

# コンドルールは飛んで行かない

～珪酸塩球粒の酸素同位体比から  
原始太陽系星雲での固体粒子の移動を探る～

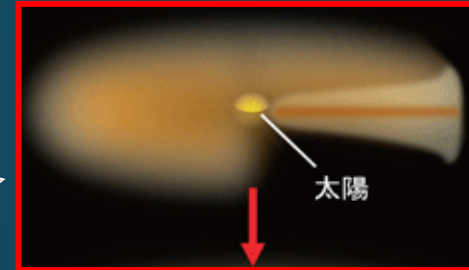
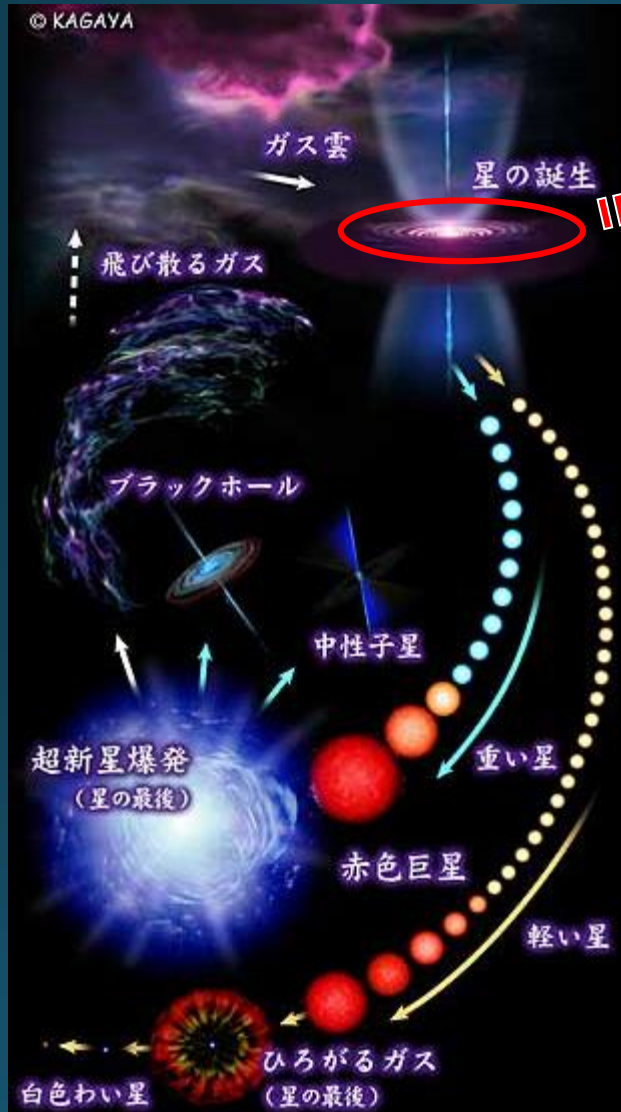
牛久保 孝行

(海洋研究開発機構 高知コア研究所)

と、ウィスコンシン大学WiscSIMS Lab.での共同研究者諸氏。特に

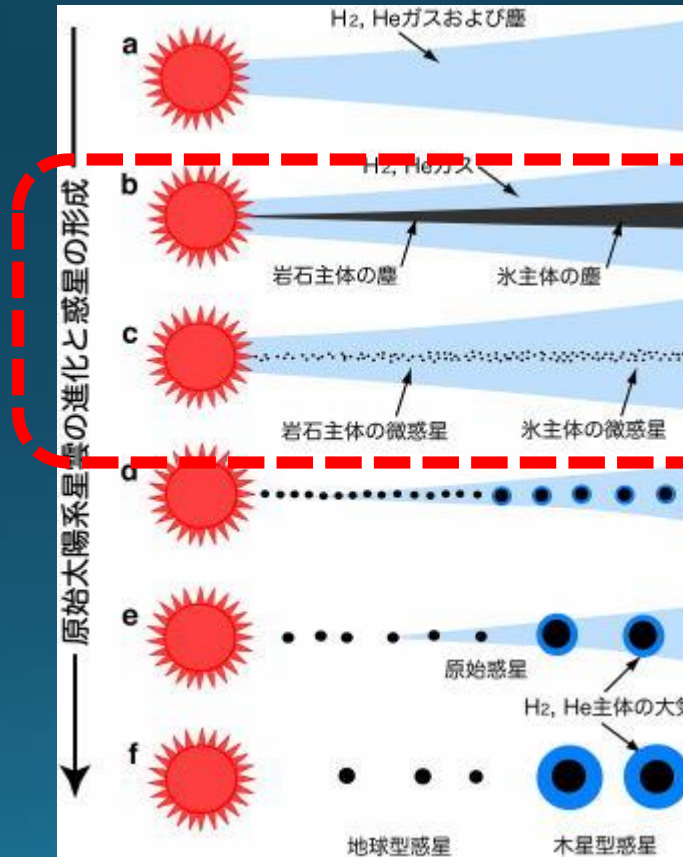
木多 紀子, John W. Valley (UW-Madison), 中嶋 大輔 (東北大学),  
木村 眞 (国立極地研究所), Travis J. Tenner (Los Alamos NL)

# 星の誕生と生涯のサイクル



星が形成する際には星周円盤が出来る

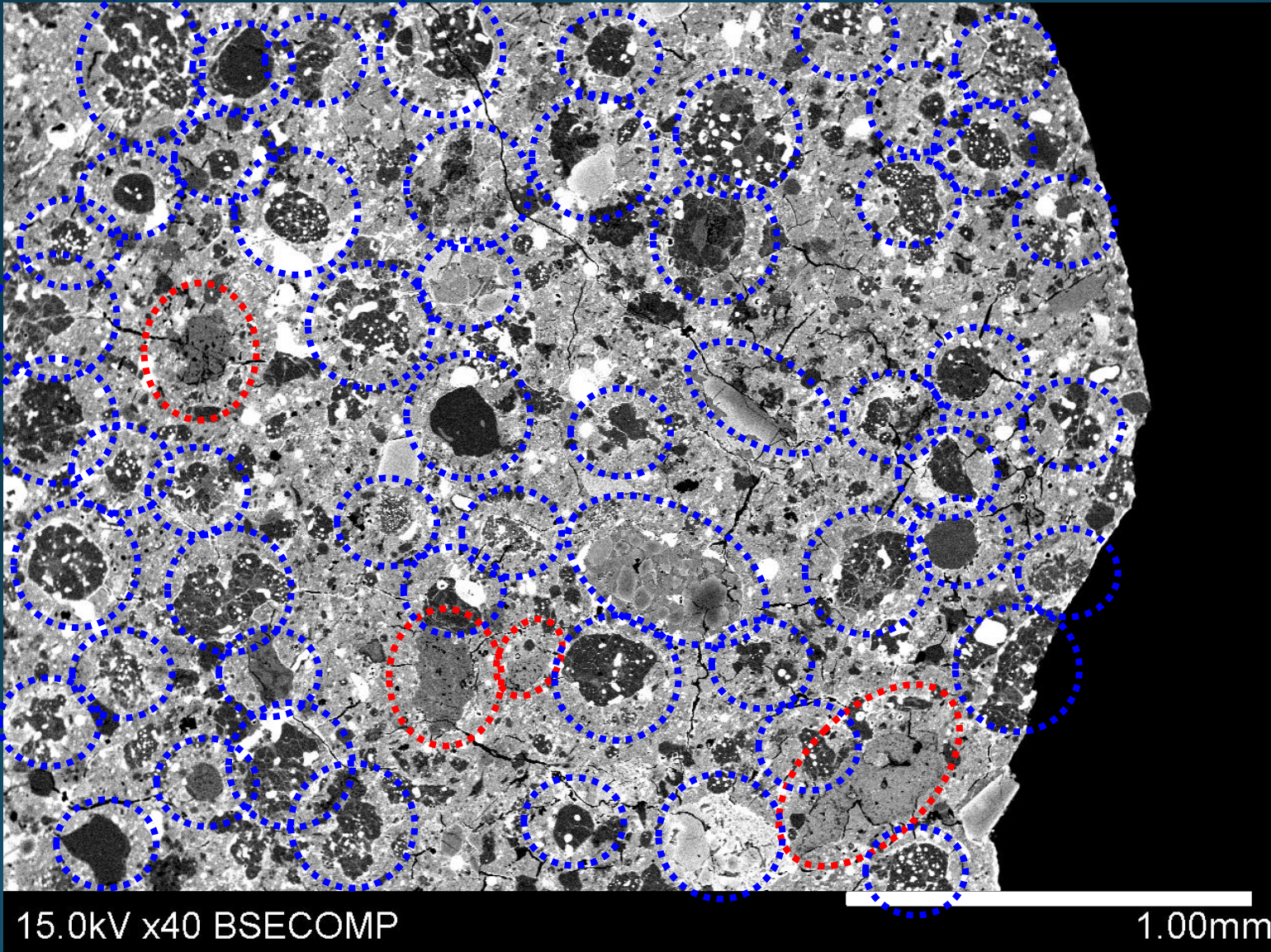
Protoplanetary Disk  
“惑星系の母体”





# コンドライト と コンドルール と CAI

(炭素質コンドライト: Acfer 094隕石の電子顕微鏡BSE像)



Ca, Al-rich  
Inclusion  
(CAI)

コンドルール

細粒の  
マトリックス

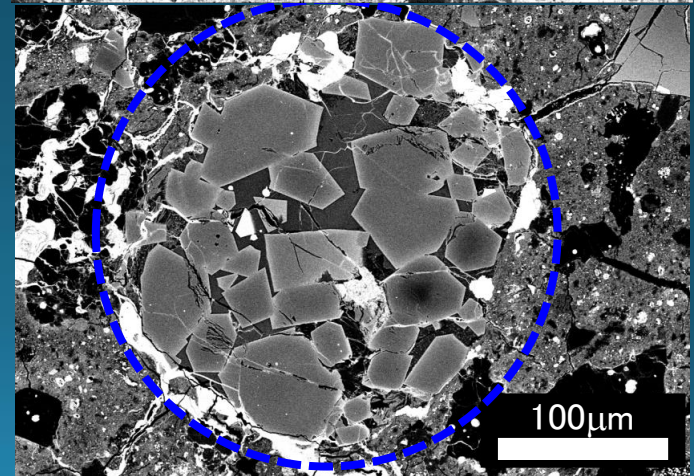
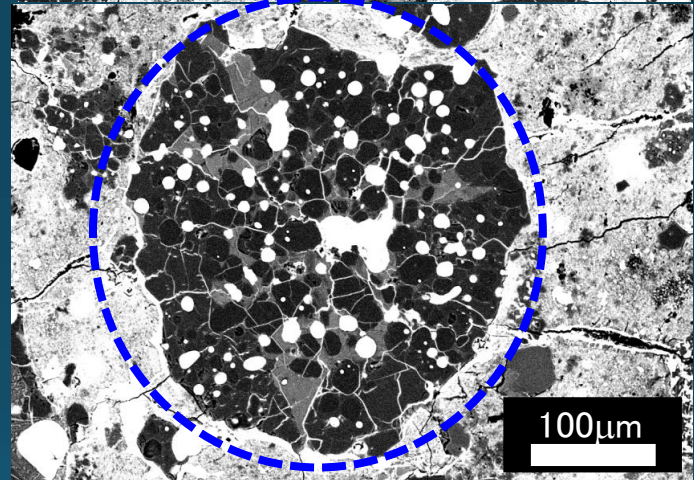
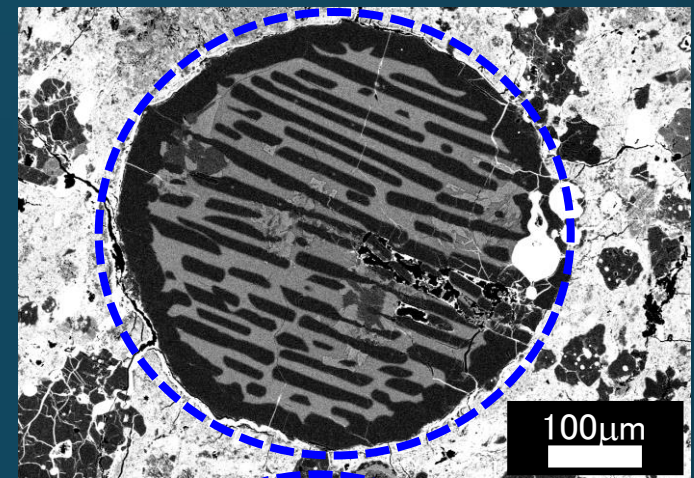
15.0kV x40 BSECOMP

1.00mm



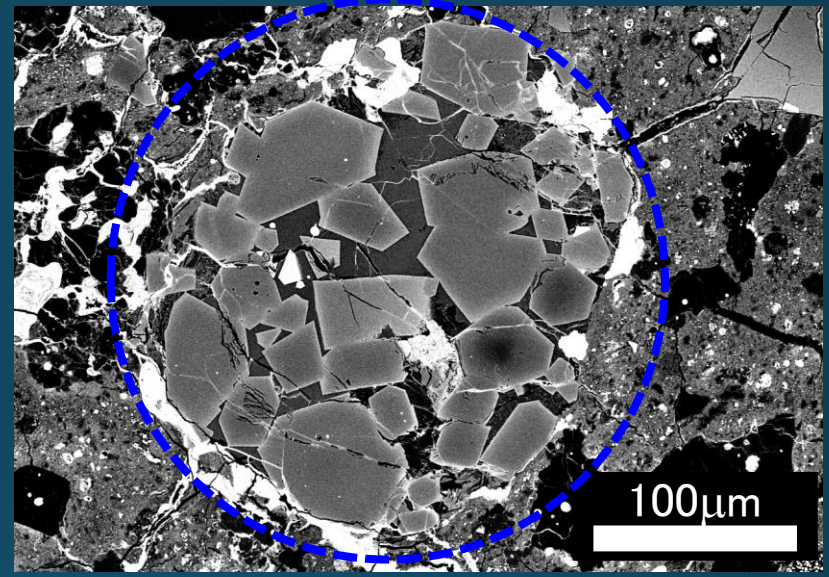
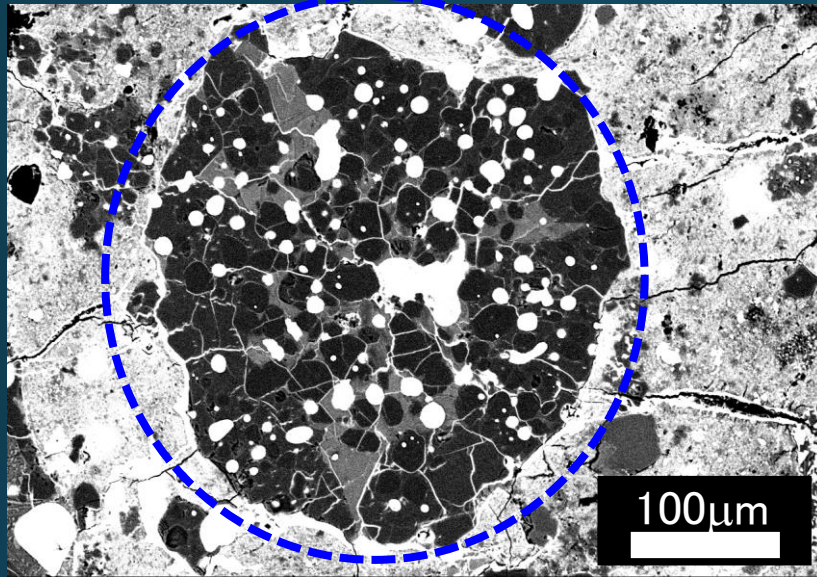
# コンドルール(Chondrule)

- 始原的隕石(コンドライト)に含まれるSub-mm程度の大きさの珪酸塩鉱物を主体とする球粒
- 原始惑星系円盤で融解・急冷却を経て形成している(10~3000°C/h?)
- 主な構成鉱物は  
橄欖石(Olivine):  $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$   
輝石(Pyroxene):  $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$
- コンドライト母天体の微惑星が集積する少し前に形成した(~4565Ma)?  
cf. CAIの形成: ~4567Ma



# コンドルール形成時の酸化還元状態

電子顕微鏡のBSE像(組成像)



黒っぽいコンドルール

と

白っぽいコンドルール

“FeOが少ない” Type I

“FeOが多い” Type II

$\text{MgO} + \text{Fe} + \text{O}$   
(還元的)



$\text{MgO} + \text{FeO}$   
(酸化的)

コンドールの形成環境には大きな変動幅がある  
(酸素分圧: IW-4 ~ IW-1)



# 酸素同位体比のδ表記

酸素同位体の存在量  $^{16}\text{O}$  (99.76%)  $^{17}\text{O}$  (0.04%)  $^{18}\text{O}$  (0.20%)

$$\delta^i\text{O} = \left\{ \frac{(\text{試料の}^i\text{O}/^{16}\text{O}\text{比})}{(\text{標準海水の}^i\text{O}/^{16}\text{O}\text{比})} - 1 \right\} \times 1000$$

(i=17, 18)

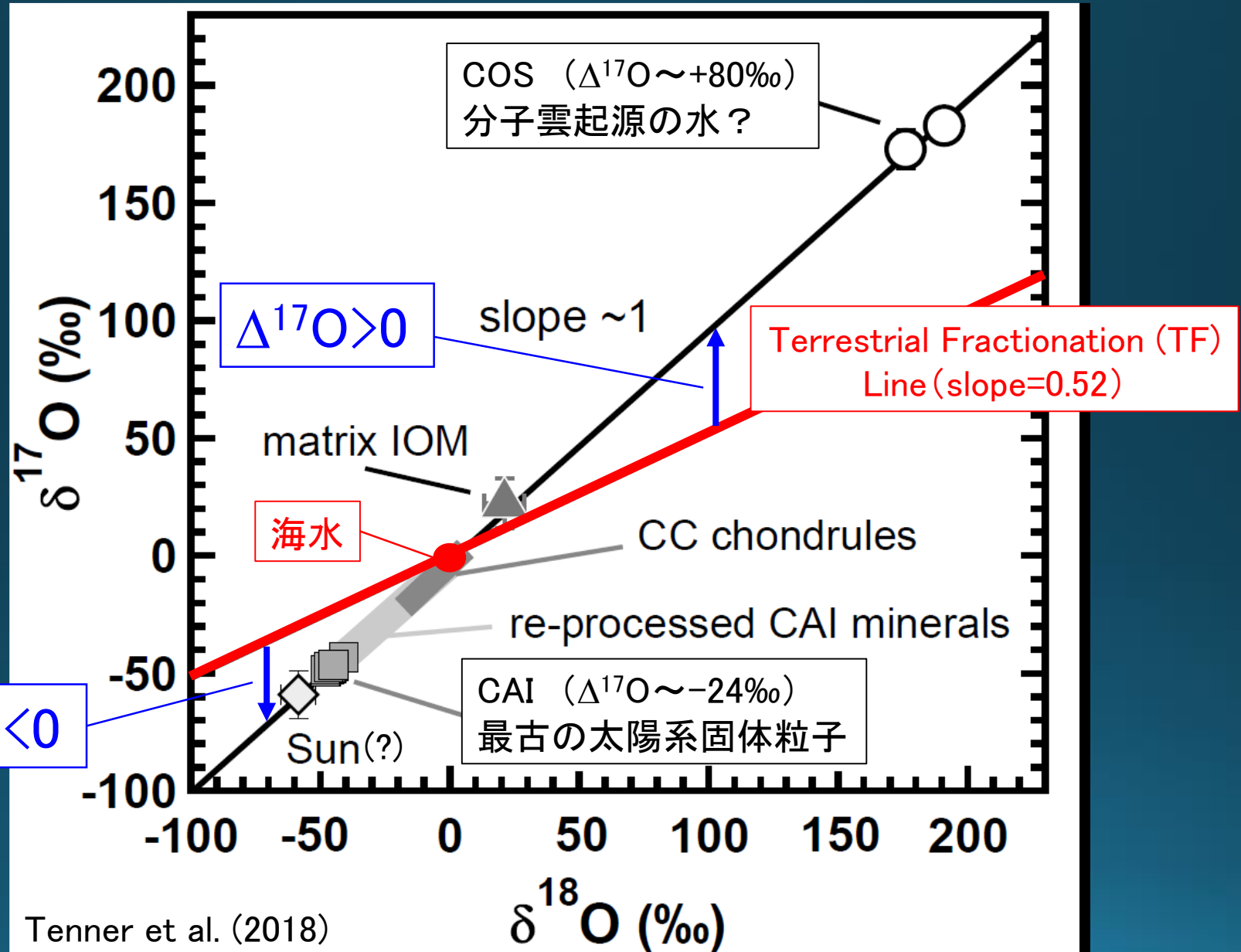
(単位: ‰ [0.1%])

$$\frac{\delta^{18}\text{O}}{^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 0.0020052} \Rightarrow \frac{\delta^{18}\text{O}}{0.0020072} = 1$$

$$\Delta^{17}\text{O} = \delta^{17}\text{O} - 0.52 \times \delta^{18}\text{O}$$

地球物質の同位体比分別線 (TF line:  $\delta^{17}\text{O} = 0.52 \times \delta^{18}\text{O}$ )  
からのずれの大きさ

