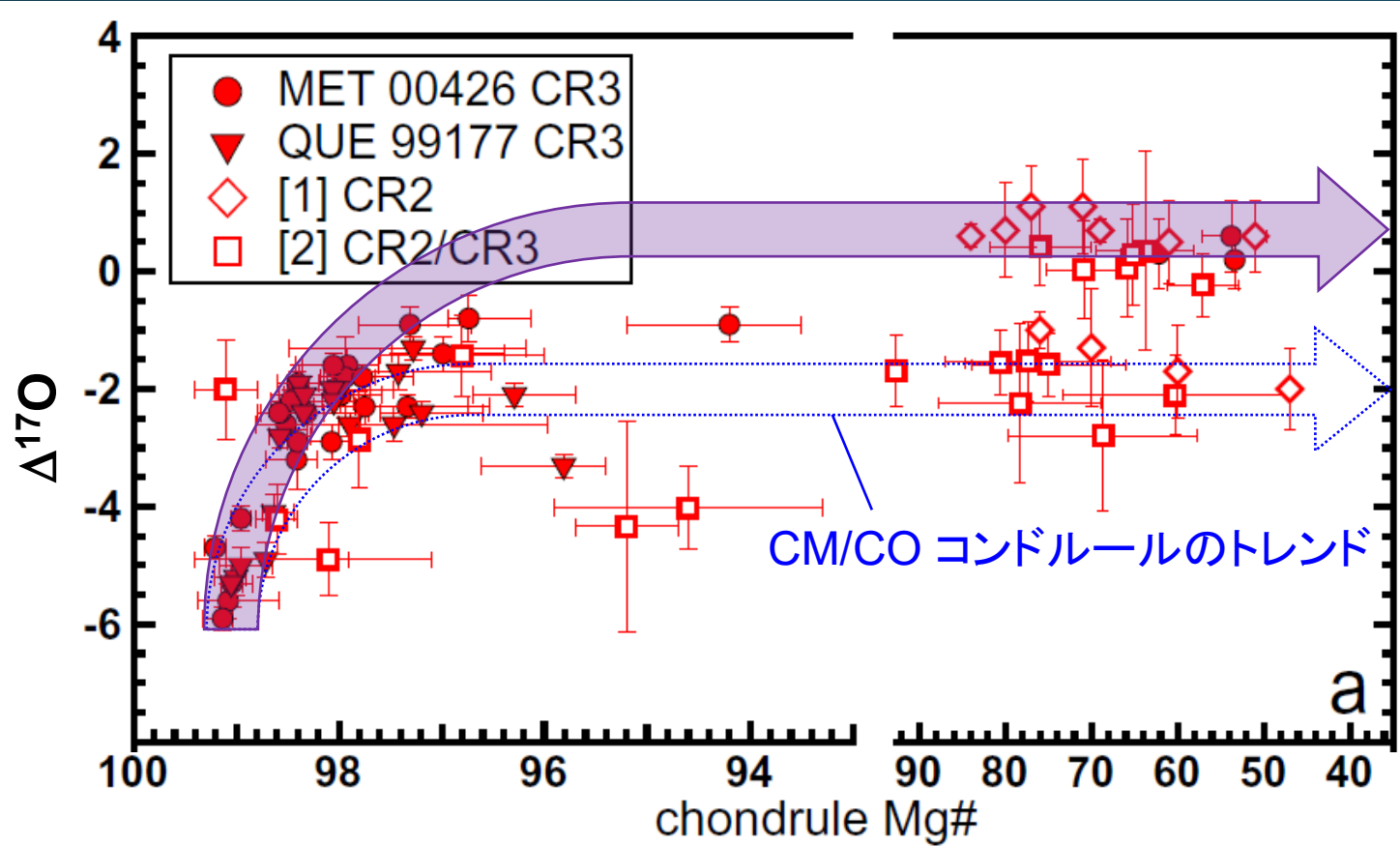
81P/Wild彗星 珪酸塩鉱物粒子



Zhang M.+ 2024 GCA

円盤遠方にさらに $\Delta^{17}\text{O}$ が高い“酸化剤”が存在？

CR隕石の場合



彗星やD型小惑星には
遠方で形成したコンドルール
が保存されている？

遠方の
酸化剤成分
 $\Delta^{17}\text{O} \sim +1\text{‰}$

酸化剤成分が H_2O 氷の場合：

$$\Delta^{17}\text{O}(\text{H}_2\text{O氷}) = +1\text{‰}$$

CIコンドライト的物質の場合：

(酸素の44%:珪酸塩、54%: H_2O 、
2%:有機物)

$$\Delta^{17}\text{O}(\text{H}_2\text{O氷}) = +8\text{‰}$$

動径方向の同位体比変化

推定されるH₂O氷の酸素同位体比

H₂O氷の酸素同位体比が
傾き~1のPCM line上にあるとした場合

CM/CO隕石

$$\Delta^{17}\text{O} = -2 \sim +2.5\text{‰}$$

CR隕石 (& Tagish Lake隕石)

$$\Delta^{17}\text{O} = +1 \sim +8\text{‰}$$

酸化剤の $\Delta^{17}\text{O}$ 値の違いが

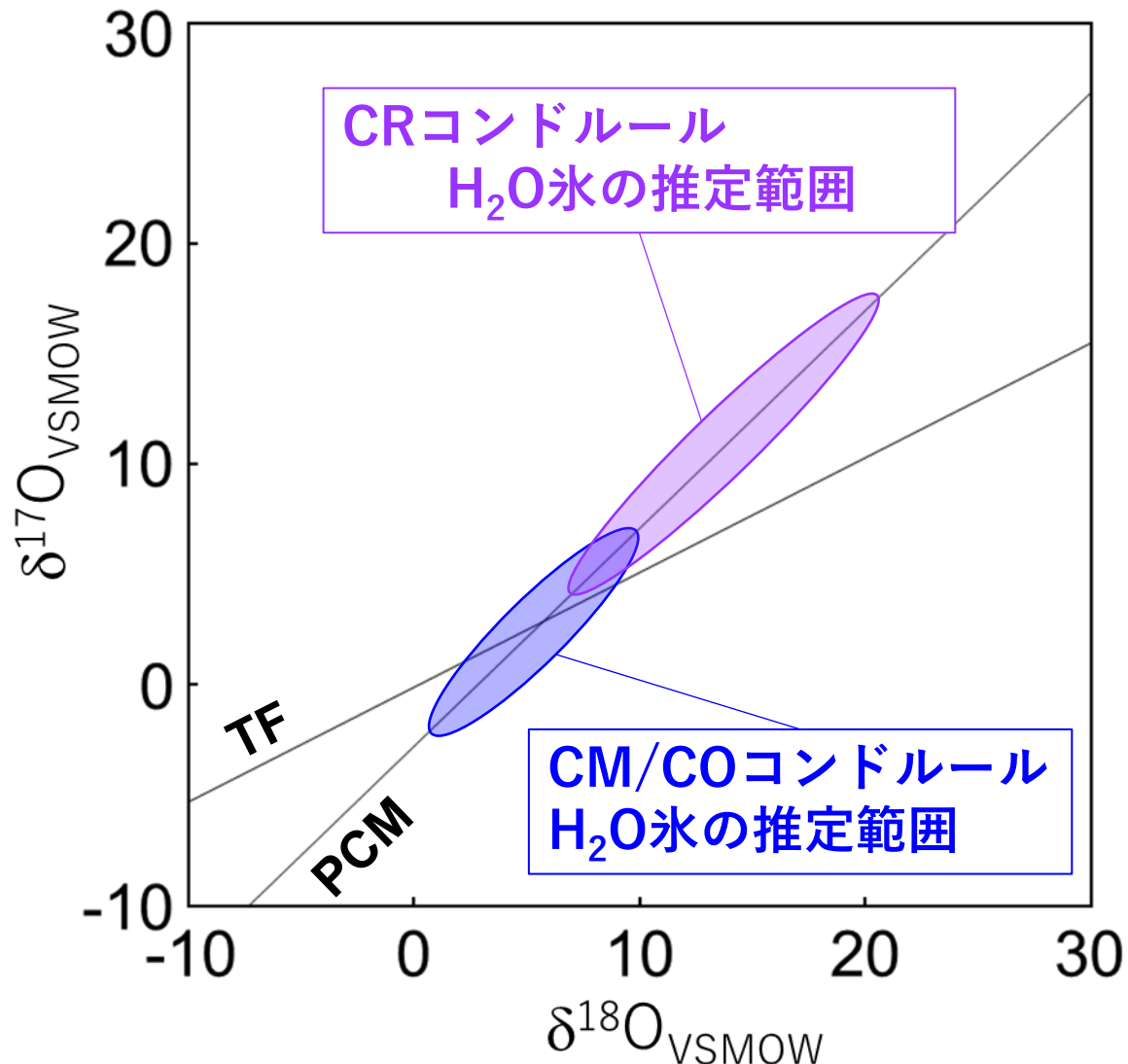
1) 珪酸塩との量比の違い(共通のH₂O氷):

$$\Delta^{17}\text{O}(\text{H}_2\text{O氷}) = +1 \sim +2.5\text{‰}$$

2) H₂O氷と珪酸塩の量比は同じ:

円盤動径方向のH₂O氷の $\Delta^{17}\text{O}$ 値の違い

彗星の始原H₂O氷($\Delta^{17}\text{O} \sim +100\text{‰}$)とは違う



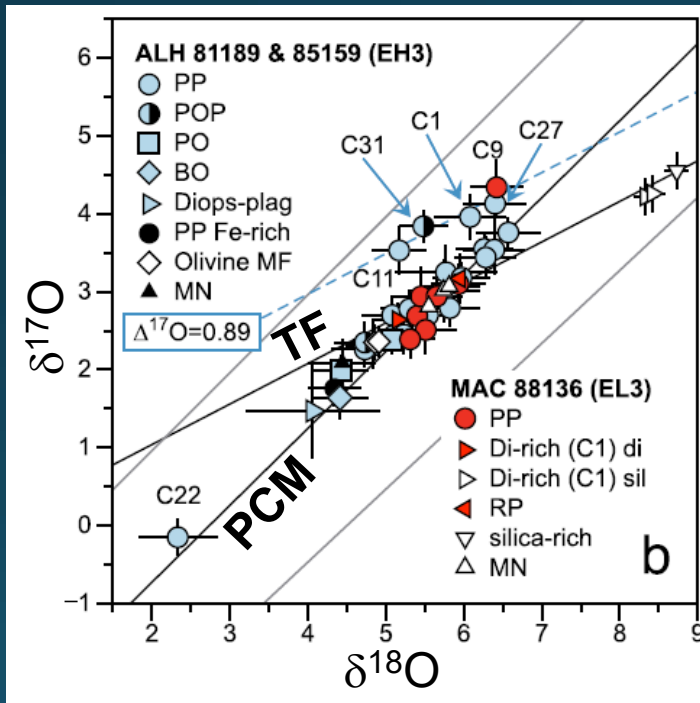
コンドロールの酸素同位体比の特徴

3. NC隕石: Anhydrous Dustの濃集？

主なNC隕石 (E, O, R) のコンドルール

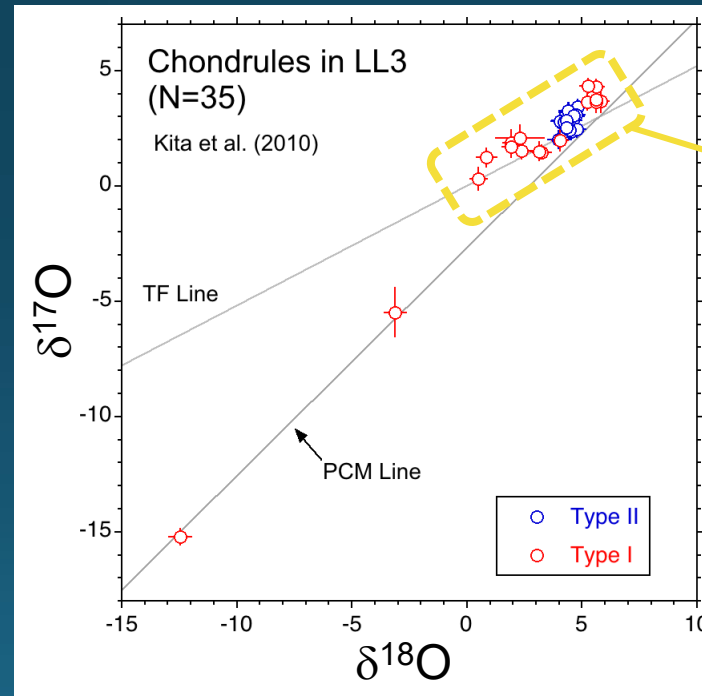
- 主に $\Delta^{17}\text{O} = 0 \sim 2\text{‰}$ の範囲でPCM線の左側に分布
- エンスタタイト隕石は $\Delta^{17}\text{O} = 0$ のことが多い
- 普通隕石とR隕石のコンドルールの分布は良く似ている

Enstatite Chondrites (全岩の $\Delta^{17}\text{O}$ 値: 0‰)