# 地球外物質の酸素同位体比分布



# 地球外物質の酸素同位体比 (コンドライトの全岩組成分布)

非炭素質コンドライト

Rコンドライト: R

普通コンドライト: O

(細区分: H, L, LL)

エンスタタイト // : E

炭素質コンドライト

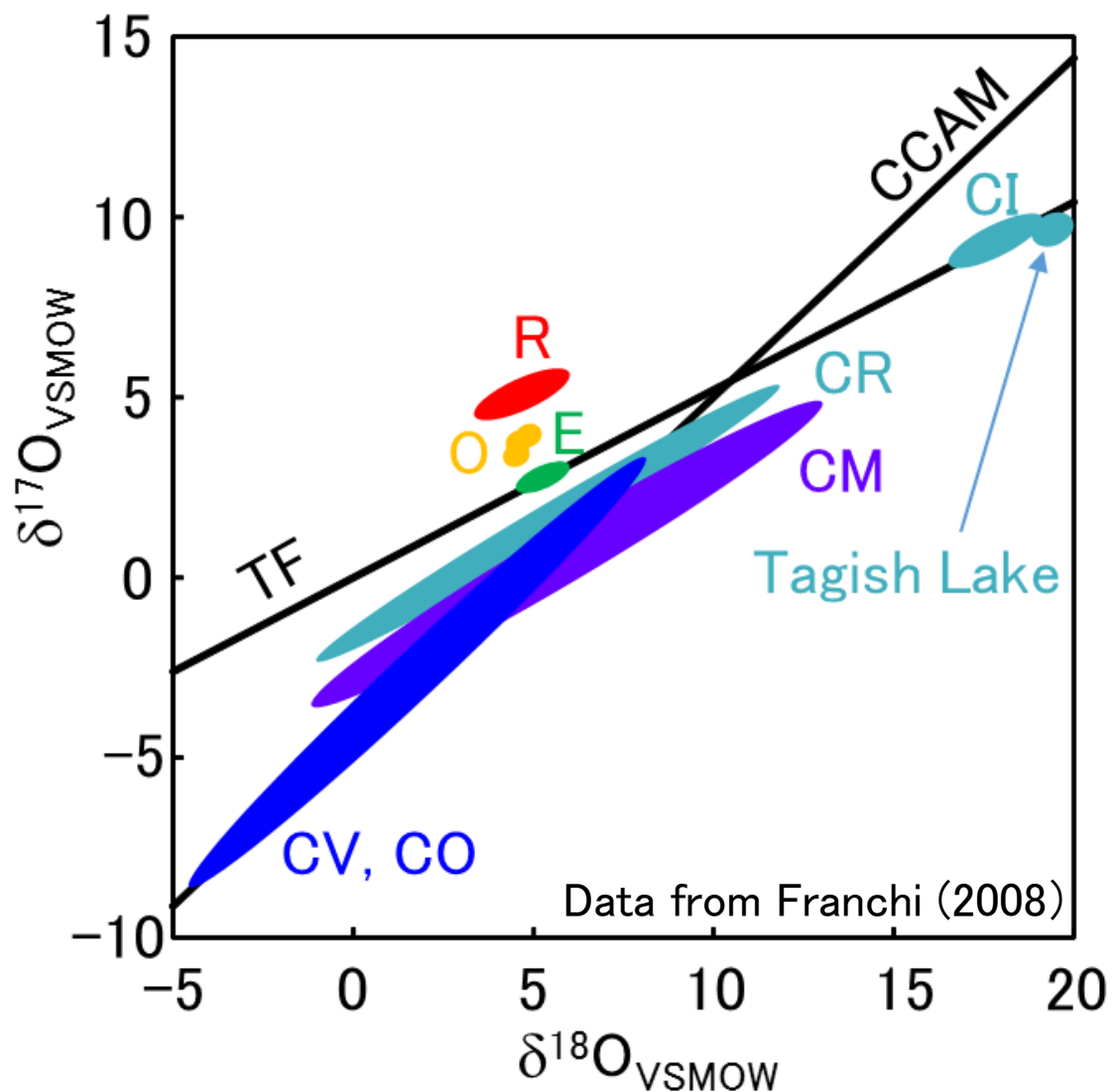
CI, CR, Tagish Lake,

CM, CO, CV

普通コンドライト:  
S型小惑星と関連

炭素質コンドライト:  
C型小惑星と関連

Tagish Lake隕石:  
D型小惑星と関連

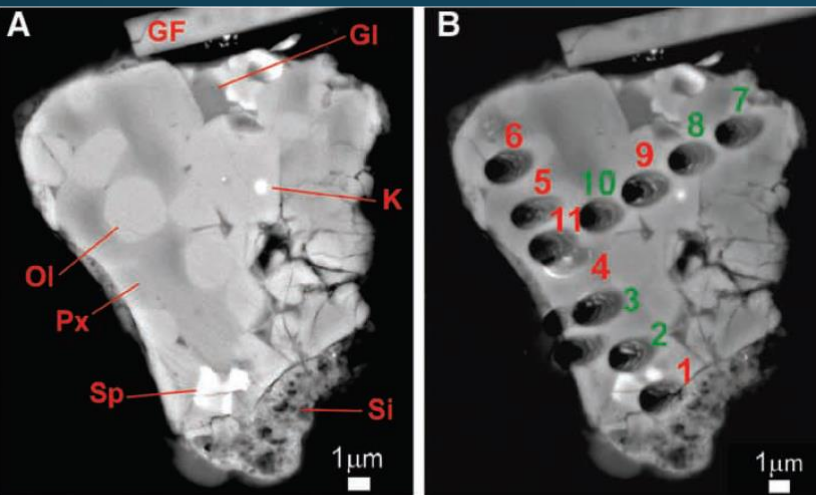




# 彗星コンドロールの発見

Nakamura et al. (2008) Science

NASA・Stardust探査機による木星族 81P/Wild 2彗星 回収試料

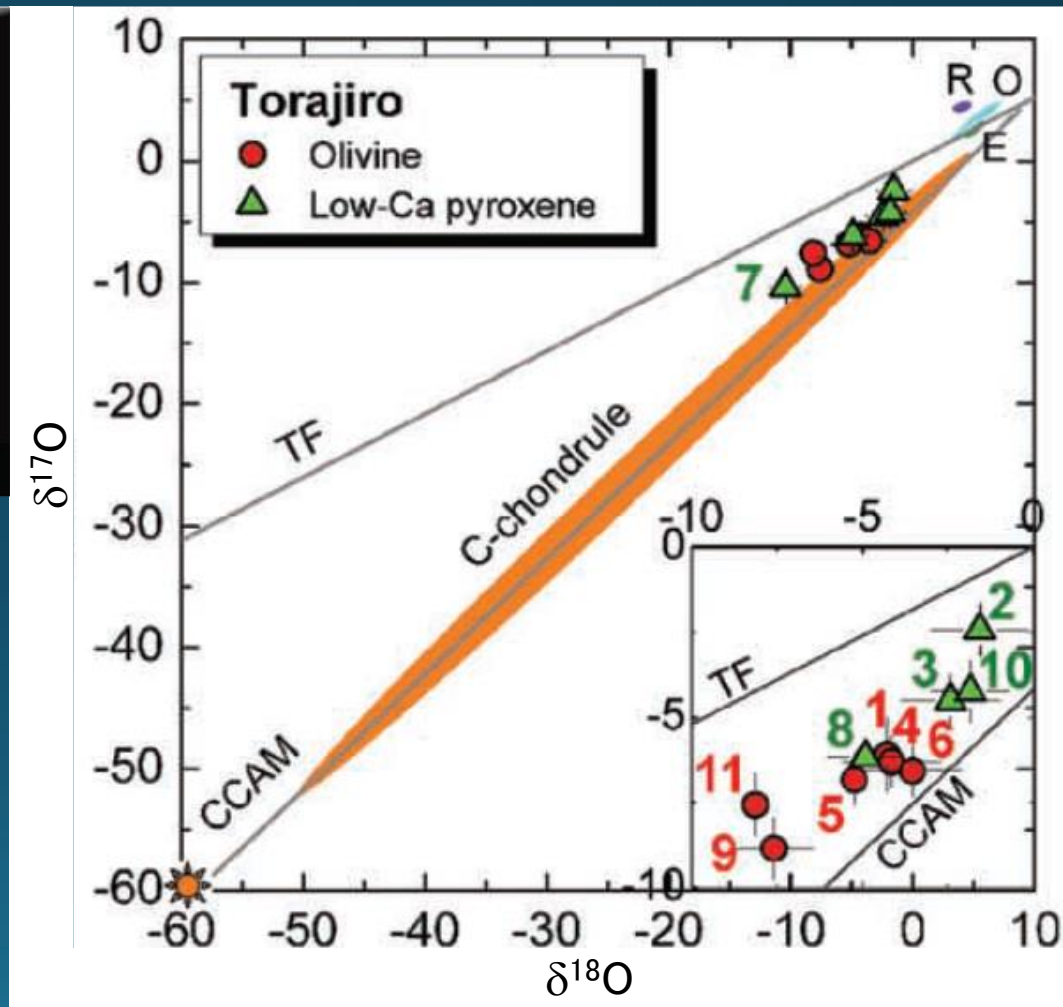


➤ 熔融・固化した組織

内惑星領域からカイパーベルトへ  
運ばれた

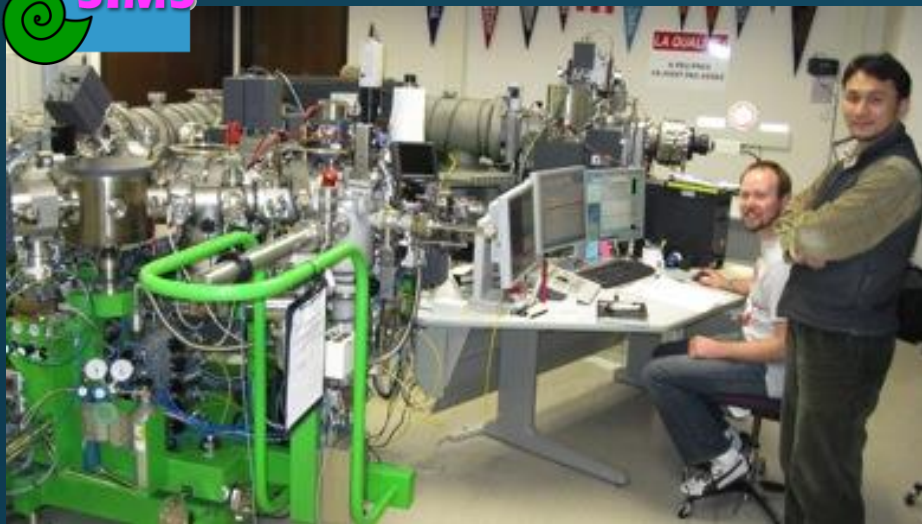
➤ 酸素同位体は炭素質コンドライト  
のコンドールの分布域に一致  
( $\Delta^{17}\text{O} < 0$ )

より詳細な比較検討を行いたい！



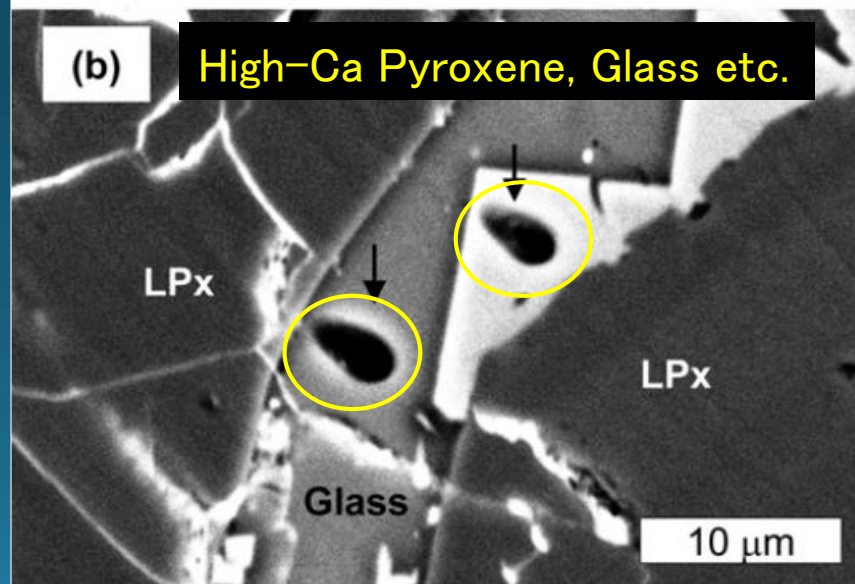
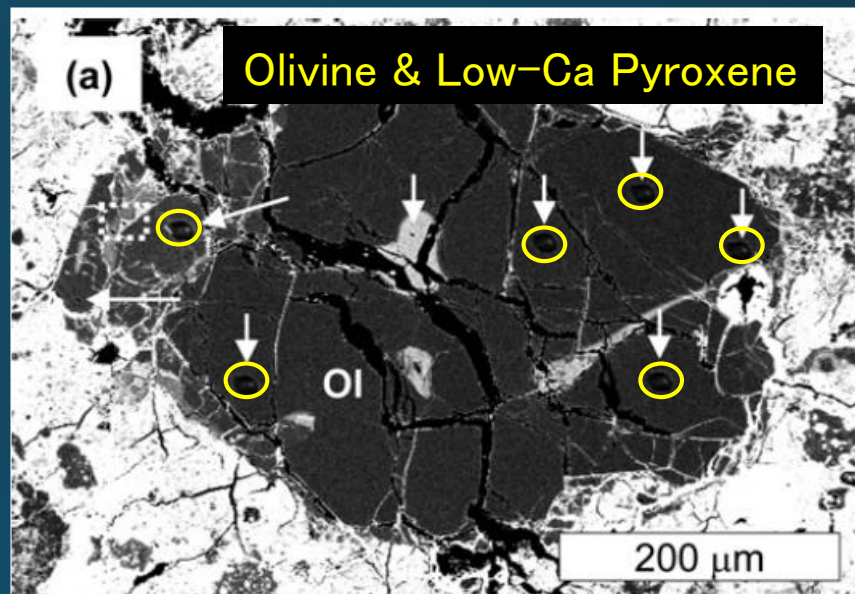


# SIMSを用いた局所同位体比分析



T. J. Tenner & T. Ushikubo @WiscSIMS Lab.

- 晶出温度の異なる鉱物が同じ同位体情報を持つか
- 隕石母天体での変成作用の影響を除く



# 個々のコンドルールが持つ 酸素同位体比の特徴

Ushikubo et al. (2012) GCA

母天体での変成作用の影響が最も少ない炭素質コンドライト：  
Acfer 094隕石のコンドルール42個を解析

(牛久保, 2016, 遊星人 25, 8-12 もついでにご覧ください)



# 不均質な酸素同位体比を持つコンドルール

結晶の晶出順序:

- ① Olivine (Ol)
- ② Low-Ca Pyroxene (LPx)
- ③ High-Ca Pyroxene (HPx),  
Plagioclase (Plag)

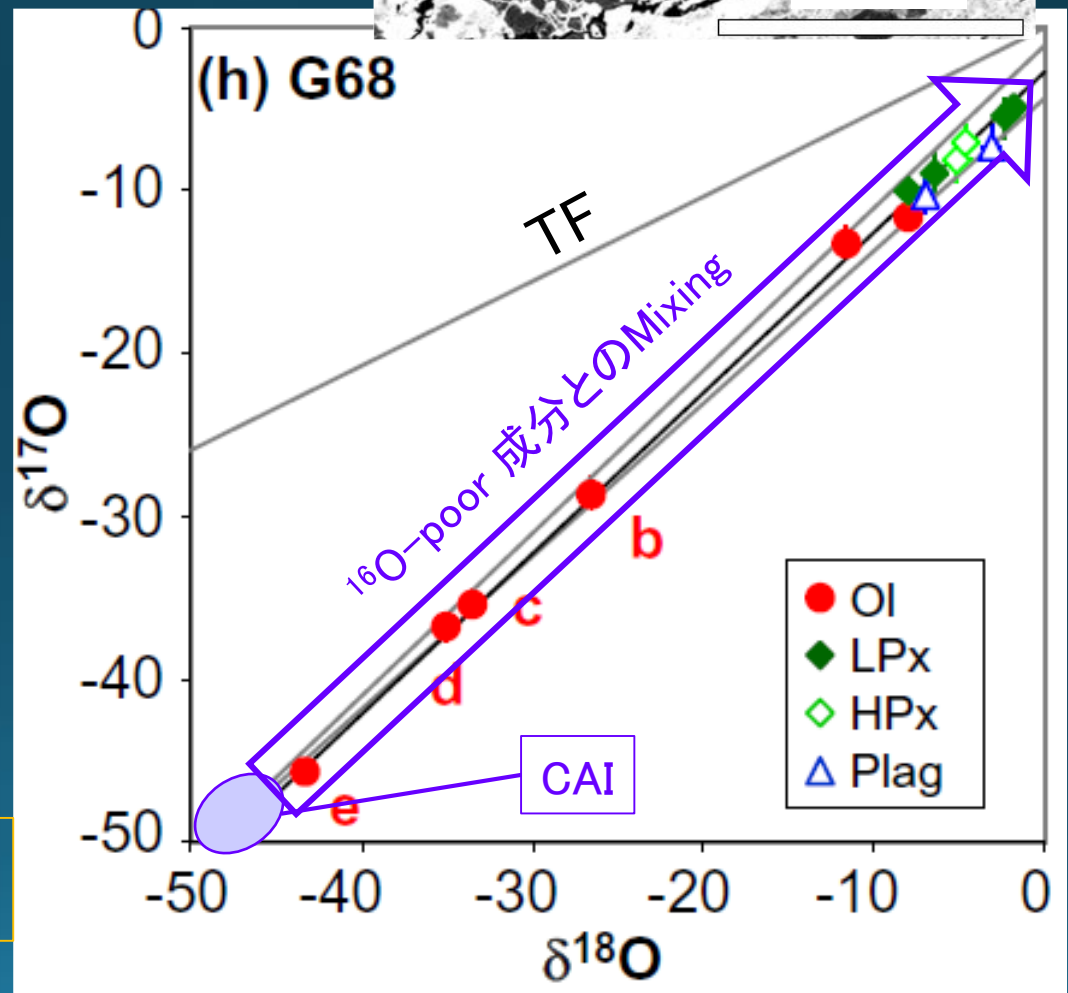
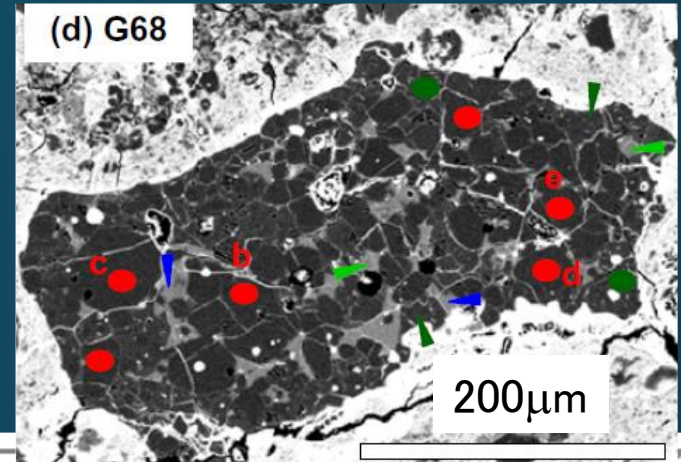
コンドルール形成  
(熔融・固化)に伴うMixing

$^{16}\text{O}$ -richなCAI的成分

+

$^{16}\text{O}$ -poorな成分 (Nebular gas?)