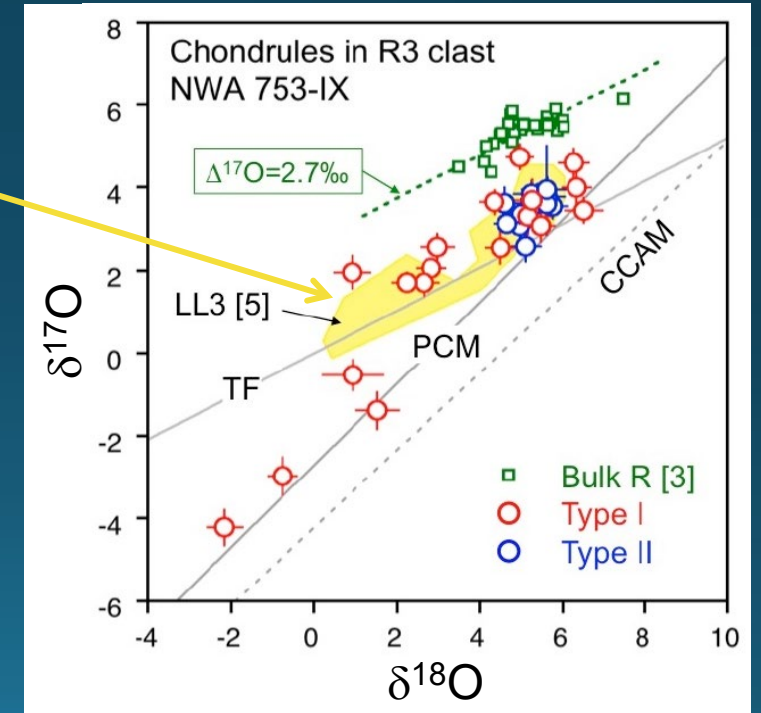
Weisberg+ 2021 GCA

Ordinary Chondrites (LL隕石全岩の $\Delta^{17}\text{O}$ 値: $+1.3\text{‰}$)



Kita+ 2010 GCA

R Chondrites (全岩の $\Delta^{17}\text{O}$ 値: $+2.7\text{‰}$)