稀な存在 (4/42個)

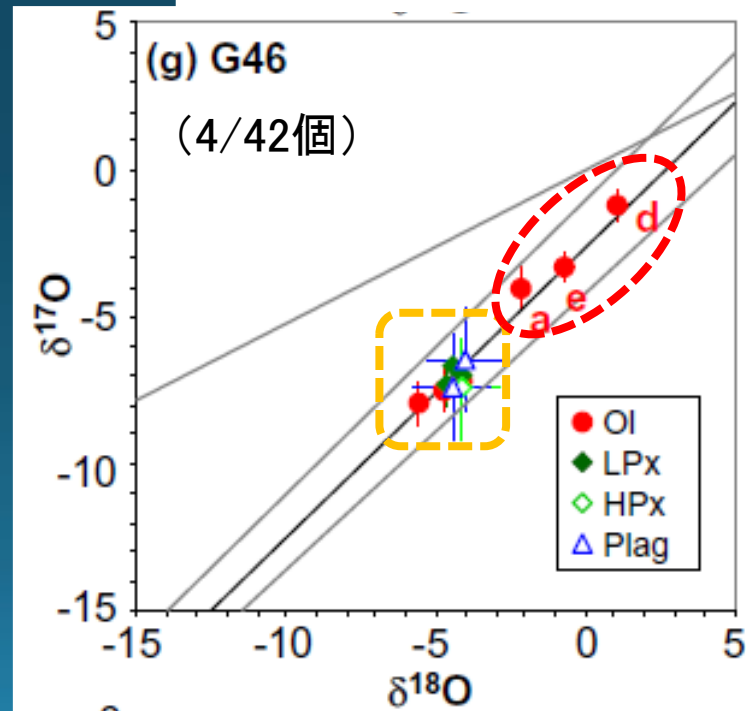
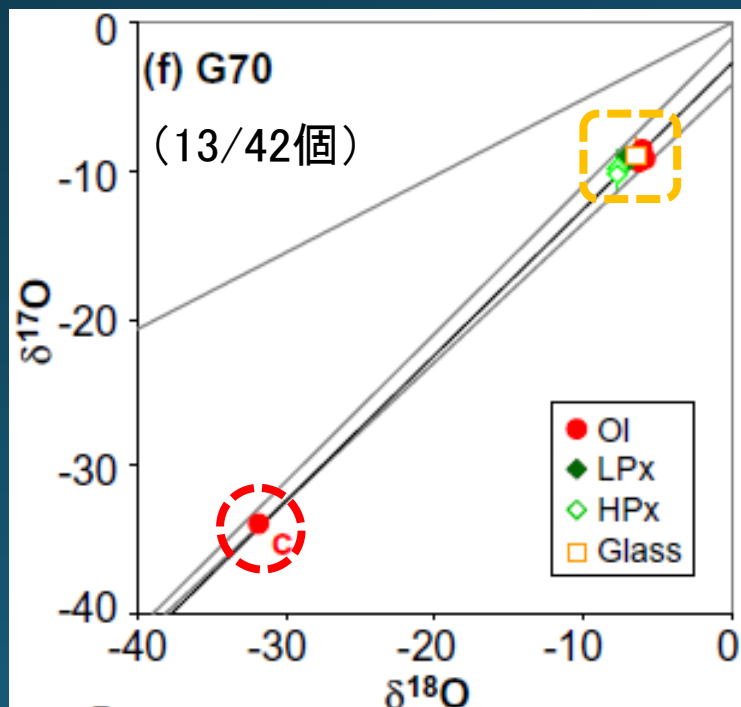
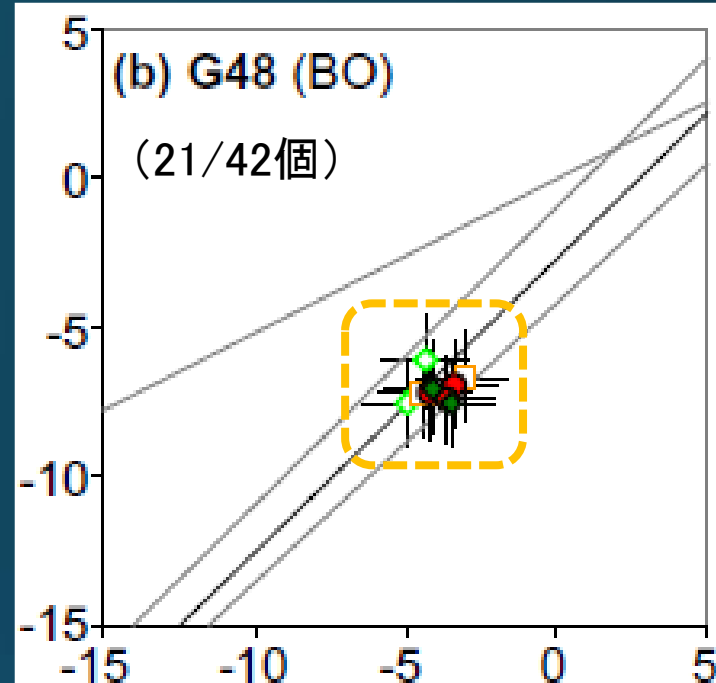


# 典型的な酸素同位体の特徴

- 個々のコンドルールでは構成する鉱物 (Olivine, Pyroxene, Plagioclase etc.) はよく似た同位体比 ( $\Delta^{17}\text{O}$ ) を持つ

“Host Part of Chondrule”

- 少数の同位体比の異なる熔け残り粒子 (Relict Grain: 主にOlivine) が含まれる事がある



# Relict grainを含むコンドルールが存在割合

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

| chondrite type                                            | CV3                | CO3  | CR2   | CB <sub>6</sub> , CH/CB <sub>6</sub> | ungrouped C          |      | LL3                 | Enstatite (E) | Kakangari (K) | Rumuruti (R)        | GRO 95551-NWA 5492 (G) |
|-----------------------------------------------------------|--------------------|------|-------|--------------------------------------|----------------------|------|---------------------|---------------|---------------|---------------------|------------------------|
| source                                                    | [1] <sup>(c)</sup> | [2]  | [3-7] | [8] <sup>(d)</sup>                   | [9] <sup>(e,f)</sup> | [10] | [11] <sup>(g)</sup> | [12]          | [13]          | [14] <sup>(h)</sup> | [15]                   |
| total chondrules with olivine data <sup>(a)(b)</sup>      | 24                 | 26   | 77    | 11                                   | 34                   | 30   | 31                  | 12            | 7             | 6                   | 17                     |
| total relict olivine-bearing chondrules <sup>(a)(b)</sup> | 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                    |

<sup>(a)</sup> only chondrules with 2 or more spot measurements of olivine and/or pyroxene were considered.

<sup>(b)</sup> designations do not include other phases, such as spinel, plagioclase, or glass that were also measured.

<sup>(c)</sup> two heterogeneous chondrules from this study have four <sup>16</sup>O-rich olivine grains ( $\Delta^{17}\text{O}$ : -11 to -17‰) interpreted as relicts.

<sup>(d)</sup> only porphyritic chondrule data were considered; cryptocrystalline chondrules have only single measurements.

<sup>(e)</sup> only spot data from Electronic Appendices used to determine host and relict O-isotope ratios were considered.

<sup>(f)</sup> two heterogeneous chondrules from this study have seven <sup>16</sup>O-rich olivine grains ( $\Delta^{17}\text{O}$ : -14.5 to -23‰) interpreted as relicts.

<sup>(g)</sup> only spot data from Electronic Appendices used to determine host and relict O-isotope ratios were considered.

<sup>(h)</sup> one heterogeneous chondrule from this study has three olivine grains ( $\Delta^{17}\text{O}$ : -1.5 to -3.6‰) interpreted as relicts.

Sources: [1] Rusaswami et al. (2011); [2] Tenner et al. (2013); [3] Connolly and Huss (2010); [4-6] Schrader et al. (2013; 2014b; 2017); [7] Tenner et al. (2015);

[8] Krot et al. (2010b); [9] Ushikubo et al. (2012); [10] Tenner et al. (2017); [11] Kita et al. (2010); [12] Weisberg et al. (2011); [13] Nagashima et al. (2015);

[14] Miller et al. (2017); [15] Weisberg et al. (2015).

Tenner et al. (2018) in Chondrules

CV chondrite: ~10% (平均直径: 1.0mm, 量: 45vol.%)

CR chondrite: 14% (平均直径: 0.7mm, 量: ~50vol.%)

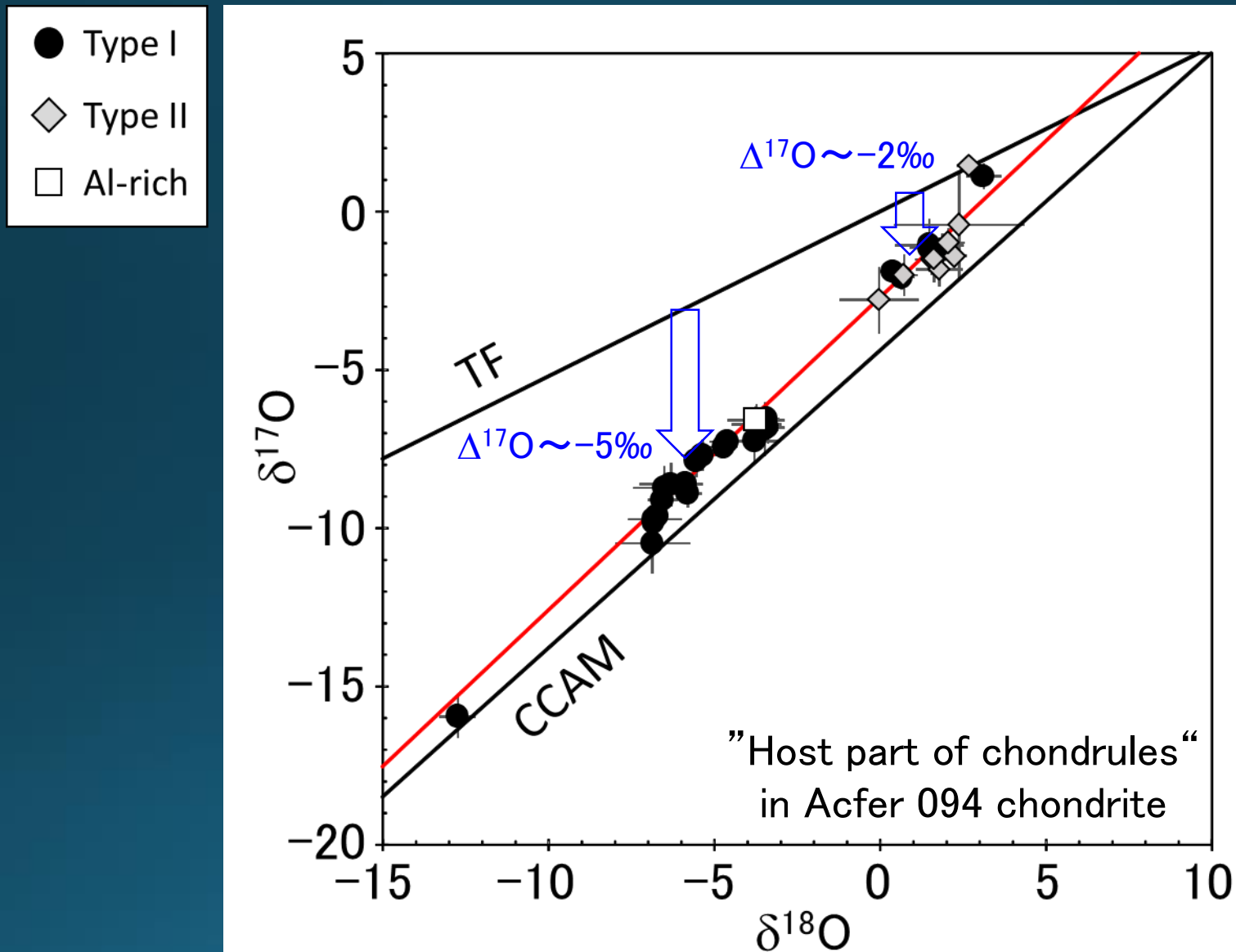
O (LL) chondrite: 10% (平均直径: 0.9mm, 量: ~70vol.%)

CO chondrite: 50% (平均直径: 0.15mm, 量: ~48vol.%)

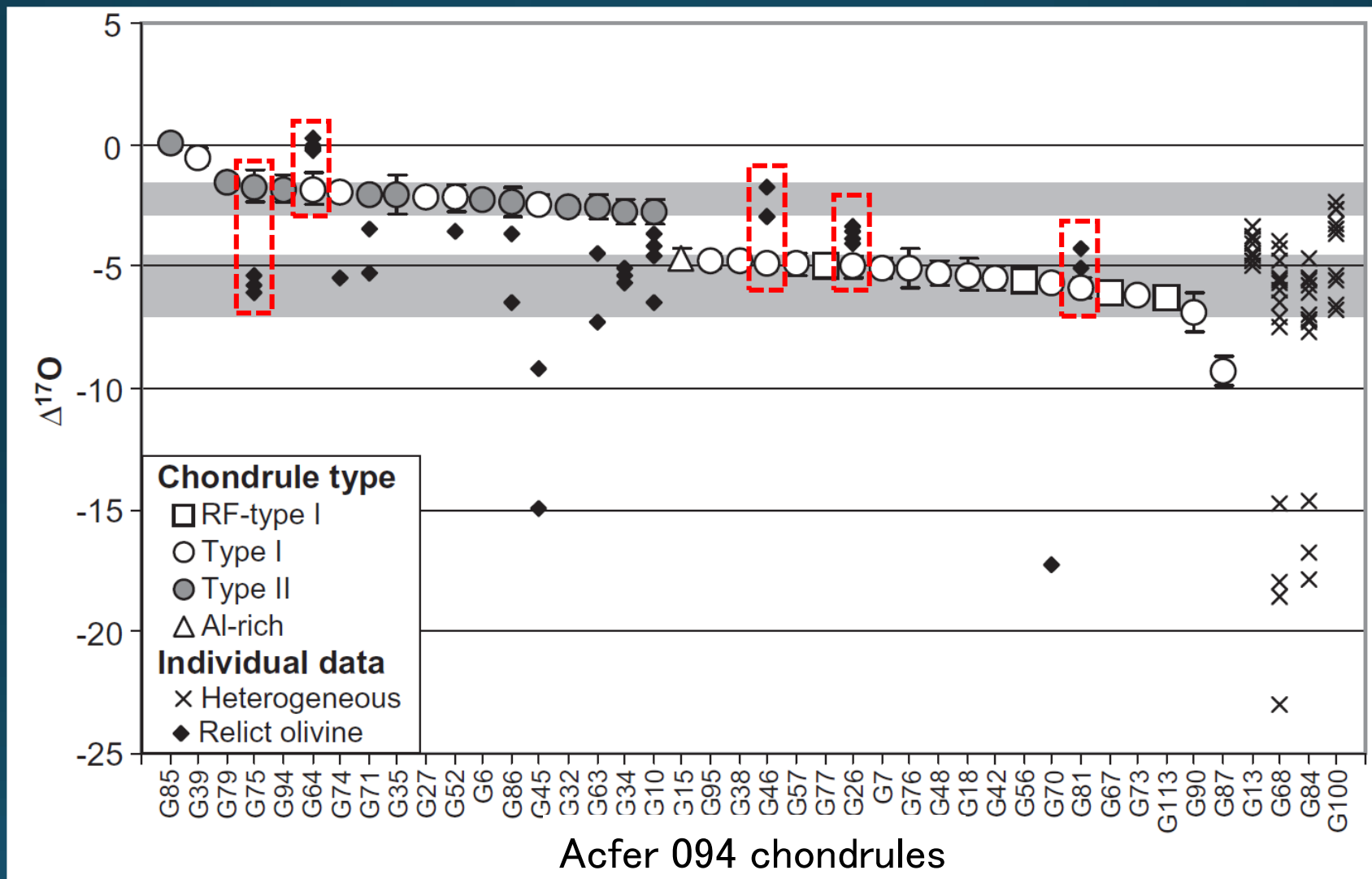
Acfer 094: 50% (不明, CO chondriteに近い)



# Chondruleの酸素3同位体比分布

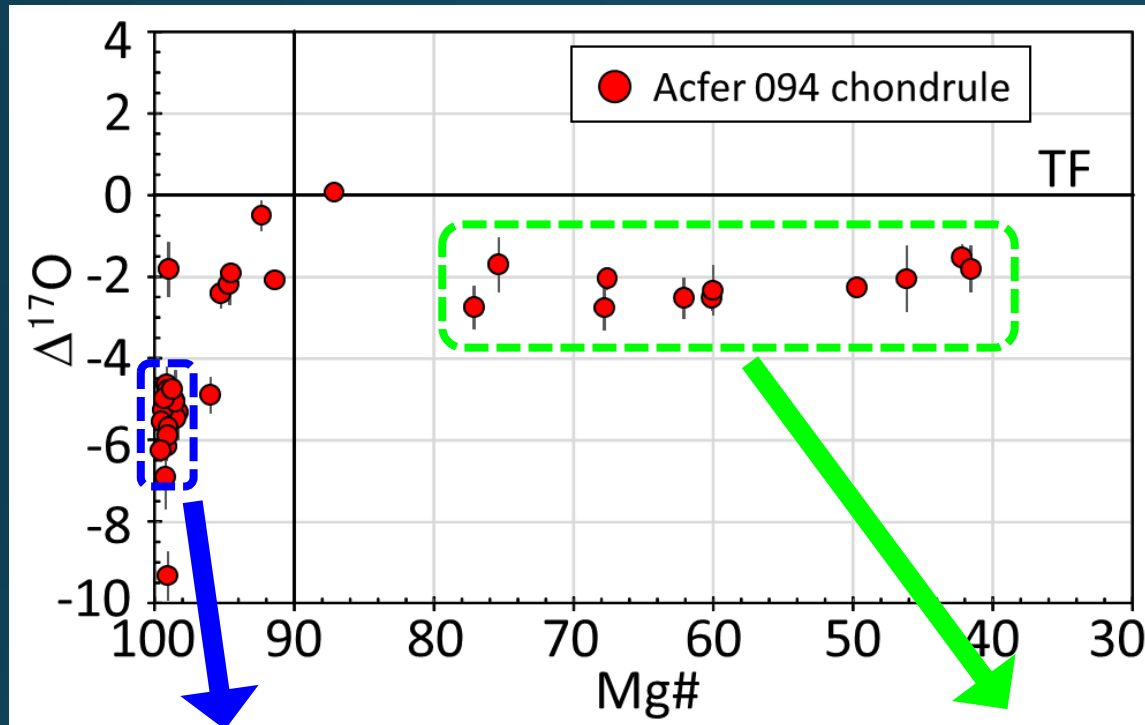


# “Host part ●” と “Relic grain ◇” の関係



- Relict grainの出現に**排他性**がある (High- $\Delta^{17}\text{O}$  vs. Low- $\Delta^{17}\text{O}$ )
- Relict grainの多くは**Host Partの $\Delta^{17}\text{O}$ の範囲内**

# コンドルール<sup>1</sup>の $\Delta^{17}\text{O}$ と酸化還元状態

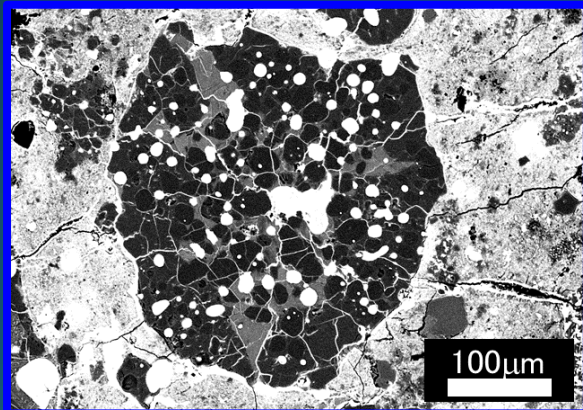


Mg#

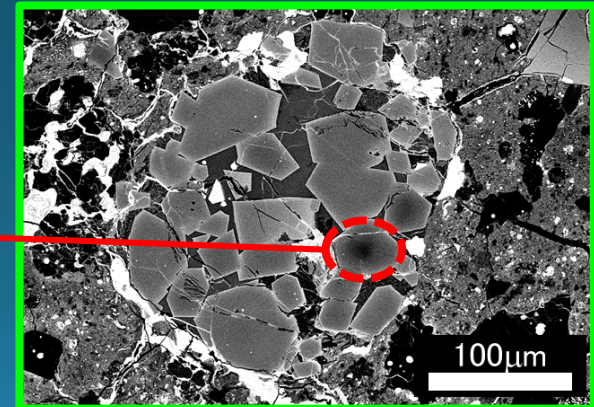
$$= 100 \times \text{MgO} / (\text{MgO} + \text{FeO})$$

珪酸塩中の酸化鉄の量  
(酸化度)の指標

FeO少ない Type I コンドルール



FeO多い Type II コンドルール



Relict grain



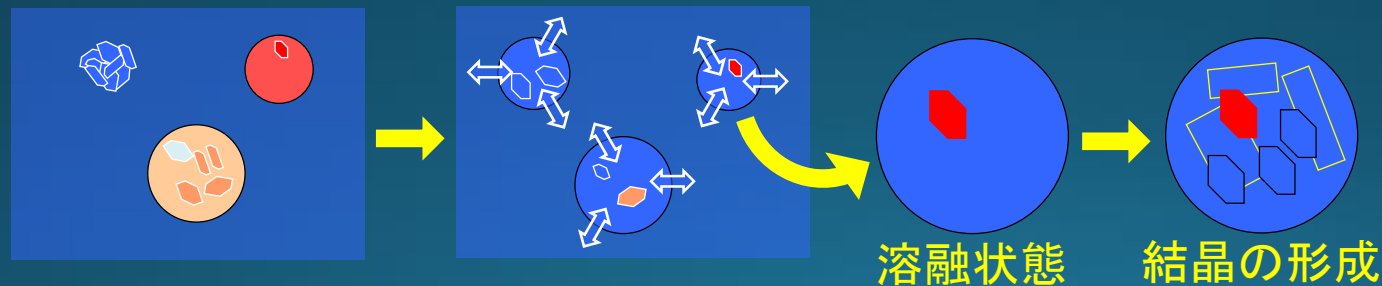
# Chondruleの酸素同位体比とMg#は 熔融時の周辺環境を反映している

## ➤ Relict grainの $\Delta^{17}\text{O}$ の排他性:

Host part (熔融メルトから晶出した部分) の酸素同位体比が、材料物質の酸素同位体比の平均値になっていない

“Chondrule-forming meltの酸素同位体比は  
外部(雰囲気ガス)の影響を受けている”

## ➤ Host partの $\Delta^{17}\text{O}$ の均質性、酸化還元状態(Mg#)との相関: 熔融メルトと雰囲気ガス(Nabular gas?) とが蒸発/再凝縮を経て 同位体平衡に近い状態に到達していた



“Chondrule形成環境のトレーサーとして有用”

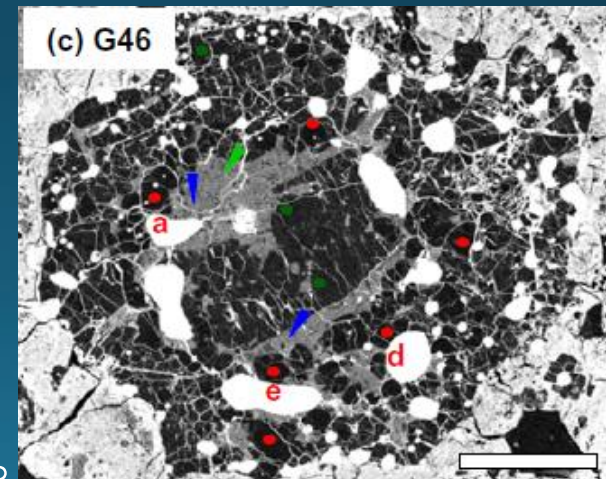
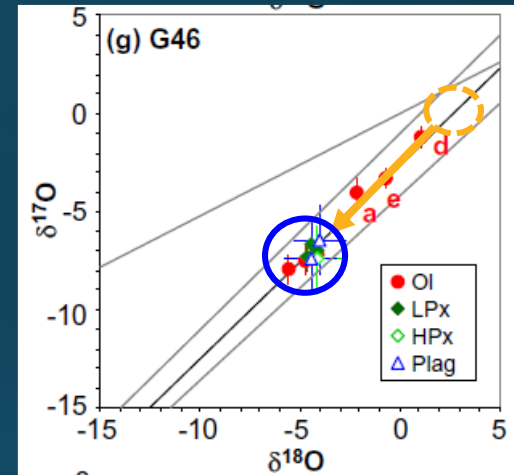
# Chondruleの酸素同位体比とMg#は 熔融時の周辺環境を反映している

- 酸化的形成環境(低いMg#)で $\Delta^{17}\text{O}$ が高い:  
高い $\Delta^{17}\text{O}$ を持った $\text{H}_2\text{O}$  (ice or vapor) 量の増加を  
反映している(後述)

ただし、高い $\Delta^{17}\text{O}$ を持つRelic grainが低い $\Delta^{17}\text{O}$ をもつHost partに包含されている例があるので、  
一方的に $\text{H}_2\text{O}$ 量が上昇したわけでは無い

- (熔融)微惑星衝突の飛沫でコンドルールを形成するのは、Relict grainや金属鉄の存在を説明するのが困難

一方で、単純な化学平衡を仮定した場合、  
Type II コンドルールの形成には1000倍程度の  
ダスト成分の濃集が必要で、物理的に非現実的。  
(Hubbard et al., 2018 MAPS)



# 隕石の種類と コンドロールの酸素同位体比の関係

普通コンドライト： S型小惑星と関連（Main beltの内惑星側？）

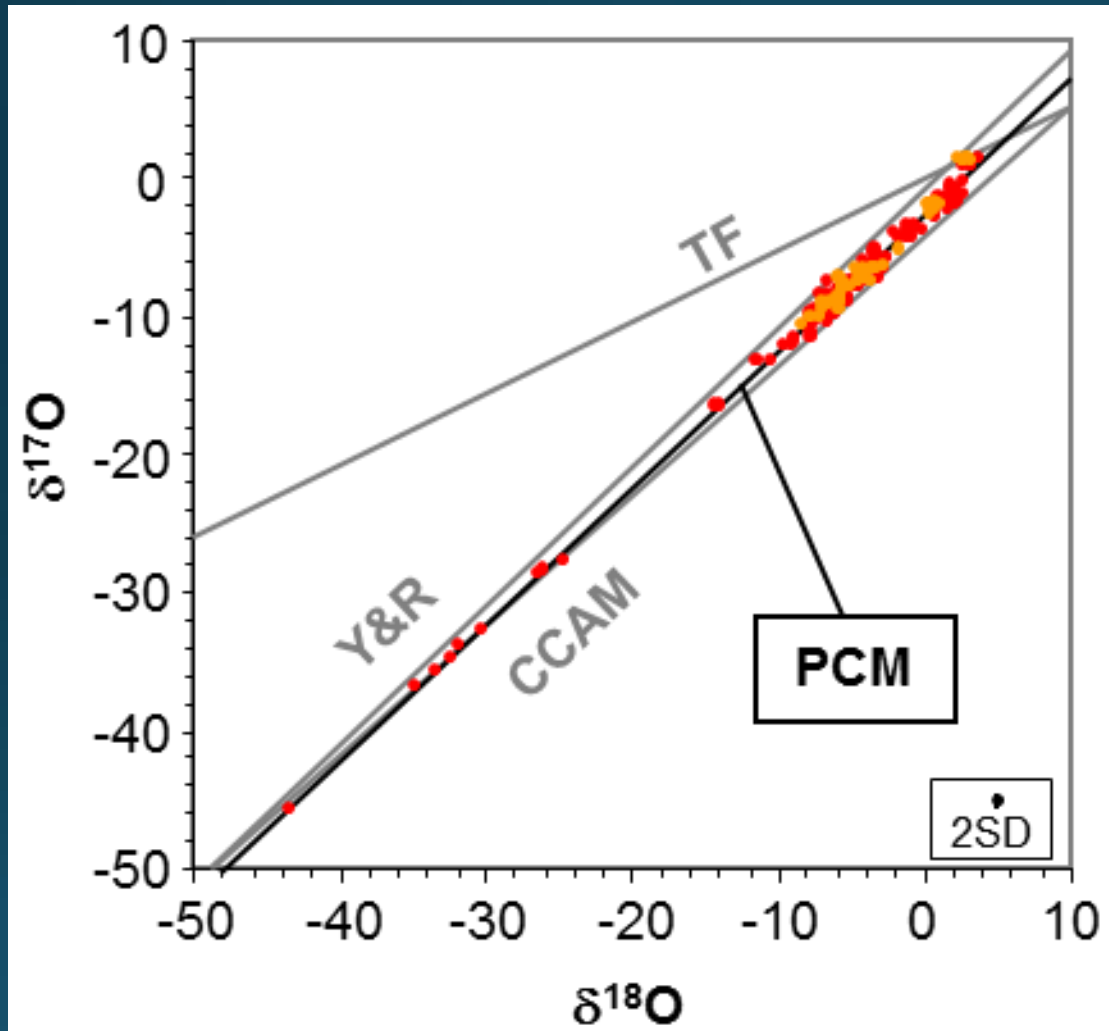
炭素質コンドライト： C型小惑星と関連（Main beltの外惑星側？）  
（CRコンドライト母天体： 炭素質コンドライトの中では特に遠方で形成）

Tagish Lake隕石： D型小惑星と関連（Main beltより外惑星側？）

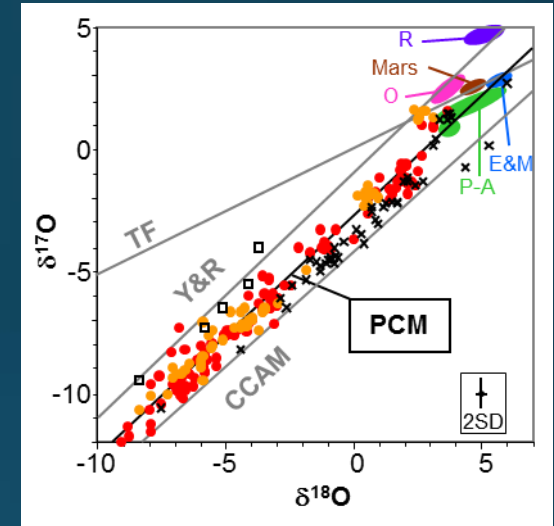
# Primitive Chondrule Mineral (PCM) line

Acfer 094コンドルール(Olivine, Low-Ca Pyroxene)の酸素同位体比の回帰直線

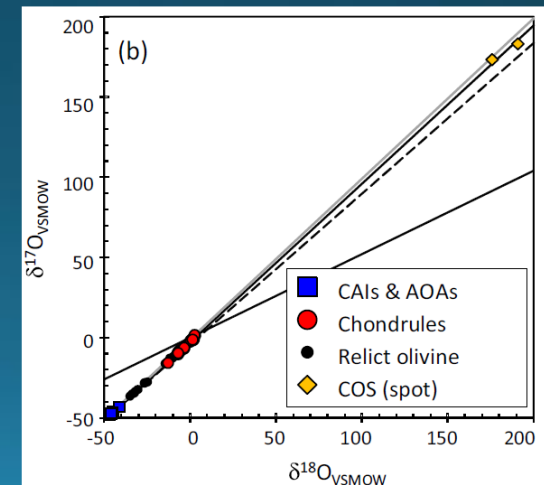
TF線と地球・月マントル(E&M)の値で交差



(Ushikubo et al., 2012, GCA)



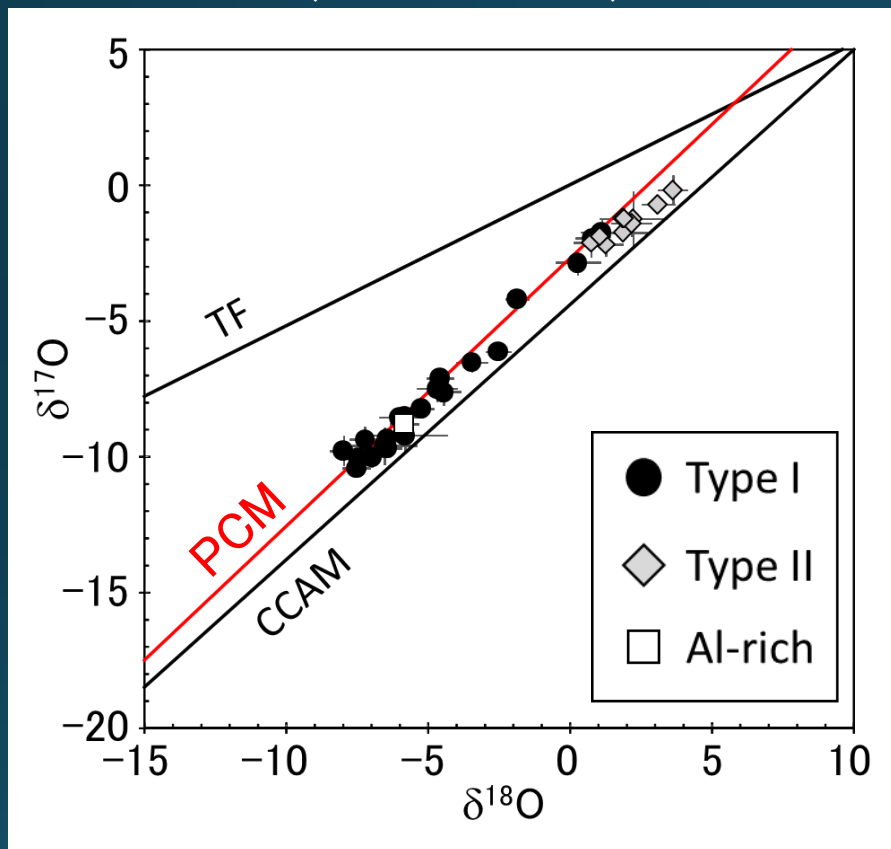
端成分(CAI, COS)の値もPCM線上に乗る





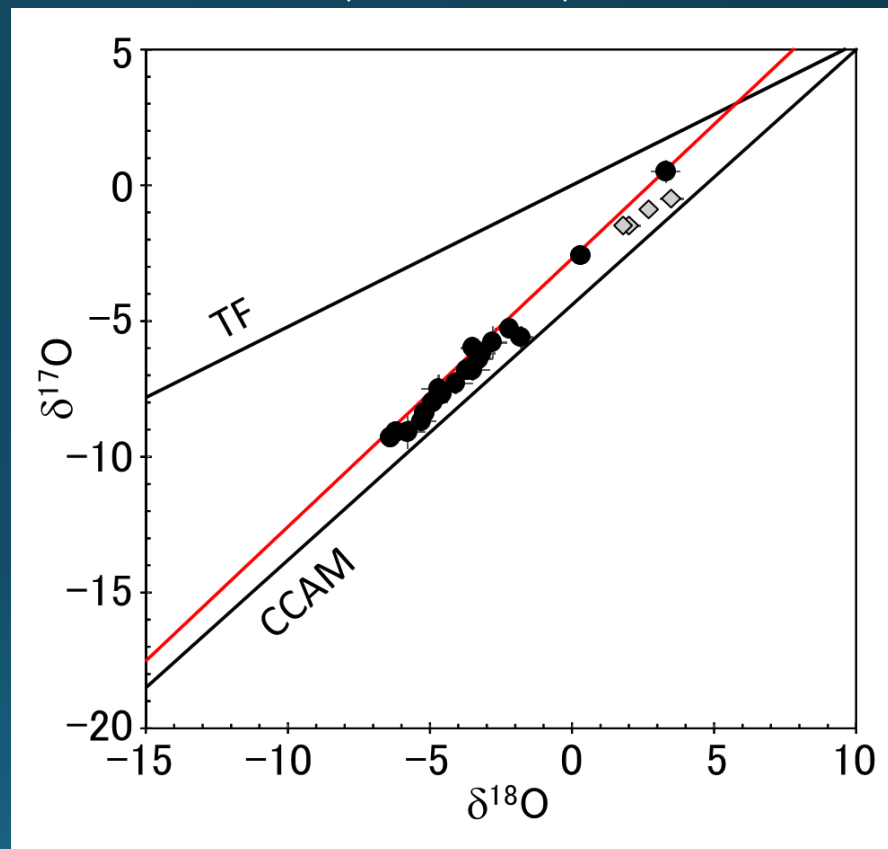
# “Host chondrules” in 炭素質コンドライト(CO & CM)

CO chondrite  
(Yamato 81020)