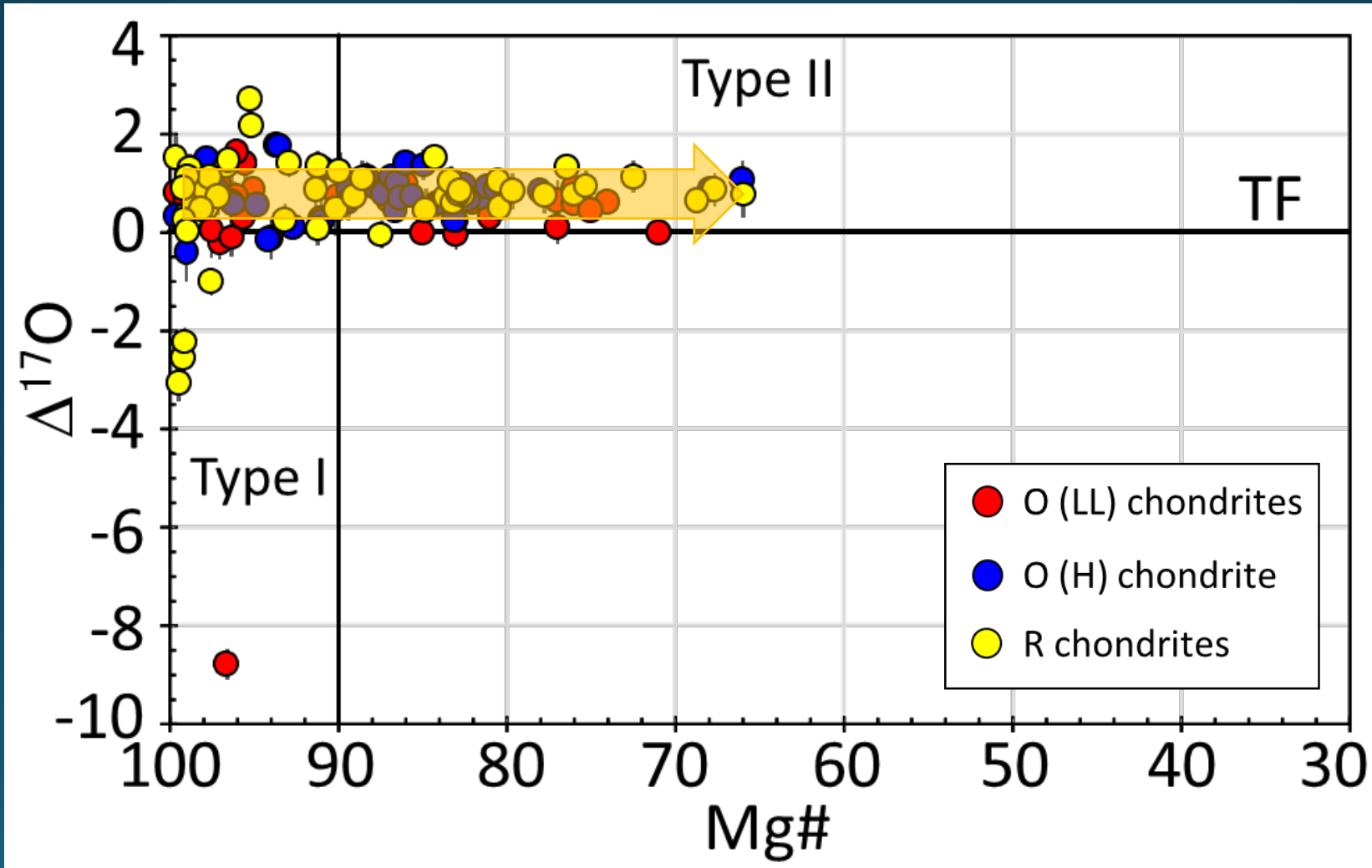


Kita+ 2013 *Metsoc. abst*

酸素同位体比 ($\Delta^{17}\text{O}$ 値) と酸化還元状態 (Mg#) の相関

Mg# との相関無し、Mg#90 付近のギャップ無し

⇒ (無水)ダストの濃集による酸化還元状態の変動？

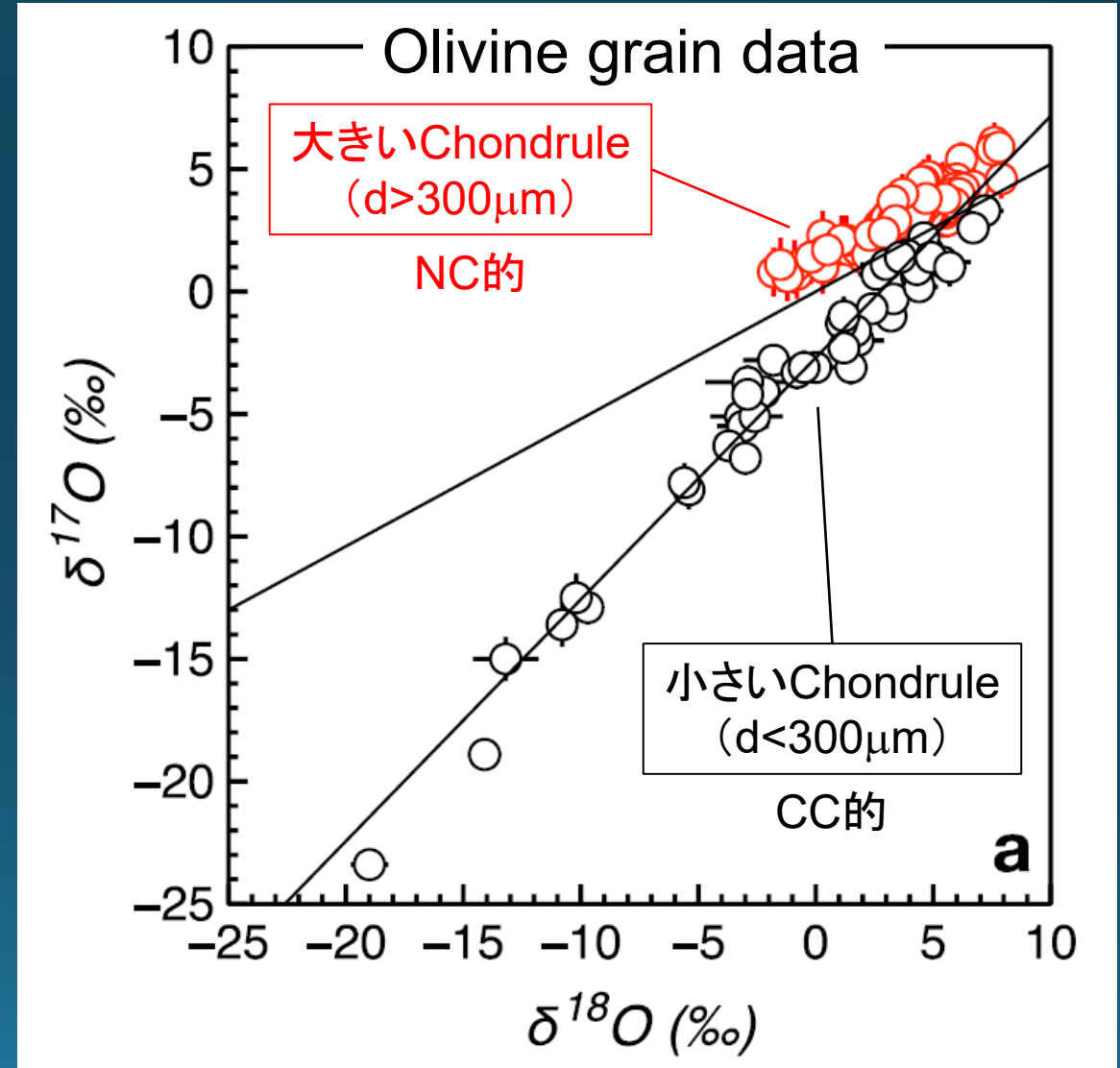


普通隕石(LL隕石)のコンドルールで見つかった 酸素同位体比のサイズ依存性

Marrocchi+ 2024 GCA

- 古い世代のCC隕石的コンドルールが小さいコンドルールとして残っている？
(Marrocchi+ 2024 GCA)
- 小さいコンドルールはCC隕石のコンドルール形成領域から移動してきた？

他のNC隕石、CC隕石のコンドルールについても、酸素同位体比のサイズ依存性の有無を検証する必要がある。

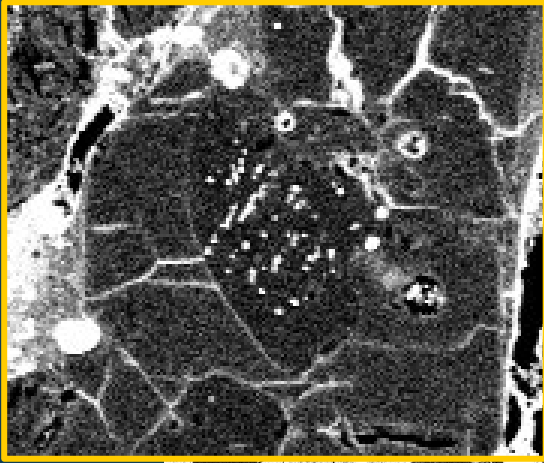


コンドルール酸素同位体比の特徴

4. 熔け残り結晶の存在率が高い

熔け残り結晶 (Relict Grains)

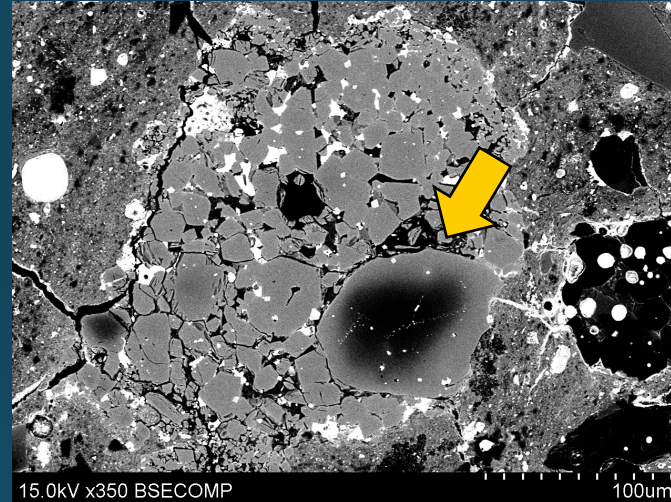
Dusty olivine



FeO-richなオリビンが
還元されて出来た

(Nagahara 1981 *Nature*)

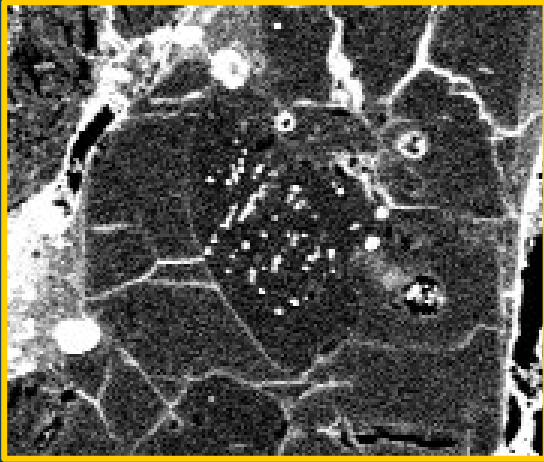
MgO-rich olivine
in FeO-rich overgrowth



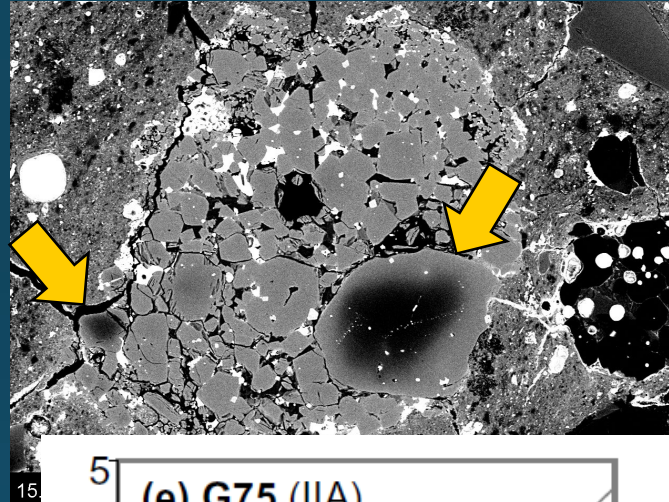
MgO-richなオリビンに
FeO-richなオリビンが
付加成長して出来た

熔け残り結晶 (Relict Grains)