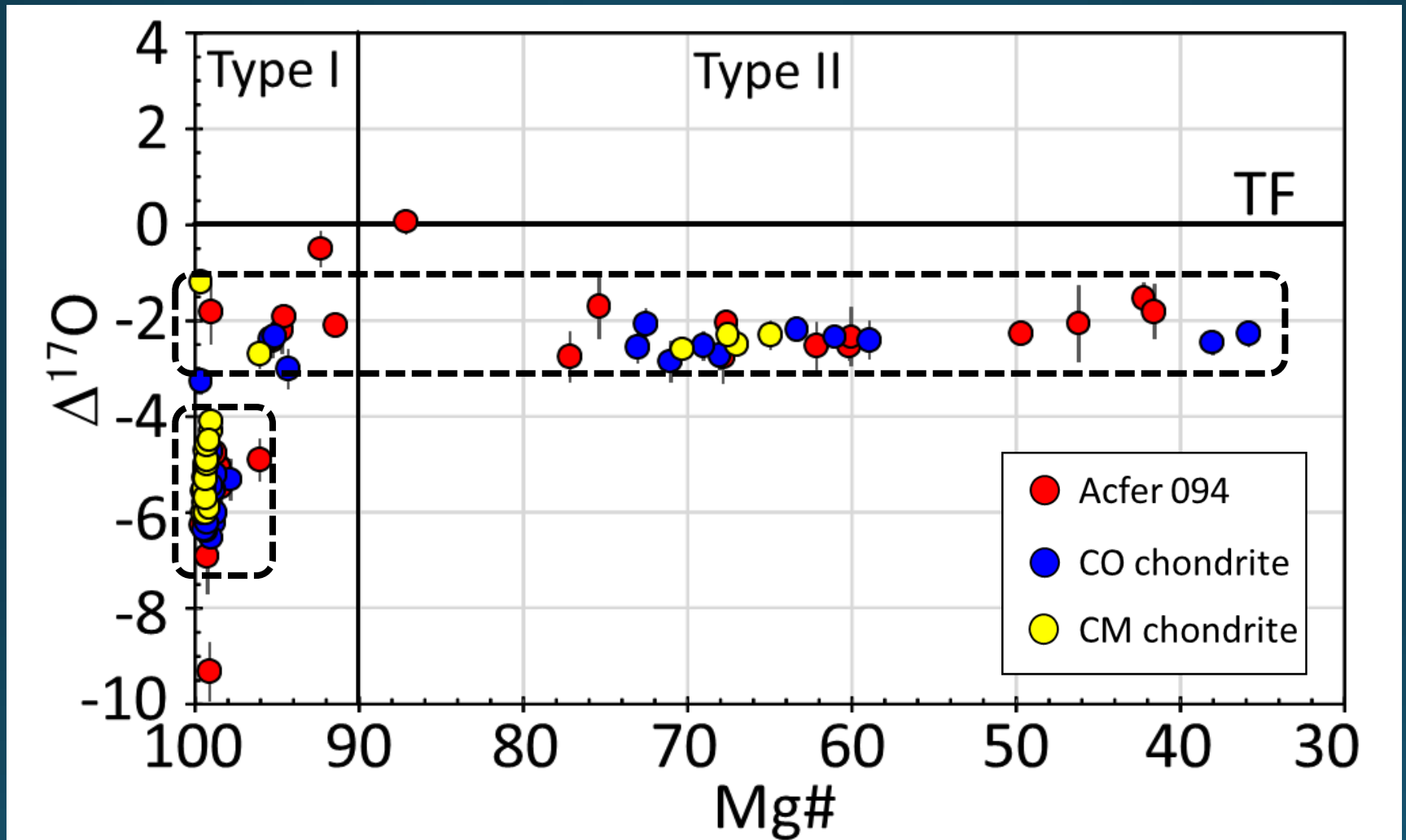
Tenner et al. (2013) GCA

CM chondrite  
(Murchison)



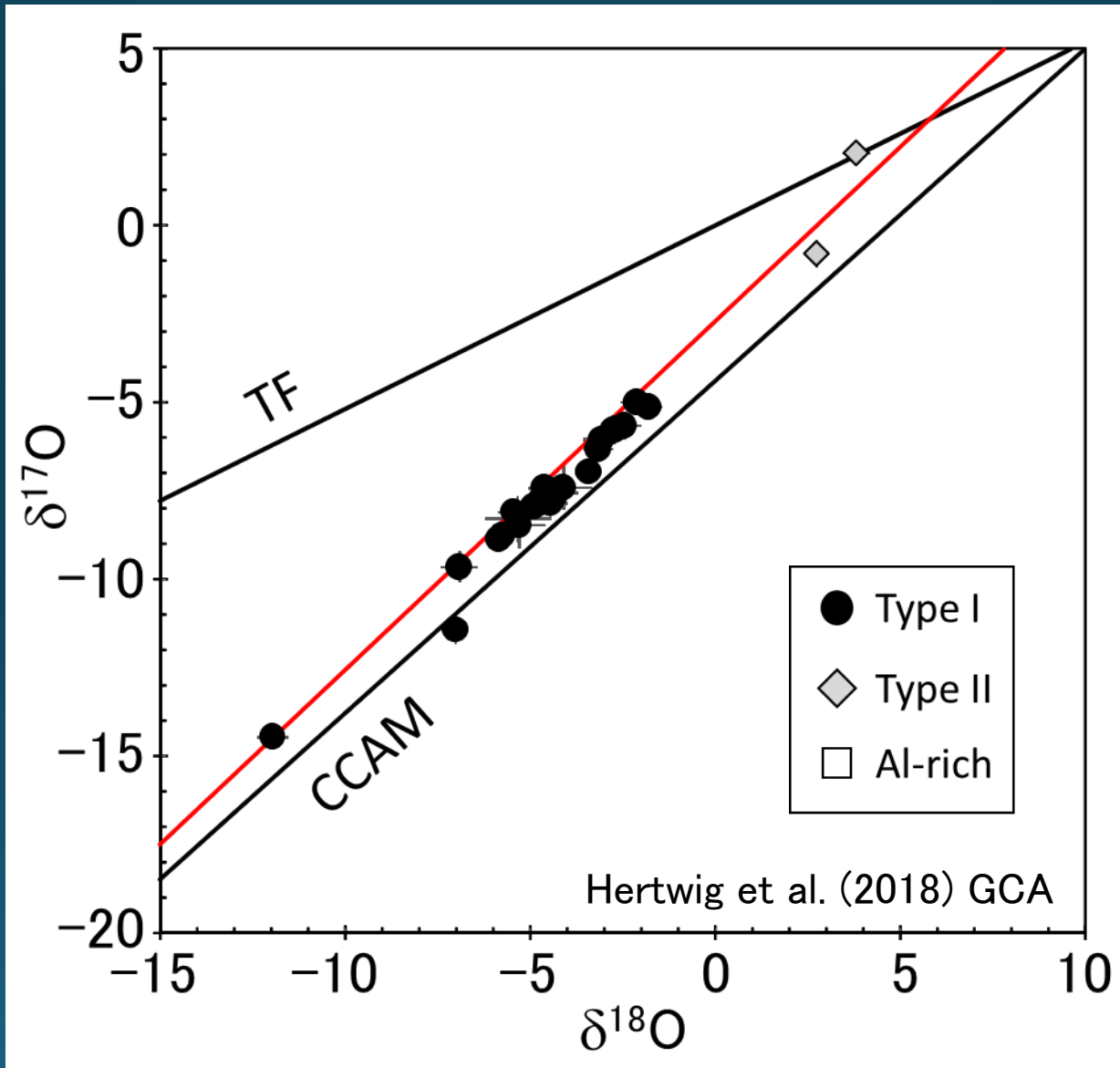
Chaumard et al. (2018) GCA

# Mg#- $\Delta^{17}\text{O}$

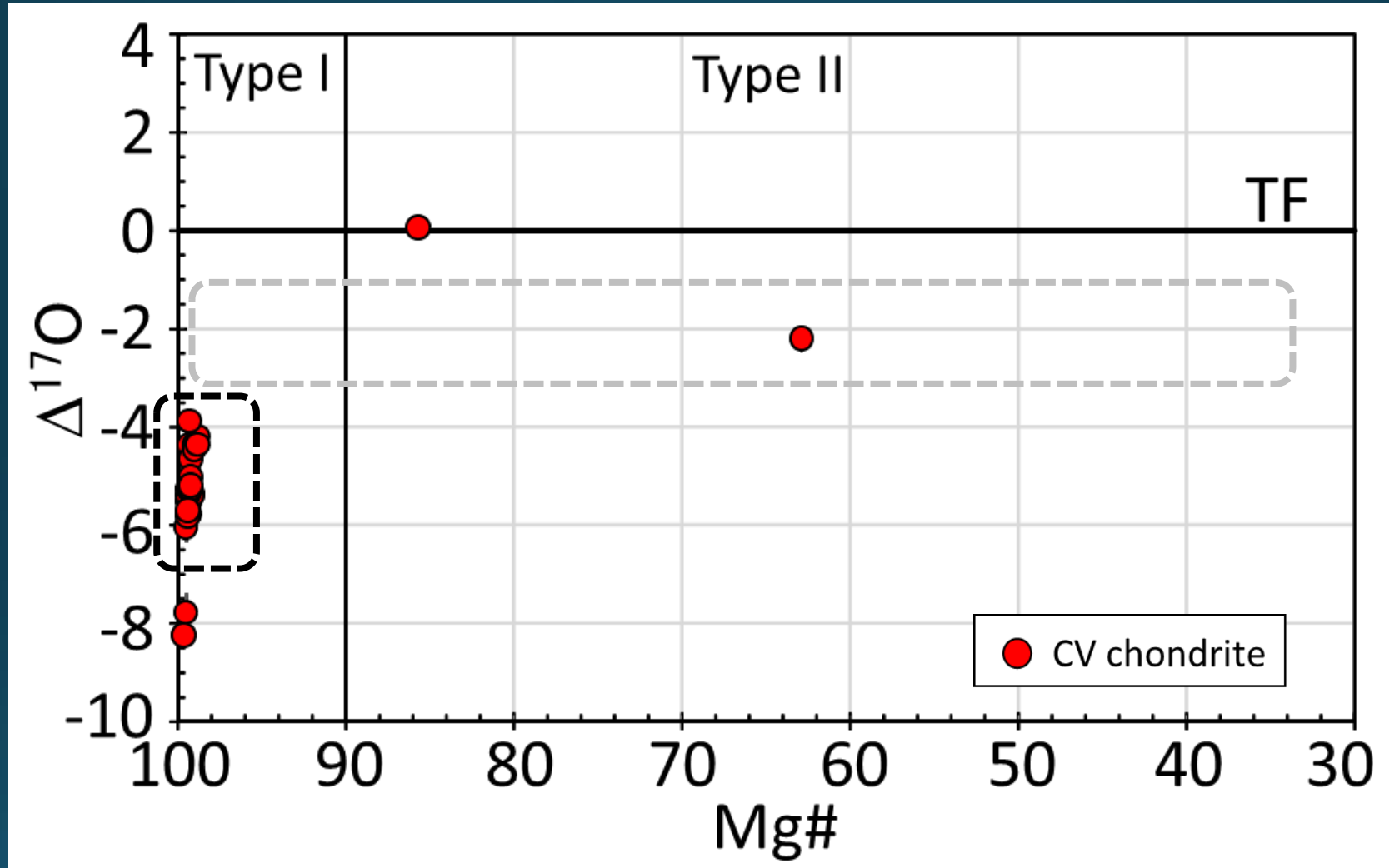


# 炭素質コンドライト(CV)

CV chondrite (Kaba)



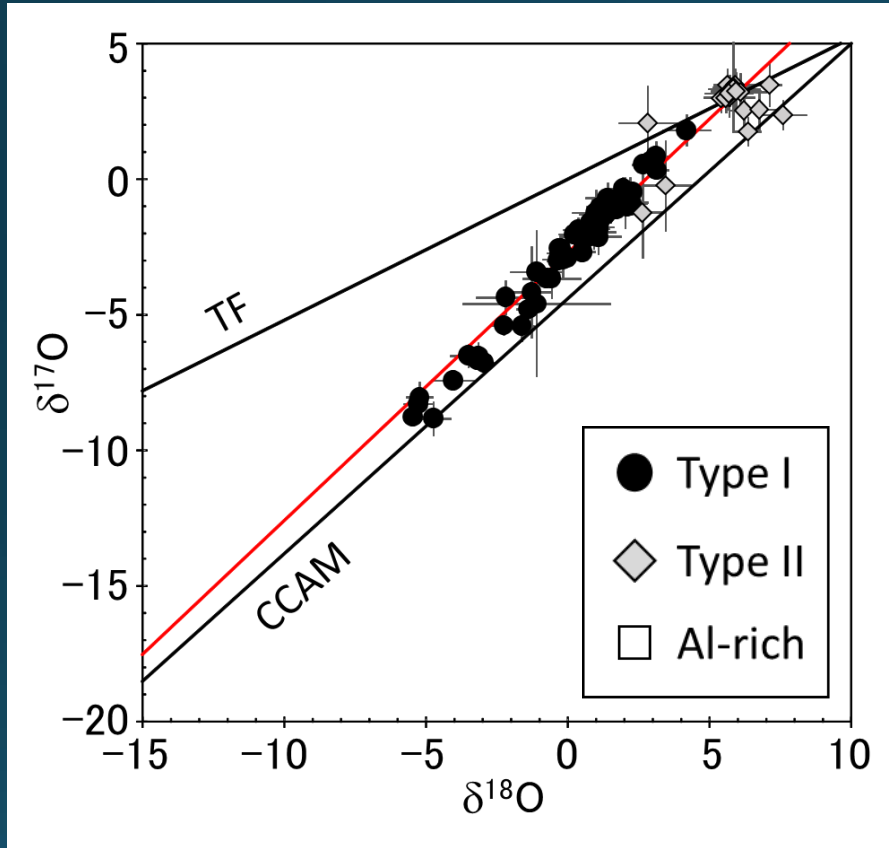
# Mg#- $\Delta^{17}\text{O}$





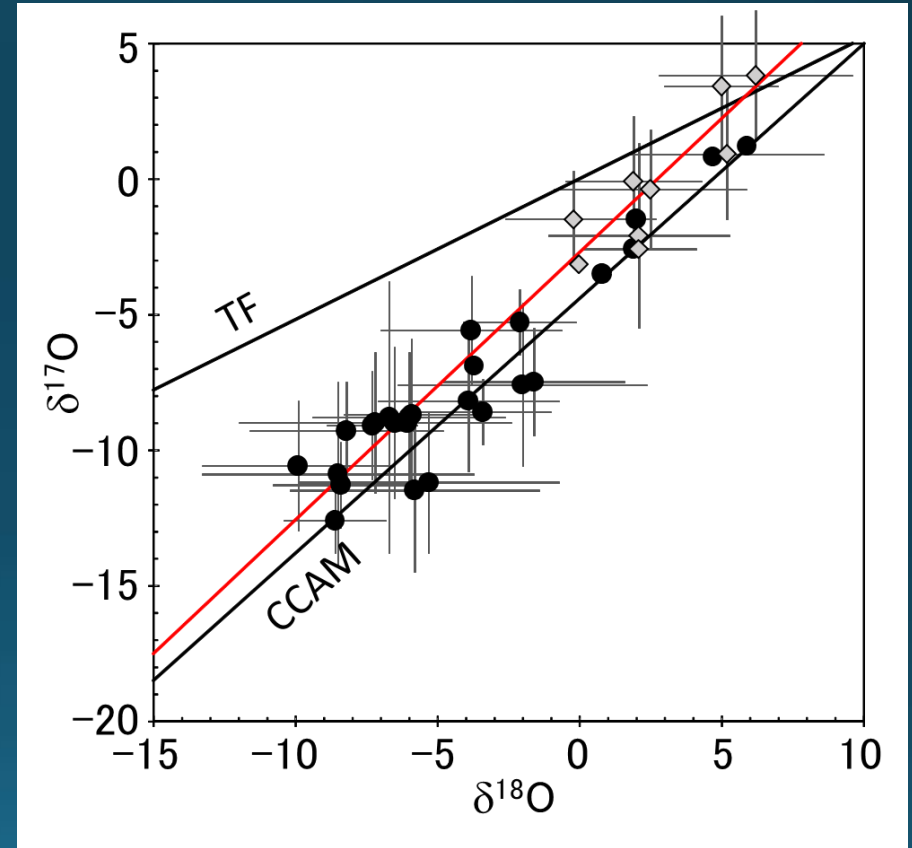
# 炭素質コンドライト (CR, Tagish Lake+)

CR chondrites



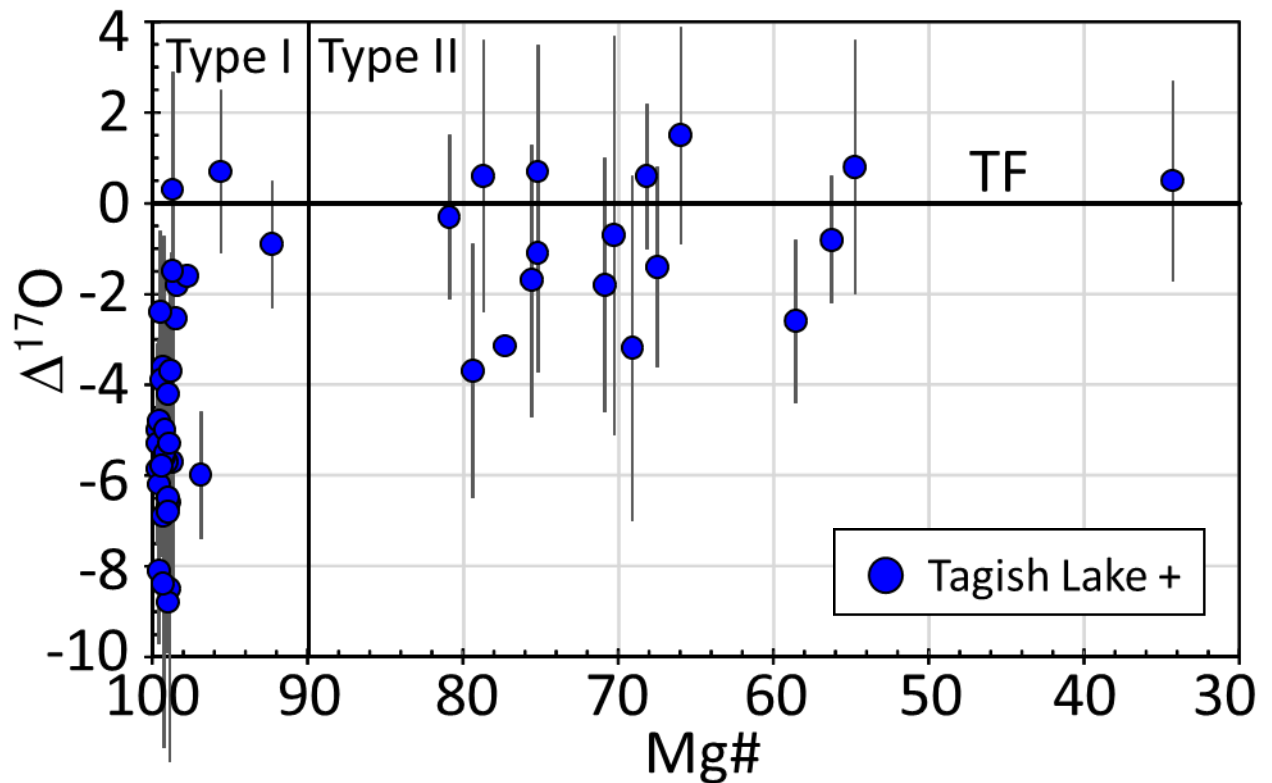
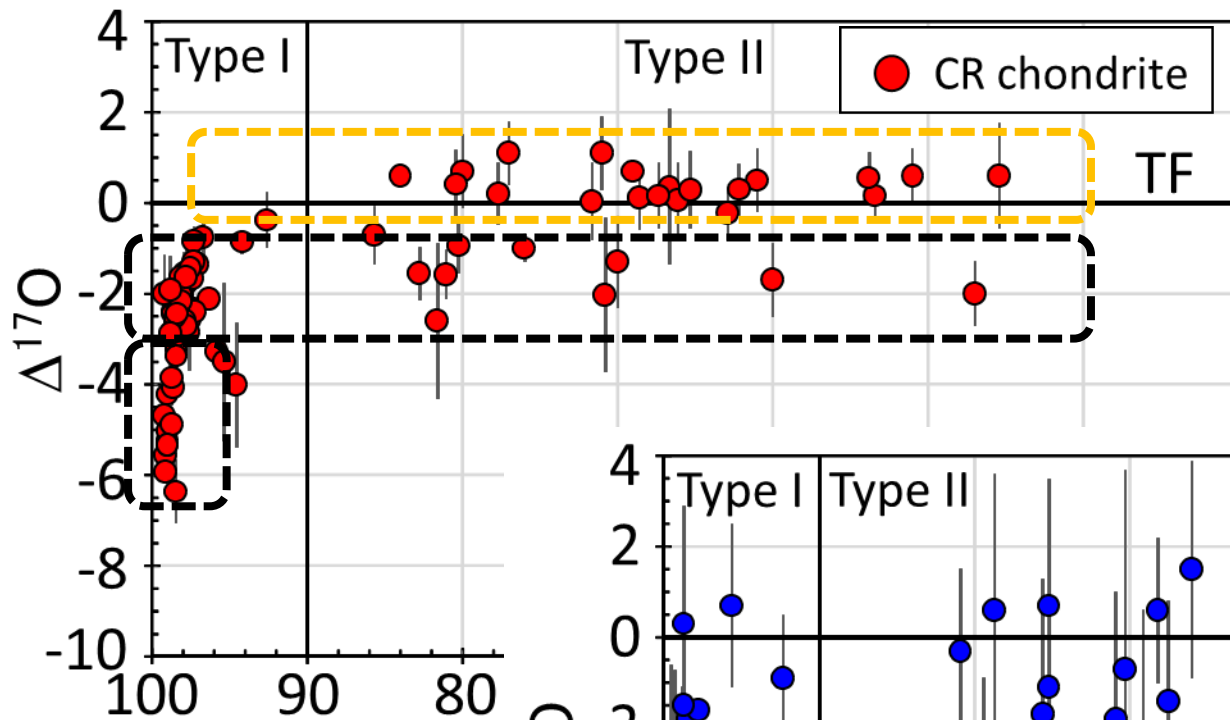
Schrader et al. (2013) GCA,  
Schrader et al. (2014) GCA,  
Tenner et al. (2015) GCA