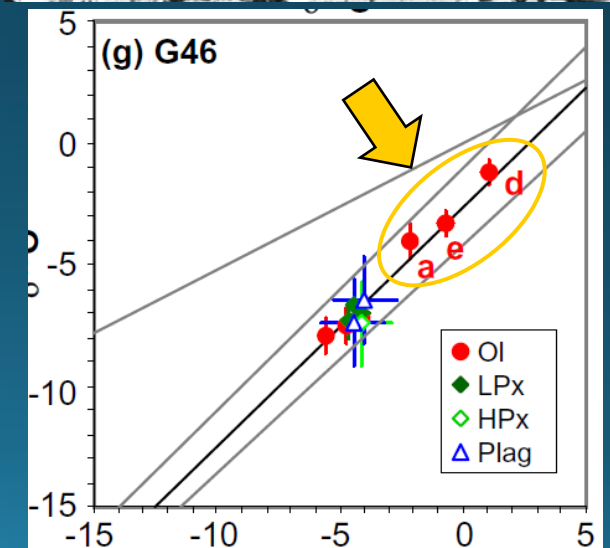
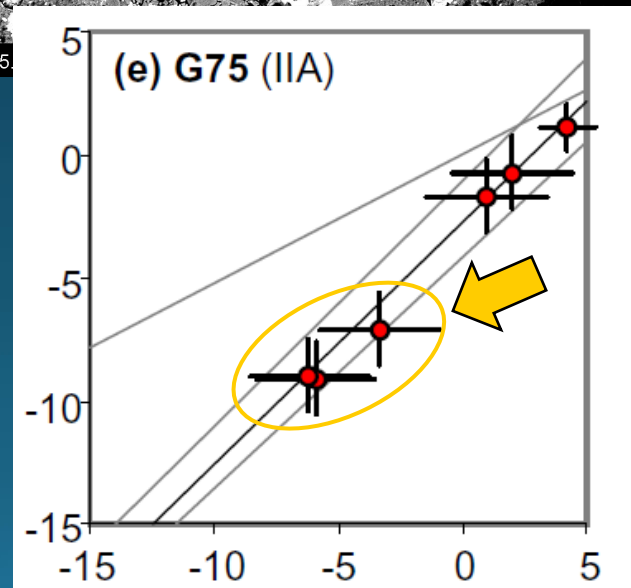
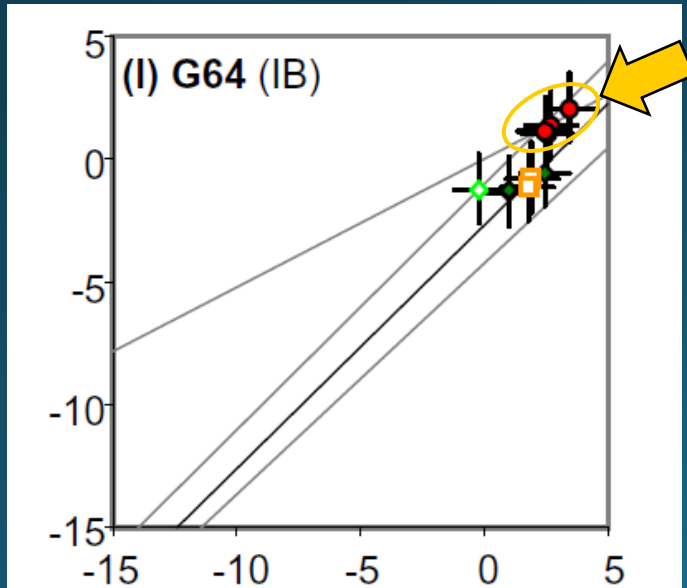
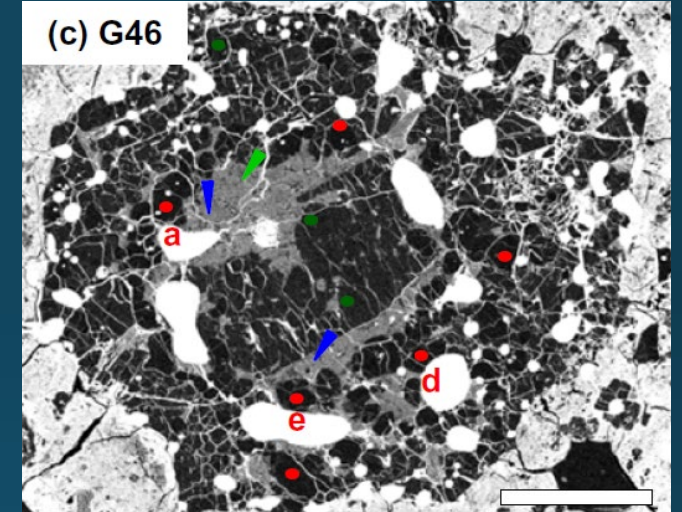
Dusty olivine