Tagish Lake & similar meteorites  
(WIS 91600, MET 00452)

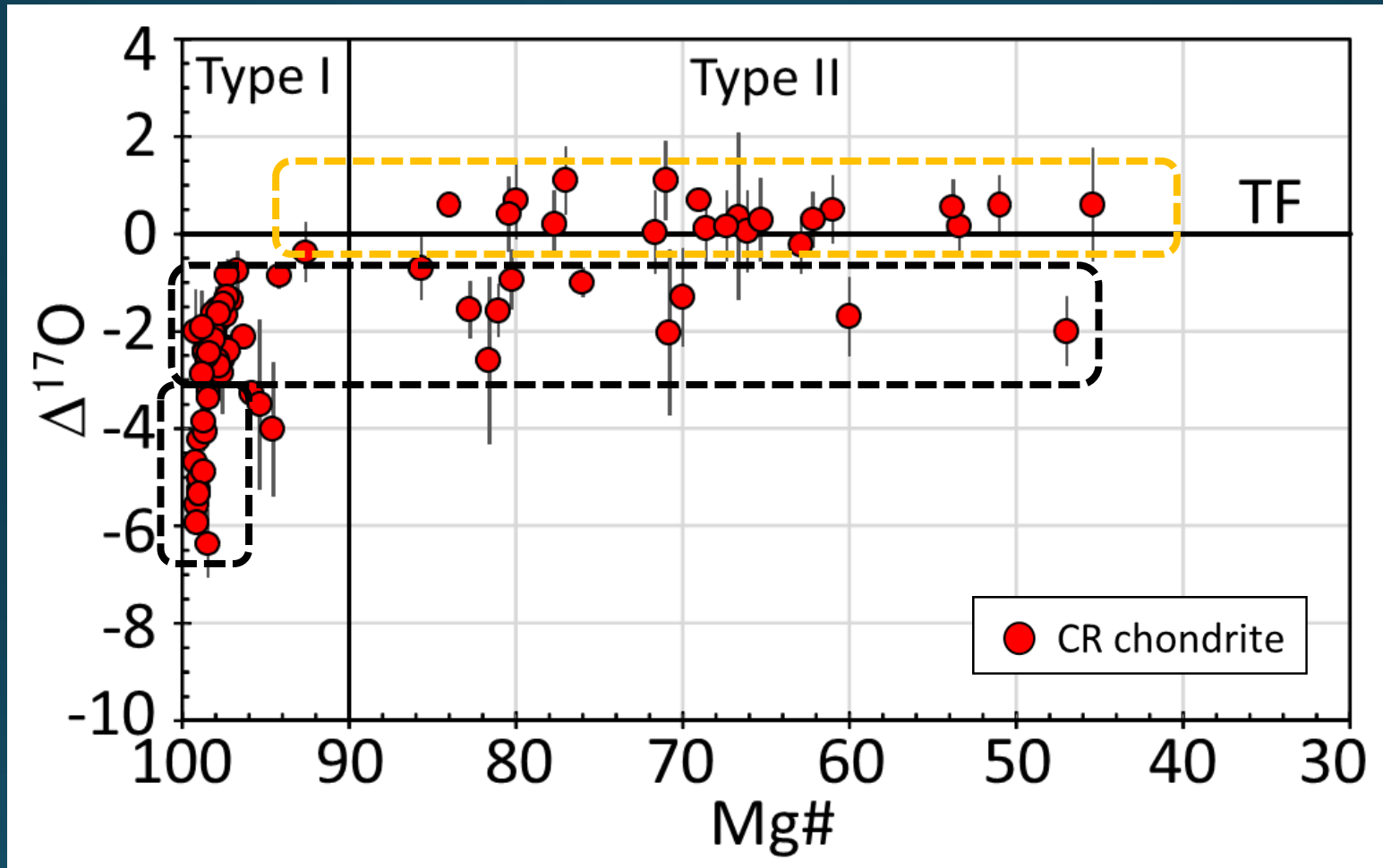


Russell et al. (2010) GCA,  
Yamanobe et al. (2018) Polar Sci.

# Mg#- $\Delta^{17}\text{O}$



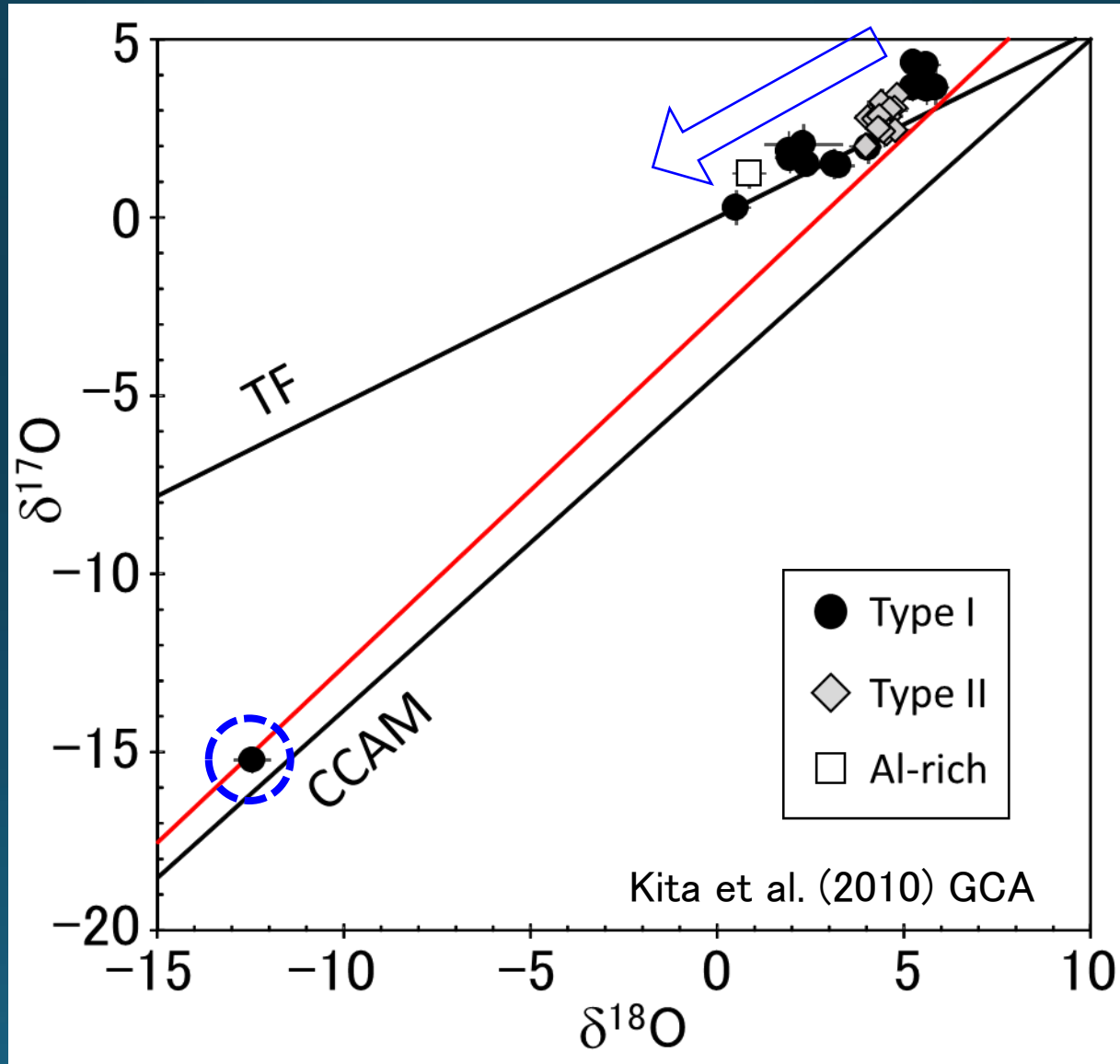
# Mg#- $\Delta^{17}\text{O}$



- ① 還元的成分でも $\Delta^{17}\text{O} \sim -5\text{‰}$ より $\Delta^{17}\text{O} \sim -2\text{‰}$ が多い
- ② 酸化的成分で $\Delta^{17}\text{O} \sim -2\text{‰}$ の他に $\Delta^{17}\text{O} > 0\text{‰}$ が存在

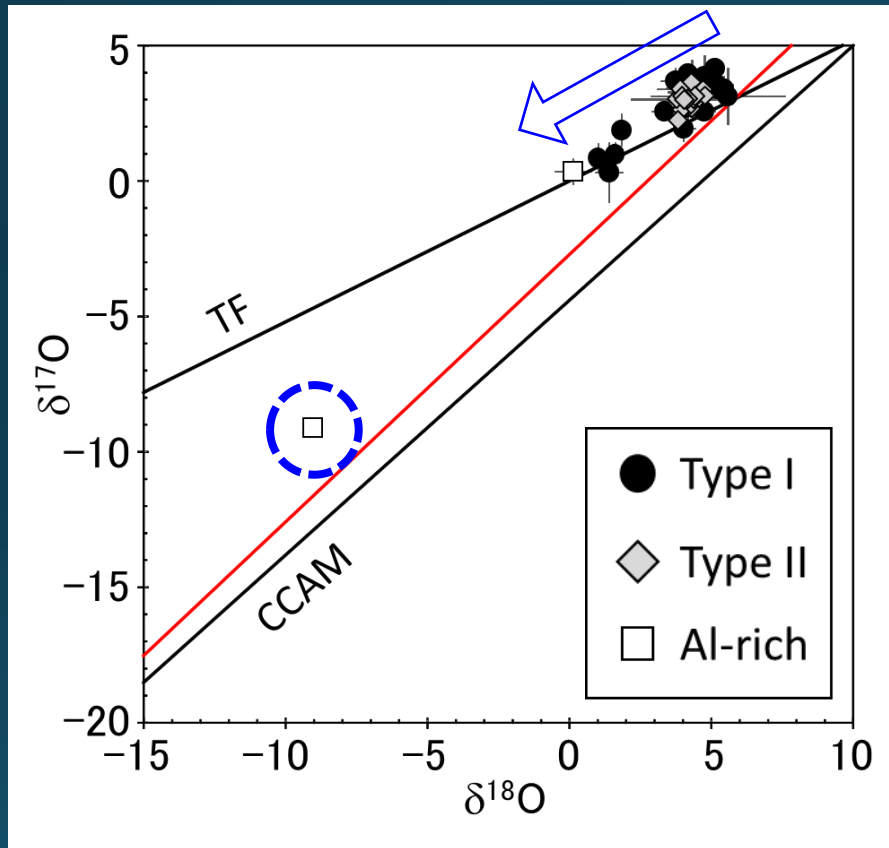
# 普通コンドライト (LL)

LL chondrites (Semarkona, Bishumpur, Krymka)

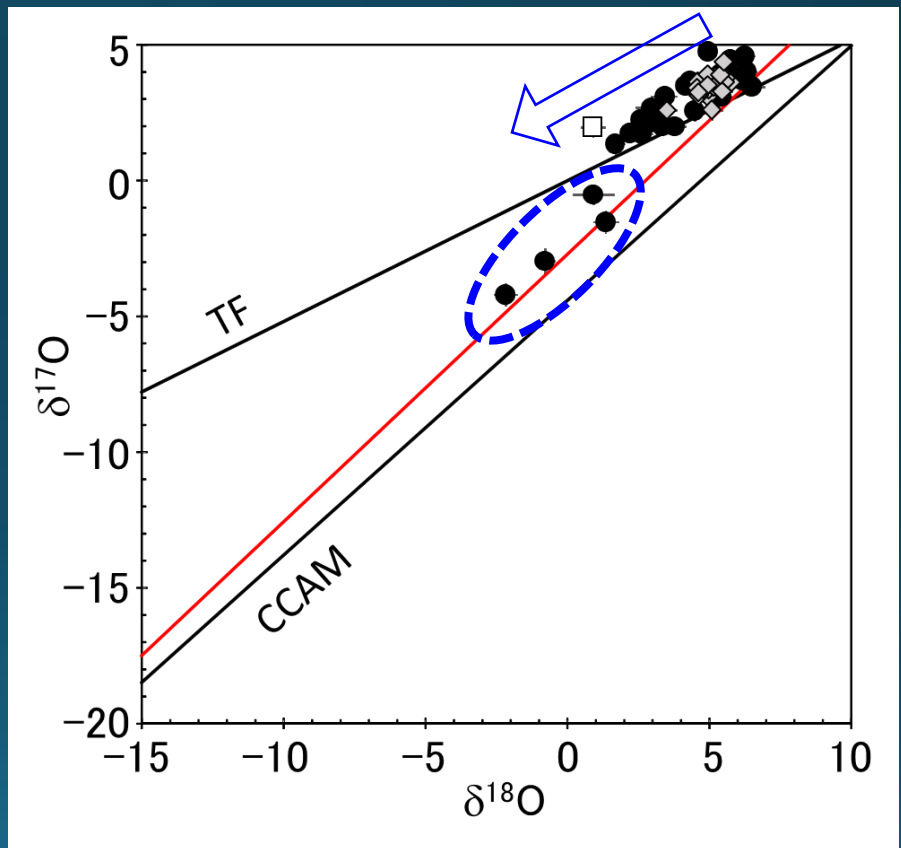


# 非炭素質コンドライト (H, R)

H chondrite (Yamato 793408)    R chondrites (NWA 753, DaG 013)



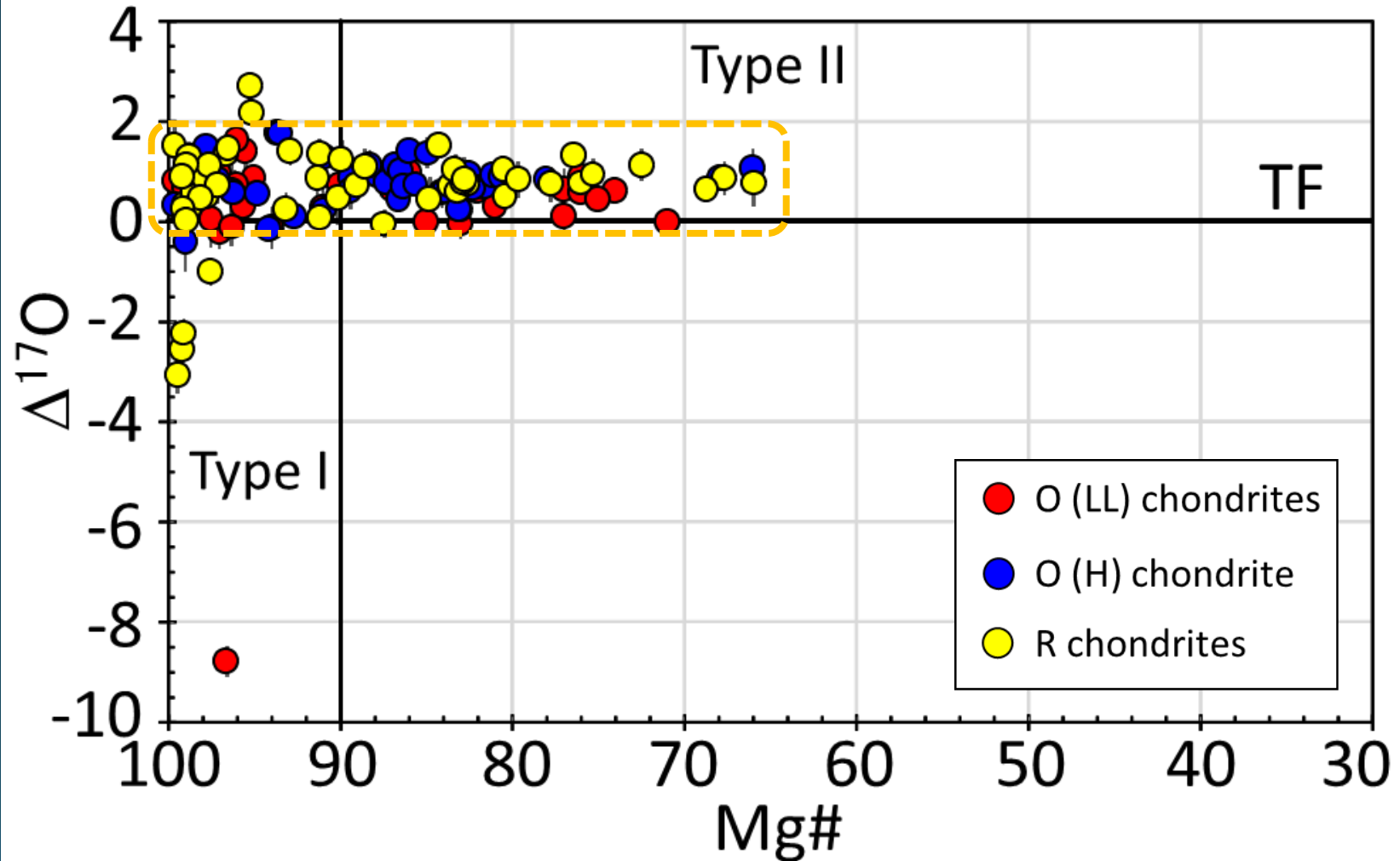
Kita et al. (2008) LPSC abst.



Kita et al. (2013) LPSC abst.

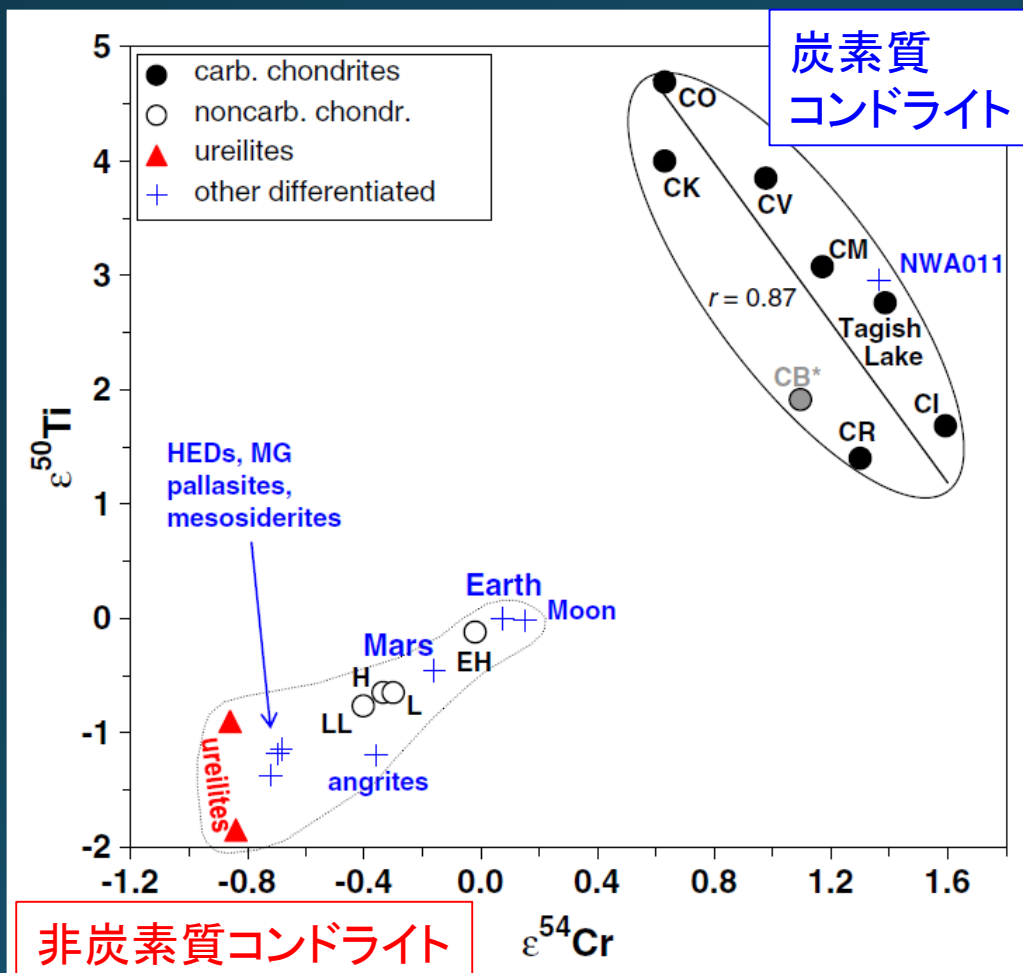


# Mg#- $\Delta^{17}\text{O}$

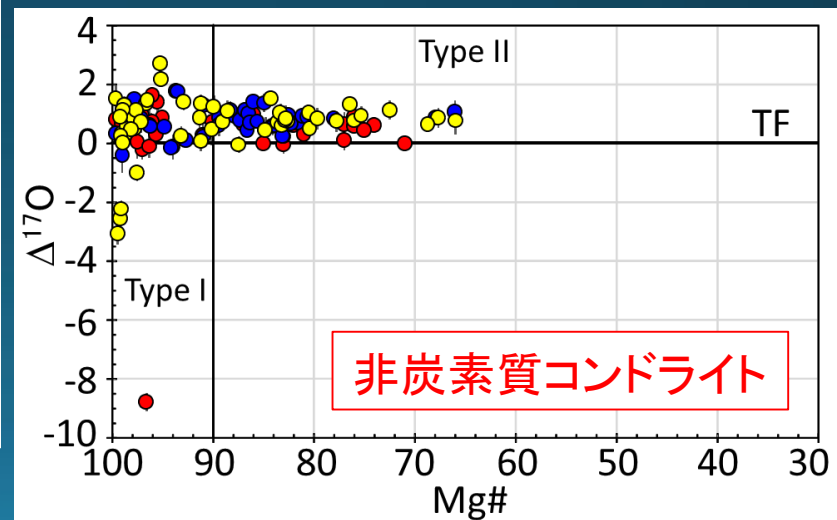
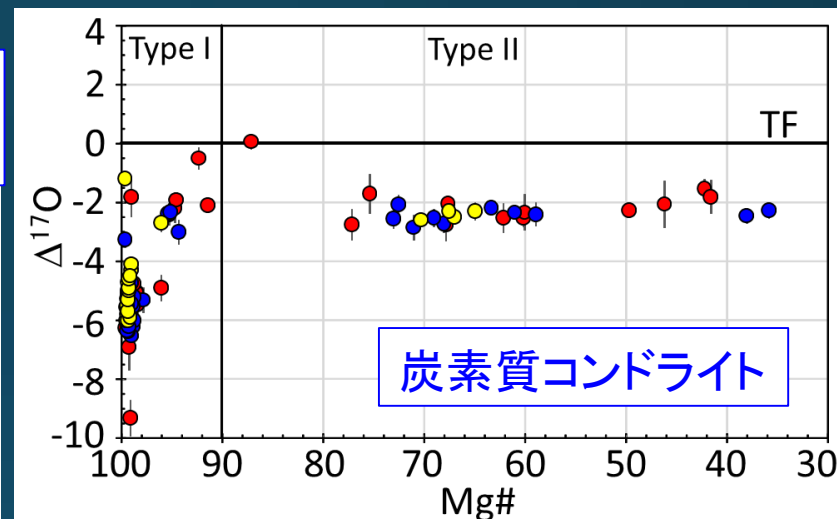


- ① 殆どが $\Delta^{17}\text{O} = 0 \sim +2\text{‰}$ , Mg#との相関無し
- ② 炭素質コンドライトに典型的な $\Delta^{17}\text{O} < 0\text{‰}$ は稀

# 炭素質/非炭素質コンドライト物質 物質的・物理的な隔絶？

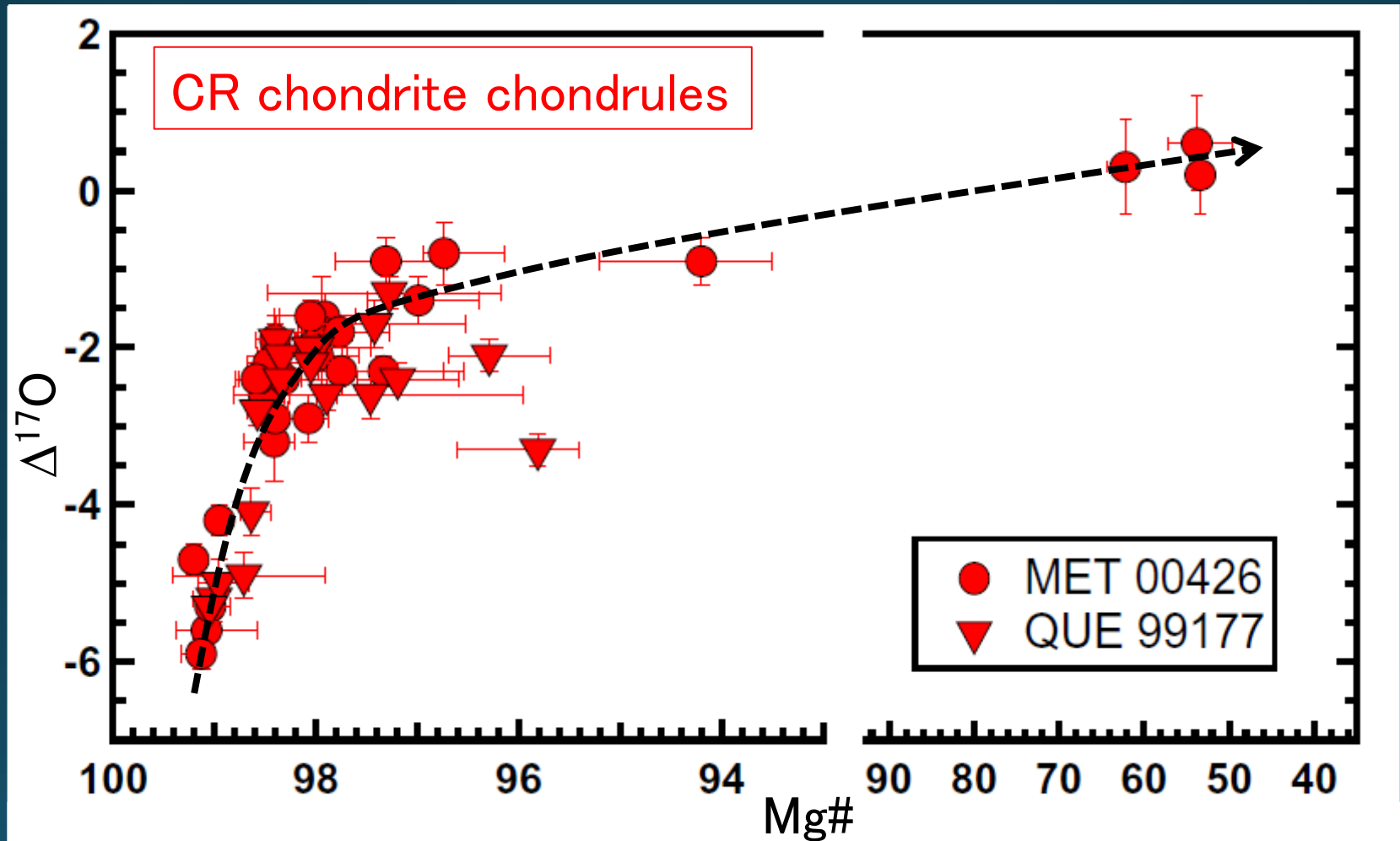


Warren (2011) EPSL



# コンドルールの特長: 高い $\Delta^{17}\text{O}$ を持つ水成分の増加?

Tenner et al. (2015) GCA, Tenner et al. (2018) in Chondrules



# コンドラールの相関：高い $\Delta^{17}\text{O}$ を持つ水成分の増加？

Tenner et al. (2015) GCA, Tenner et al. (2018) in Chondrules

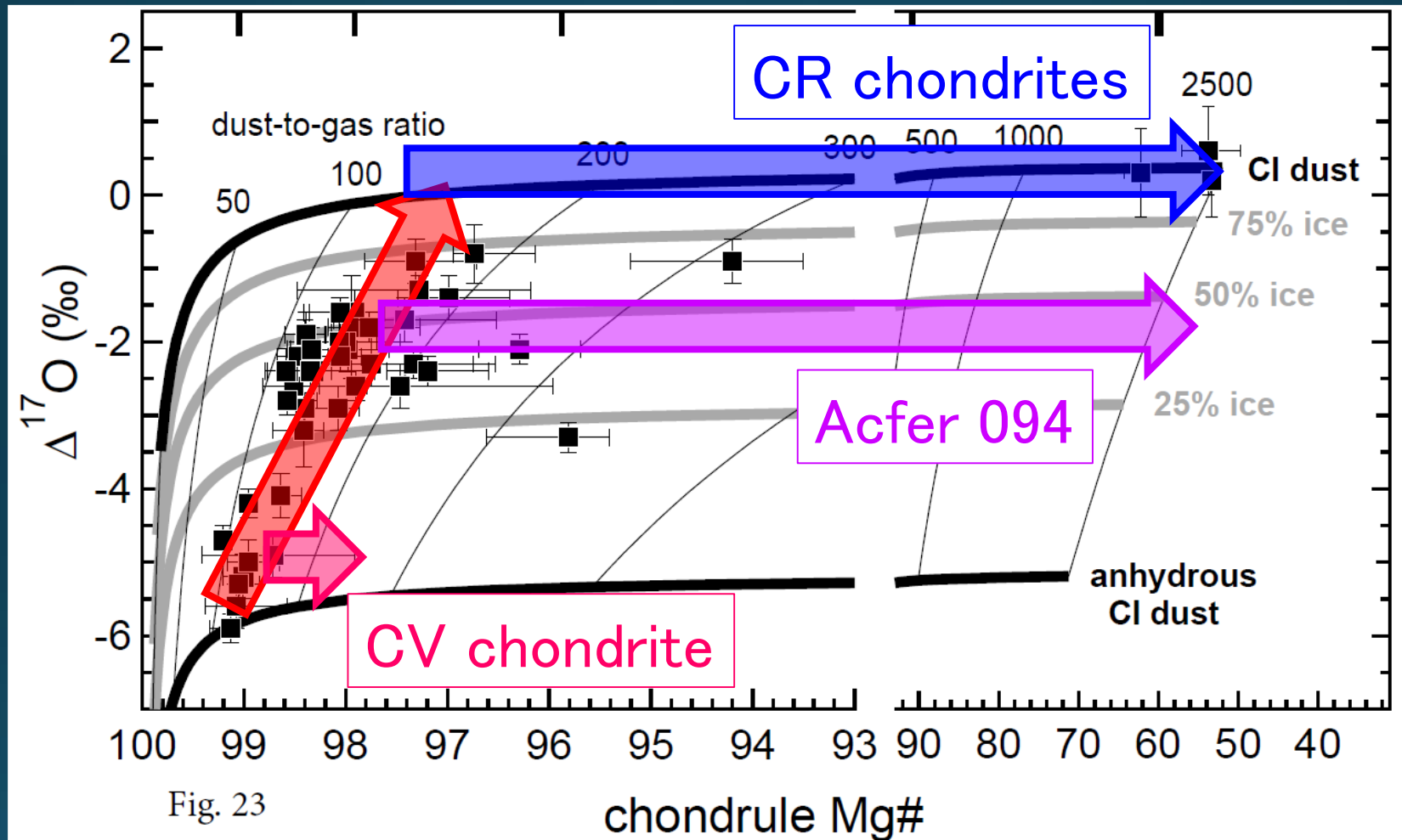


Fig. 23

$\Delta^{17}\text{O}$ 端成分

- ① Solar Nebular Gas:  $-28\text{‰}$
- ② Anhydrous Dust:  $-6\text{‰}$
- ③  $\text{H}_2\text{O}$  ice:  $+5\text{‰}$

として計算した例

# コンドロールの形成年代と $\Delta^{17}\text{O}$ ～ $\Delta^{17}\text{O}$ の変動は時間差か、空間分布か～

前提: CAI形成時期に $^{26}\text{Al}$ (半減期70.5万年)が  
太陽系全体に均一に分布していたとする。

$$\text{CAI初生値: } (^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0 = 5.2 \times 10^{-5}$$



# Al-Mg相対年代分析



ある鉱物が出来た時に $^{26}\text{Al}$ が存在した  
場合、現在は $^{26}\text{Mg}$ の過剰として  
見つかる。

太陽系形成が始まった当時には  
多くの $^{26}\text{Al}$ が存在した。

$$(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0 = 5.2 \times 10^{-5}$$

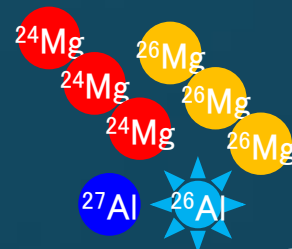
$^{26}\text{Al}$ は放射壊変で時間と共に減少。

$^{26}\text{Al}$ が沢山含まれていたもの  
(右の図の傾きの大きいもの)  
ほど、古い物質である。

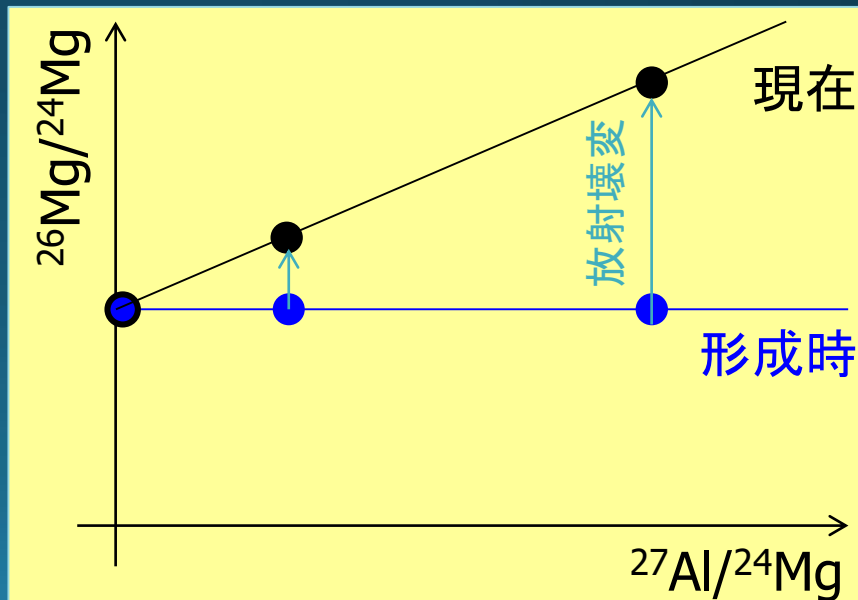
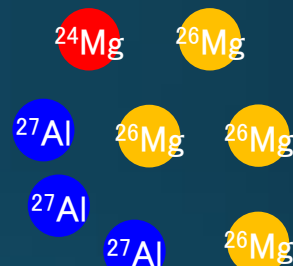
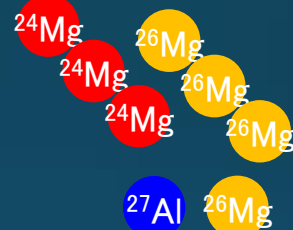
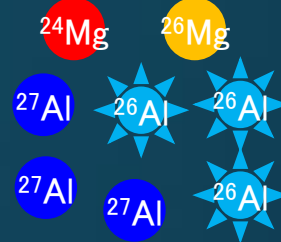
形成  
当時