MgO-rich olivine
in FeO-rich overgrowth

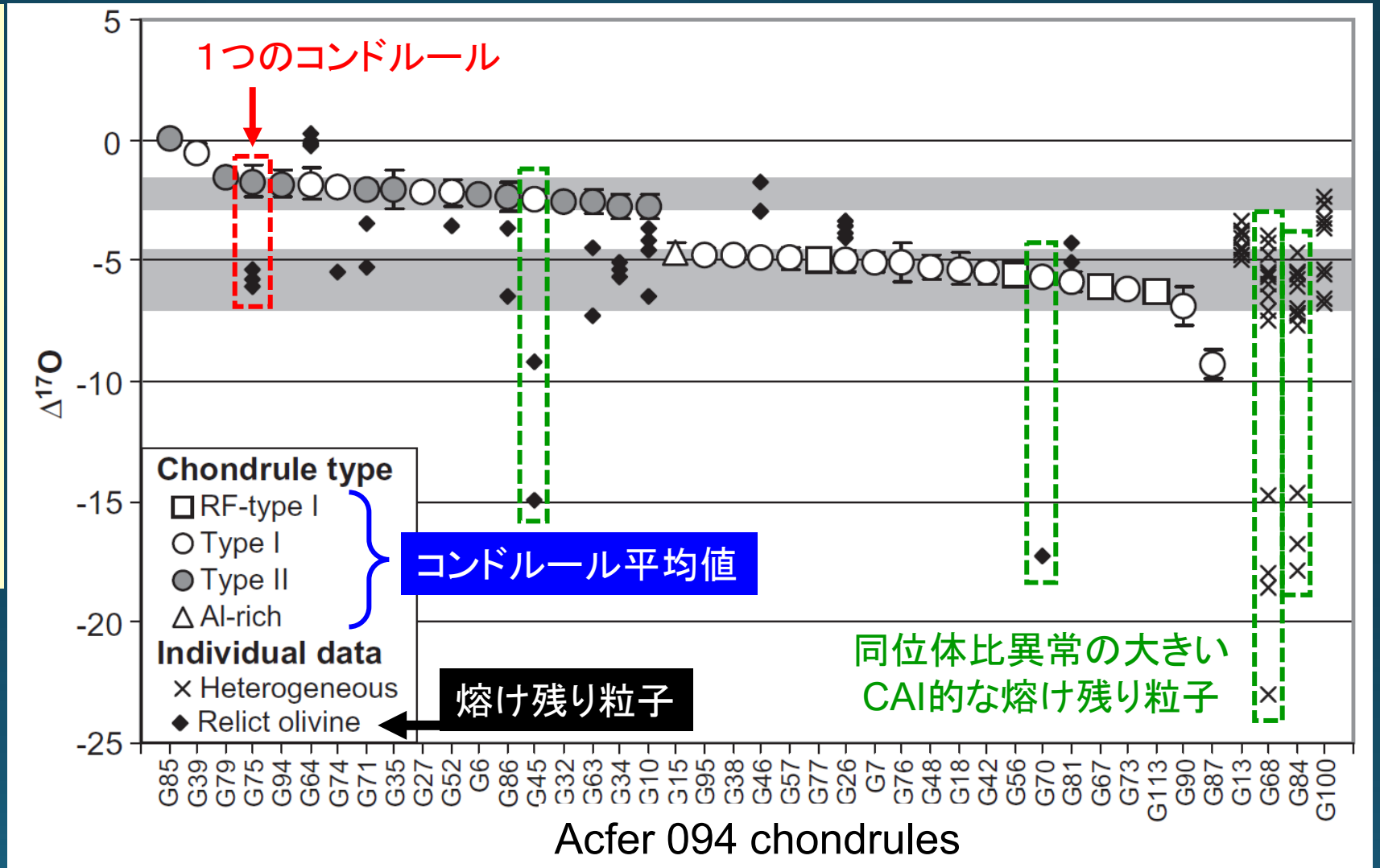
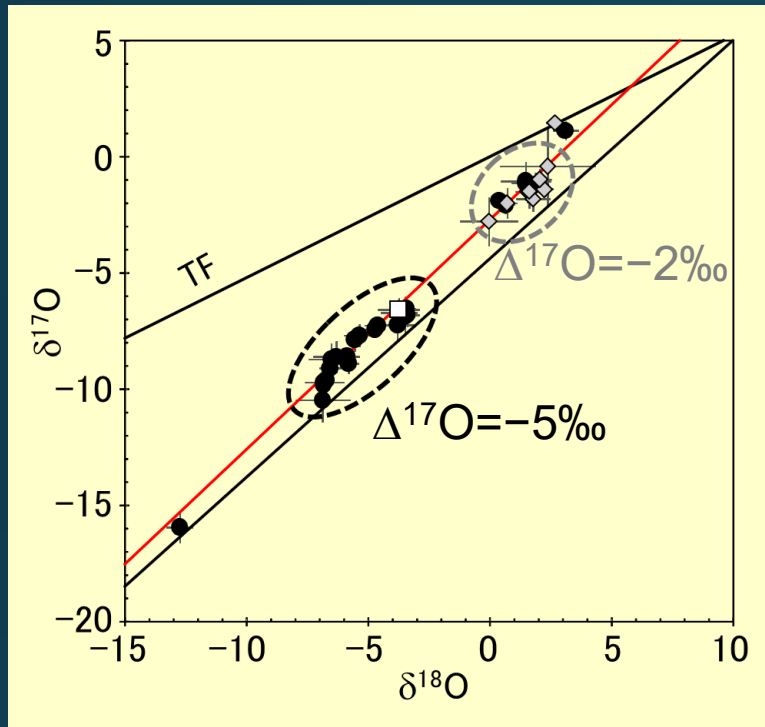


Olivine with
anomalous $\Delta^{17}\text{O}$ value



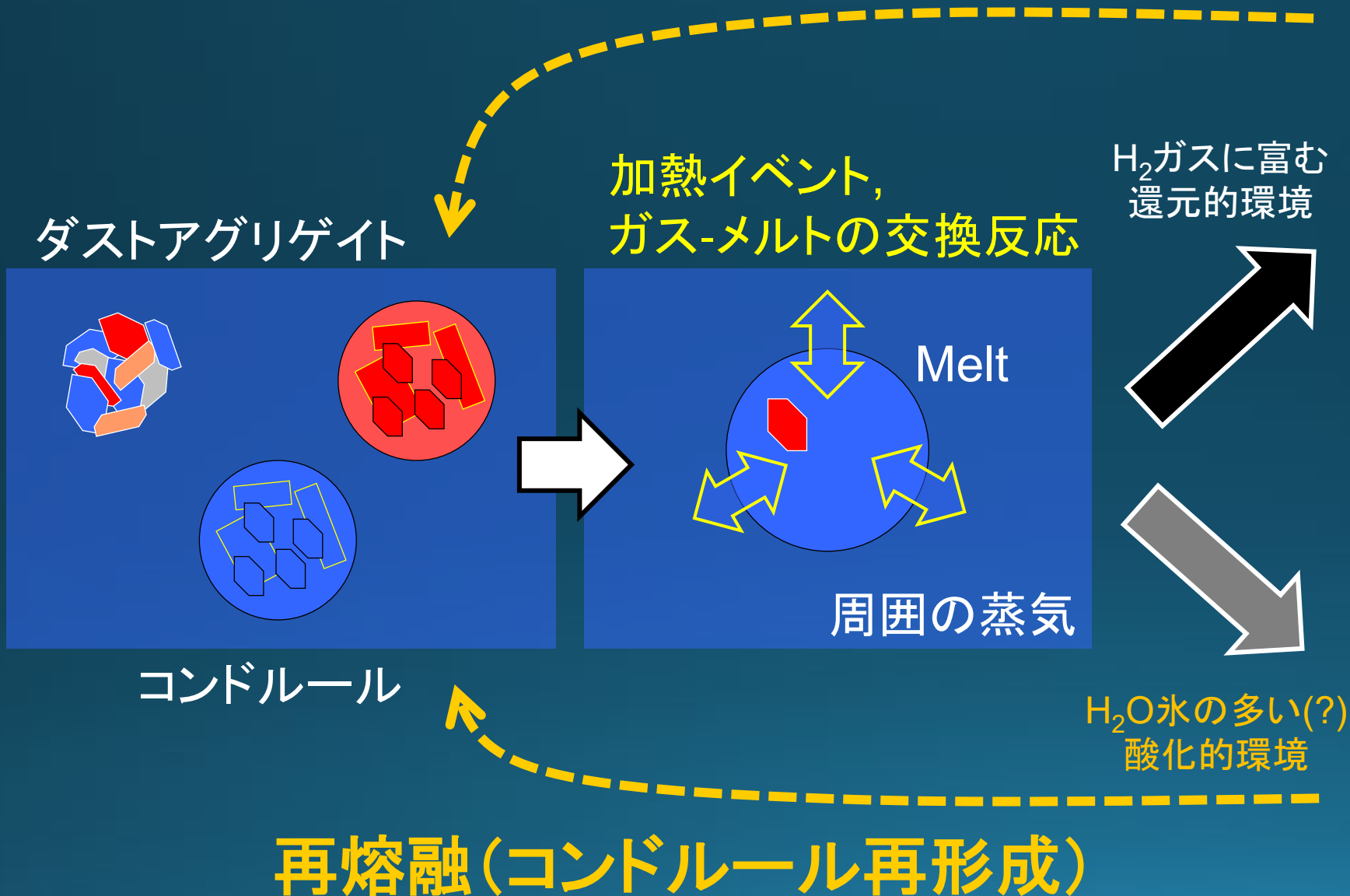
42個のCC隕石のコンドルール

Ushikubo+ 2012 GCA

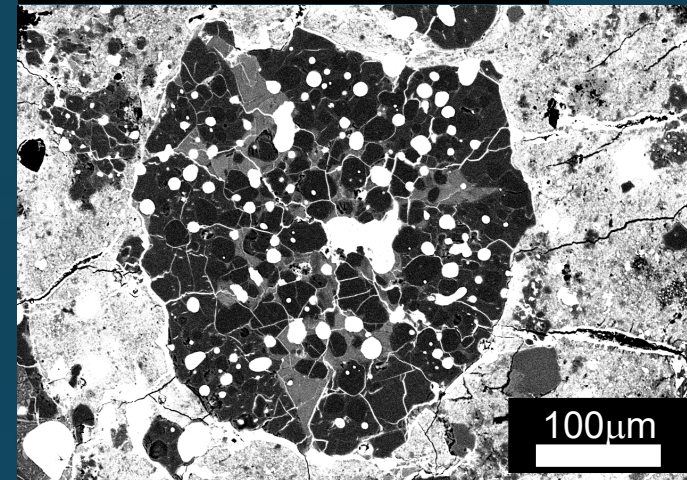


- Relict grainの多くはコンドルール平均値の範囲内
- Relict grainの出現に排他性がある (High- $\Delta^{17}\text{O}$ vs. Low- $\Delta^{17}\text{O}$)

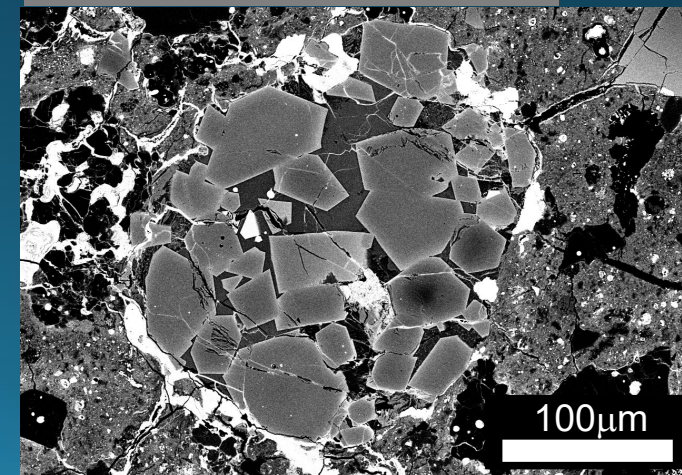
コンドルールと熔け残り粒子の形成



Type I: MgO-rich
($\Delta^{17}O = -5\text{‰}$)



Type II: FeO-rich
($\Delta^{17}O = -2\text{‰}$)



熔け残り粒子を持つコンドロールの割合は思いの外に高い

Table 2. Compilation of host and relict chondrule olivine SIMS O-isotope data from recent studies. Excludes heterogeneous chondrules reported in studies.

chondrite type source	CV3 [1] ^(c)	CO3 [2]	CR2 [3-7]	CB _b , CH/CB _b [8] ^(d)	ungrouped C [9] ^(e,f) [10]		LL3 [11] ^(g)	Enstatite (E) [12]	Kakangari (K) [13]	Rumuruti (R) [14] ^(h)	GRO 95551- NWA 5492 (G) [15]
total chondrules with olivine data ^{(a)(b)}	24	26	77	11	34	30	31	12	7	6	17
total relict olivine-bearing chondrules ^{(a)(b)}	1	13	11	1	15	16	3	4	1	2	0
% relict olivine-bearing chondrules	4	50	14	9	44	53	10	33	14	33	0
total host olivine spot data	65	68	278	23	111	99	92	20	33	18	39
total relict olivine spot data	1	32	14	1	35	43	6	12	1	5	0
% host olivine spot data	98.5	68.0	95.2	95.8	76.0	69.7	93.9	62.5	97.1	78.3	100

(a) host olivine-bearing chondrules; (b) relict olivine-bearing chondrules; (c) CV3 chondrites; (d) CB_b, CH/CB_b chondrites; (e) ungrouped C chondrites; (f) LL3 chondrites; (g) Enstatite (E) chondrites; (h) Kakangari (K) chondrites.

Tenner+ 2018 *In Chondrules*

Δ¹⁷O値で見た熔け残り粒子を持つコンドロールの割合

CV chondrite: ~4% (平均直径: 1.0mm)

CR chondrite: 14% (平均直径: 0.7mm)

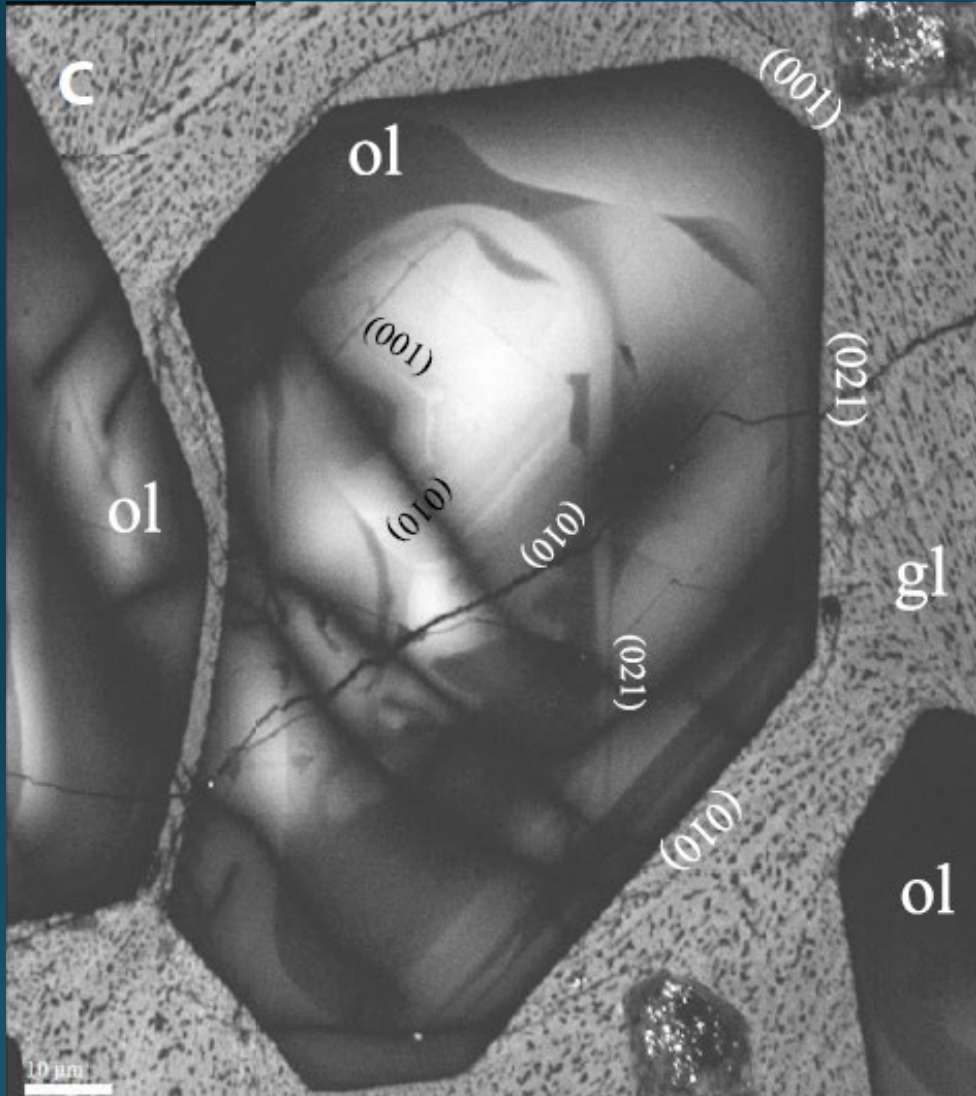
O (LL) chondrite: 10% (平均直径: 0.9mm)

CO chondrite: 50% (平均直径: 0.15mm)

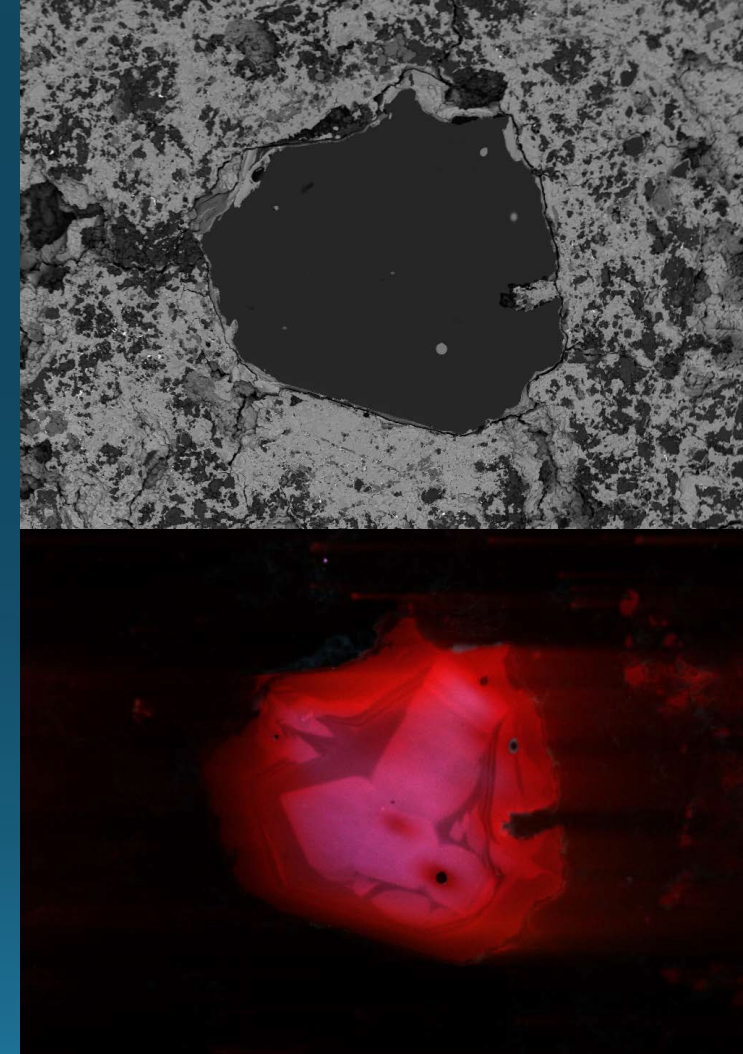
Acfer 094: 50% (平均直径: 不明, CO chondriteに近い)

(Δ¹⁷O値の変化しない再熔融を含めると)コンドロールの再熔融率は上記数値よりも高い

CL画像等で見えるオリビン結晶の内部構造 結晶成長過程 or 再熔融の検証が課題



Libourel & Portail 2018 *Science Adv.*



Ushikubo & Kimura 2021 *GCA*

まとめ

- コンドルールの酸素同位体比 ($\Delta^{17}\text{O}$ 値) と酸化還元状態 (Mg#):
初生ダストの情報ではなく、形成環境の情報を保存している
- CC隕石のコンドルール:
Mg# と $\Delta^{17}\text{O}$ 値の相関は H_2O 氷成分の濃集の影響
 H_2O 氷の酸素同位体比は彗星に見られる始原 H_2O 氷とは違う
- NC隕石のコンドルール:
Mg# に関わらず $\Delta^{17}\text{O}$ 値はほぼ一定
珪酸塩ダストの濃集によって生じた (H_2O 氷の影響は小さい)
- ※ NC隕石コンドルールとCC隕石コンドルールの相互の移動の証拠
- 熔け残り粒子の存在:
酸素同位体比で見ると数十%のコンドルールで見つかる
コンドルールのほとんどが再熔融を経験している可能性がある