現在

Mgの多い鉱物

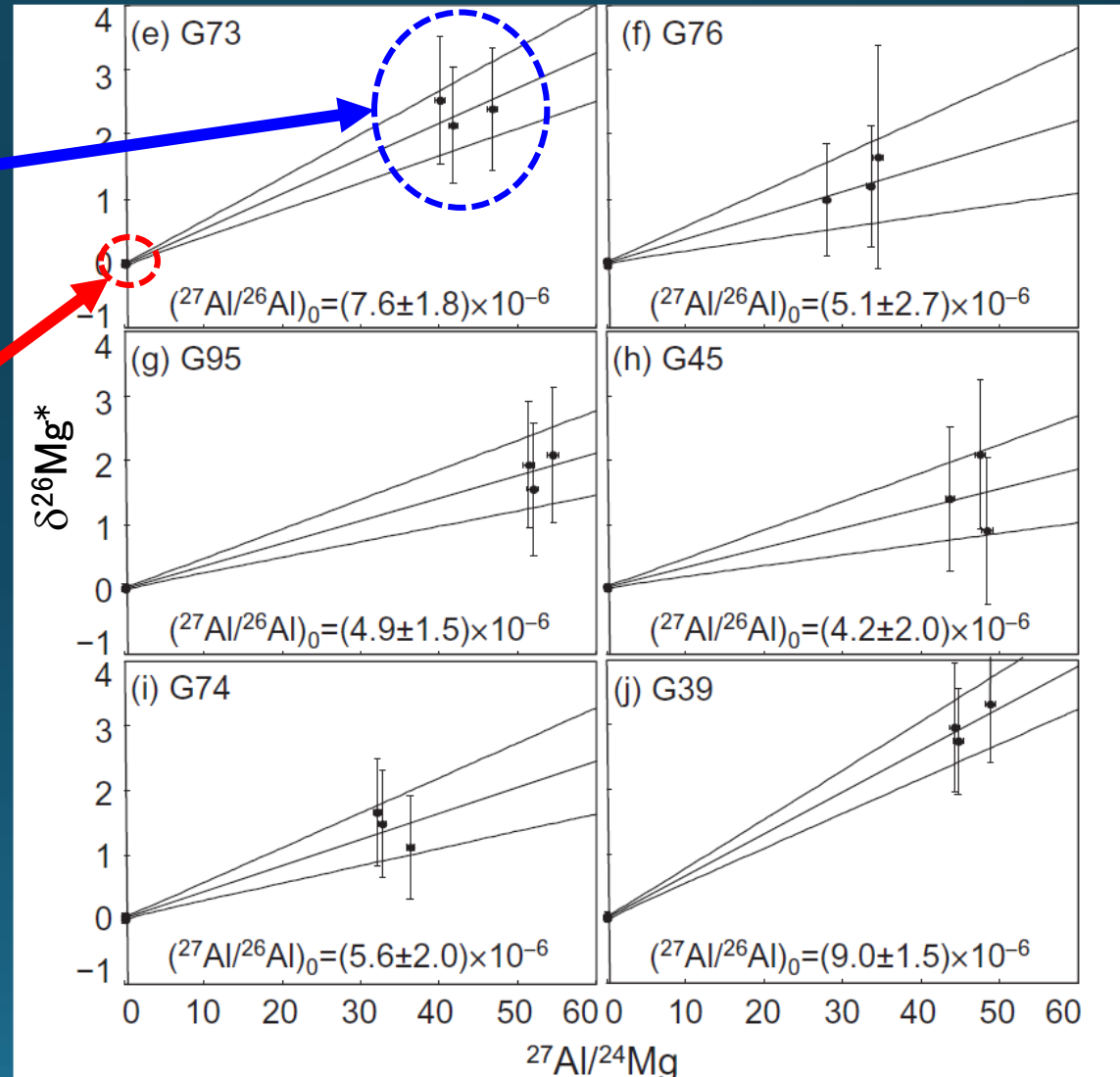
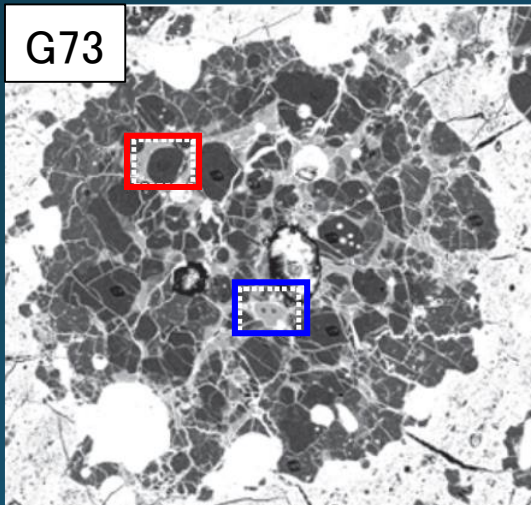
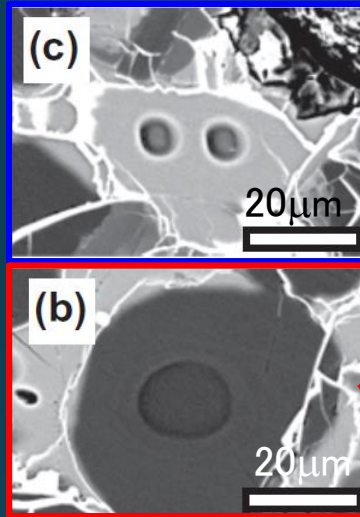


Alの多い鉱物

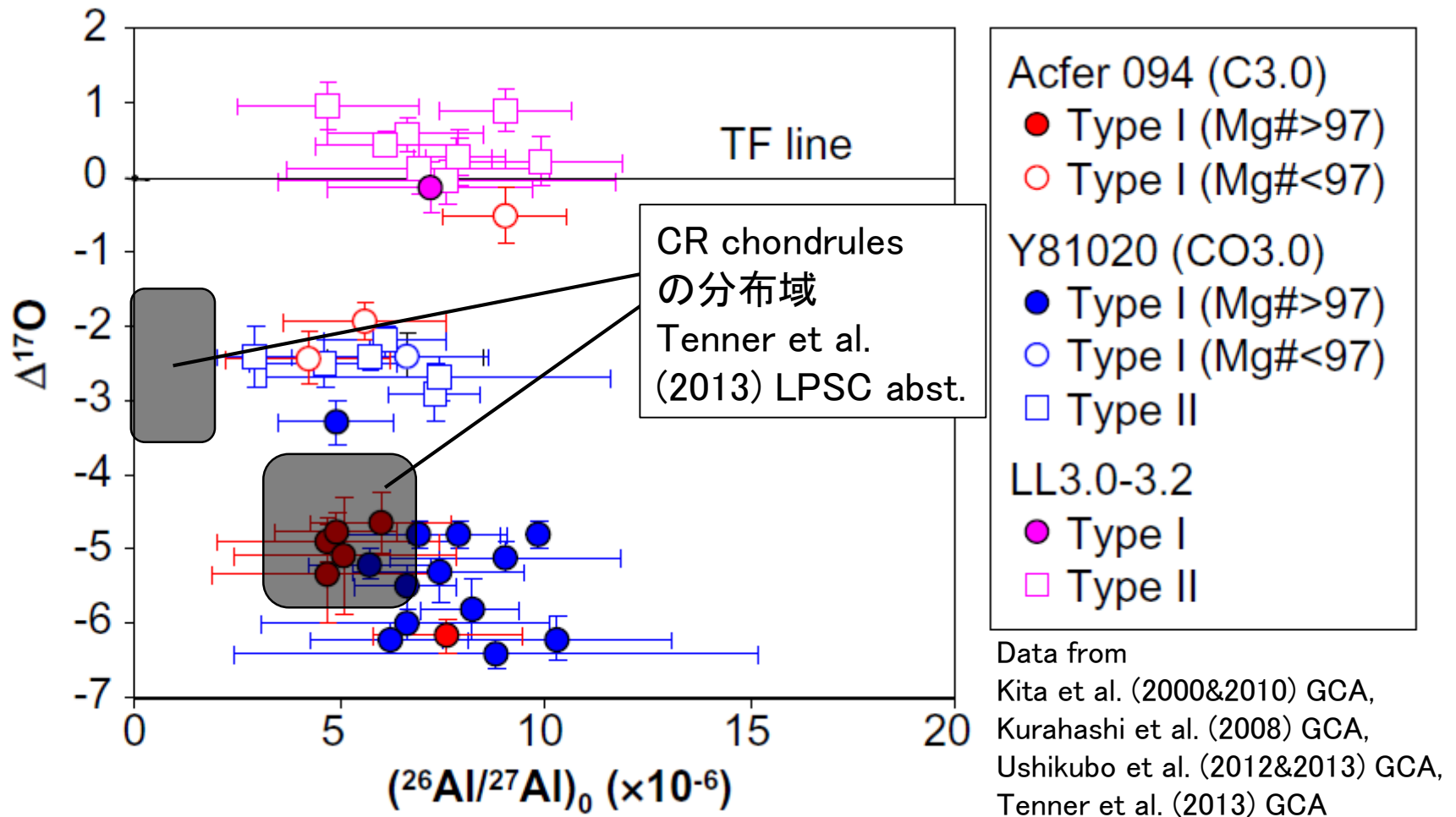


# Chondruleの $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$ 系

$(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0 \sim 6 \times 10^{-6}$  (CAI形成の約200万年後)



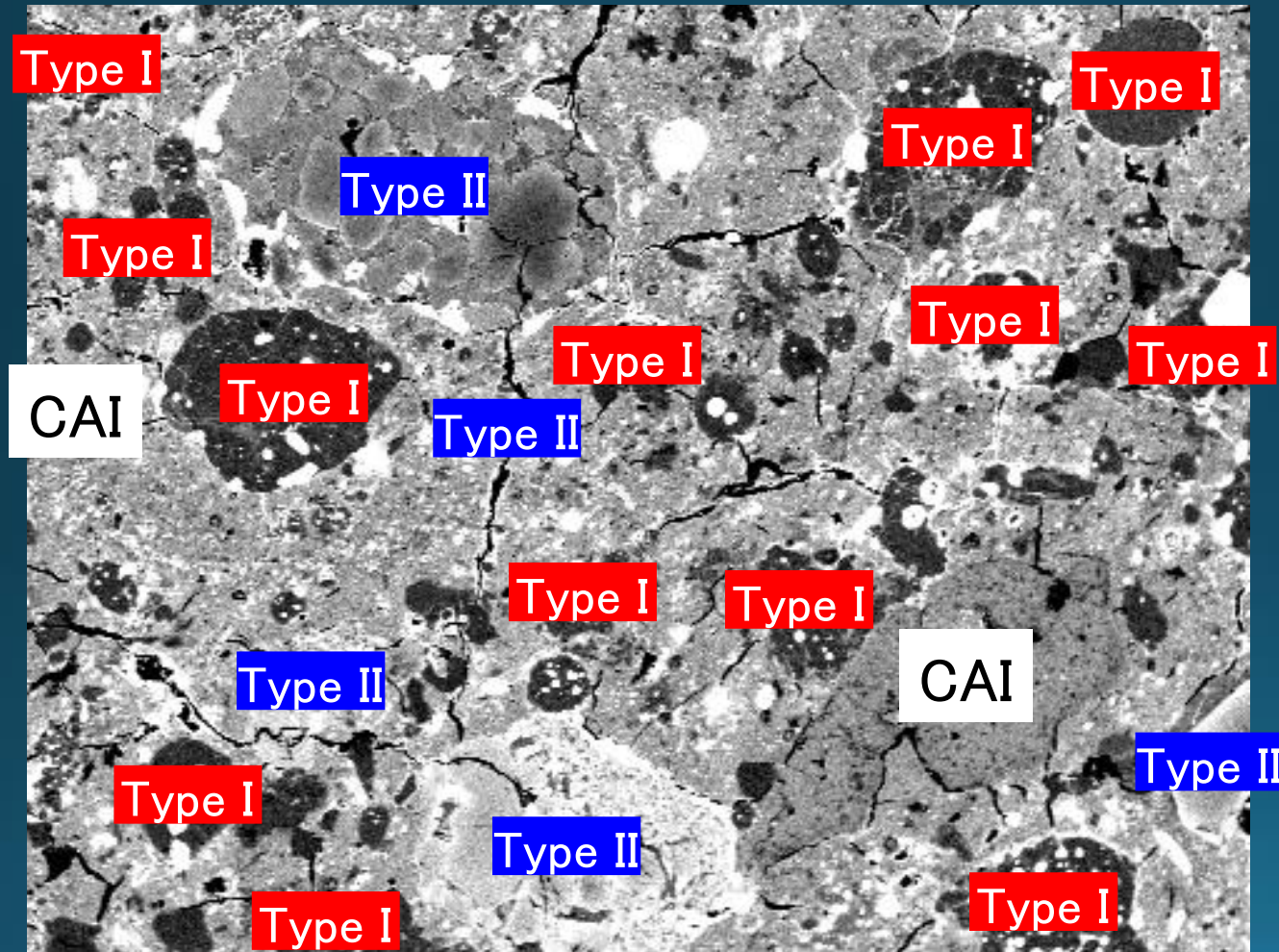
# $\Delta^{17}\text{O}$ と $^{26}\text{Al}$ 初生量の比較



コンドルール(普通 & 炭素質)形成時期に有意な時間差は無い  
⇒ 酸素同位体比( $\Delta^{17}\text{O}$ )の違いは空間(環境)の違い

# コンドルールは隕石母天体では mm未満のスケールで良く混ざっている

Acfer 094薄片:BSE画像



300μm

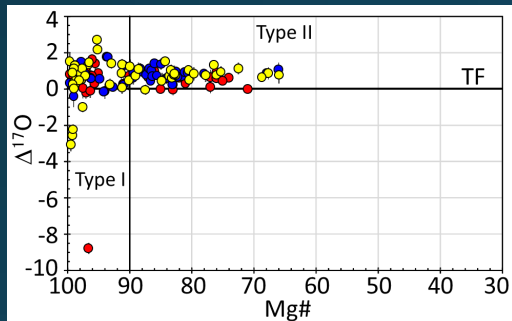
異なる環境で  
コンドルール形成  
↓  
コンドルール単体  
で原始惑星円盤  
を個々に移動  
↓  
(Pebbleの形成?)  
↓  
隕石母天体の形成

# コンドライト母天体の相対位置関係

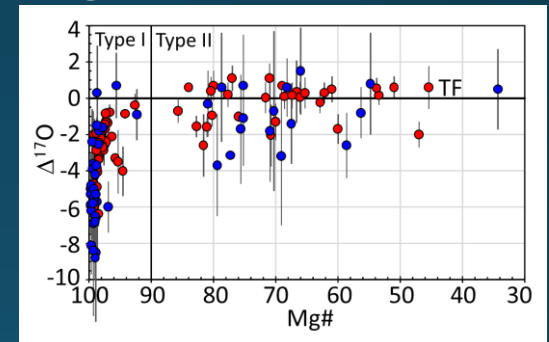
遠いほどH<sub>2</sub>O-rich, 酸化的でhigh  $\Delta^{17}\text{O}$



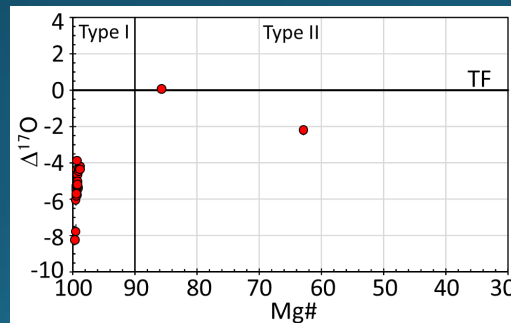
普通コンドライト(S型小惑星)



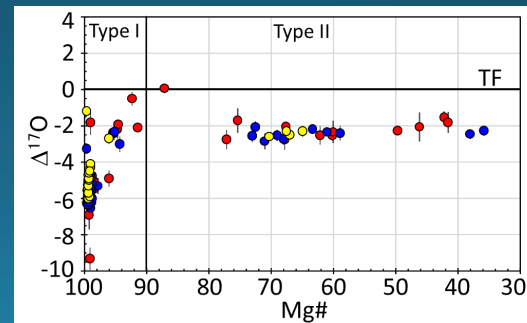
Tagish(&CR) (D型小惑星)



CVコンドライト(C型小惑星)



CO,CM,Acfer094 (C型小惑星)

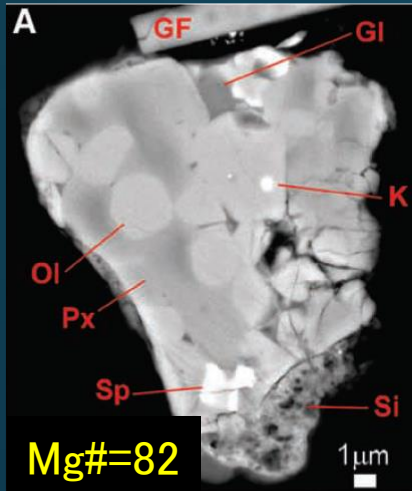


彗星コンドルール  
と

小惑星コンドルール



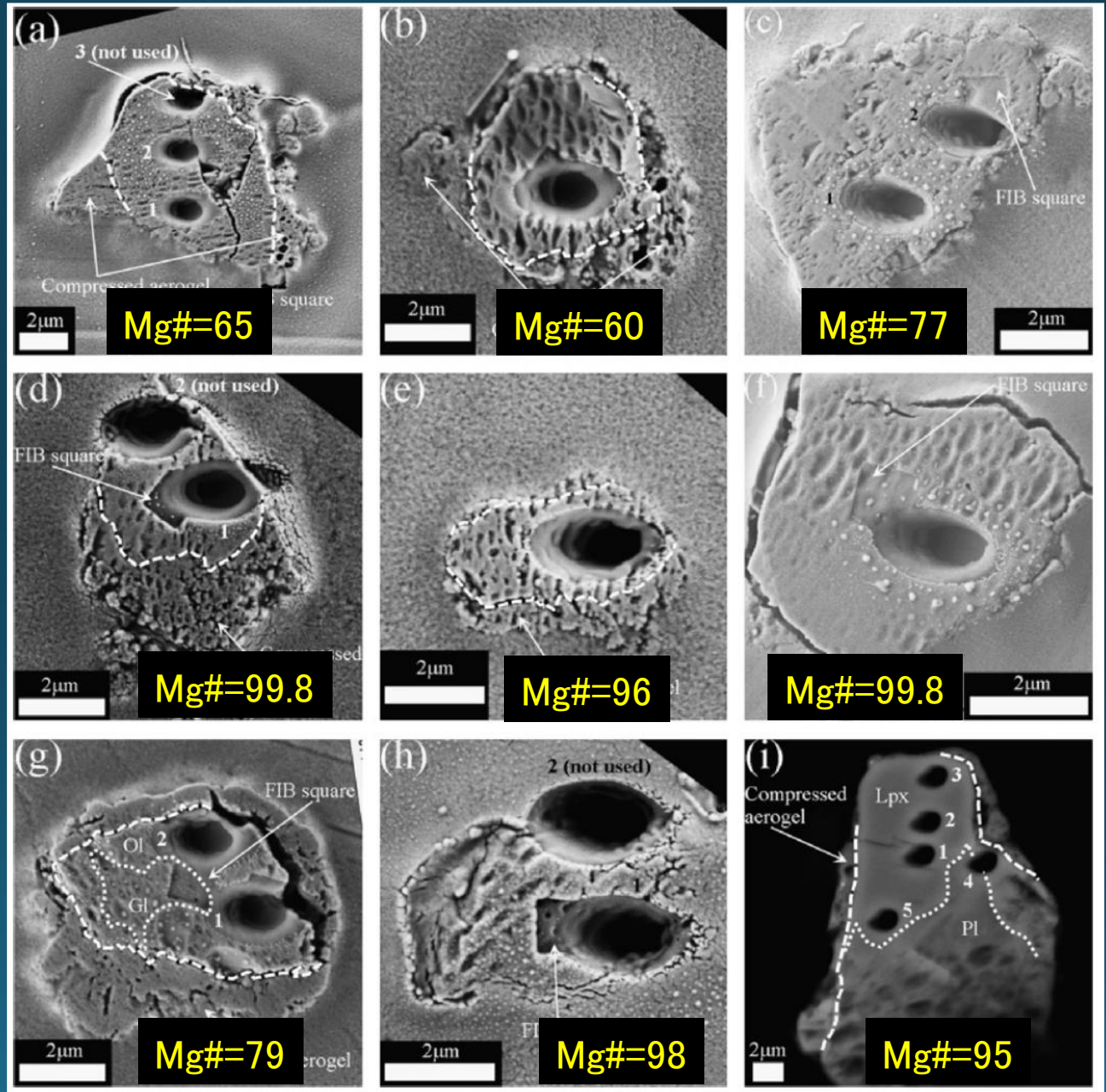
# Wild 2 silicate particles



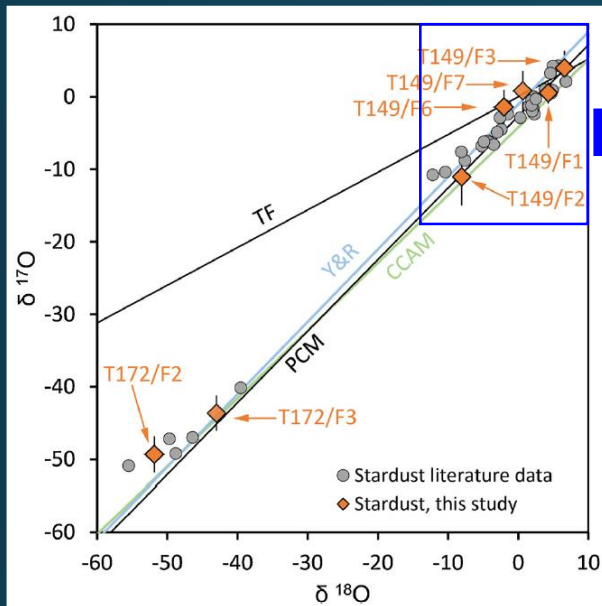
Nakamura et al. (2008) Science

Nakashima et al. (2012) EPSL

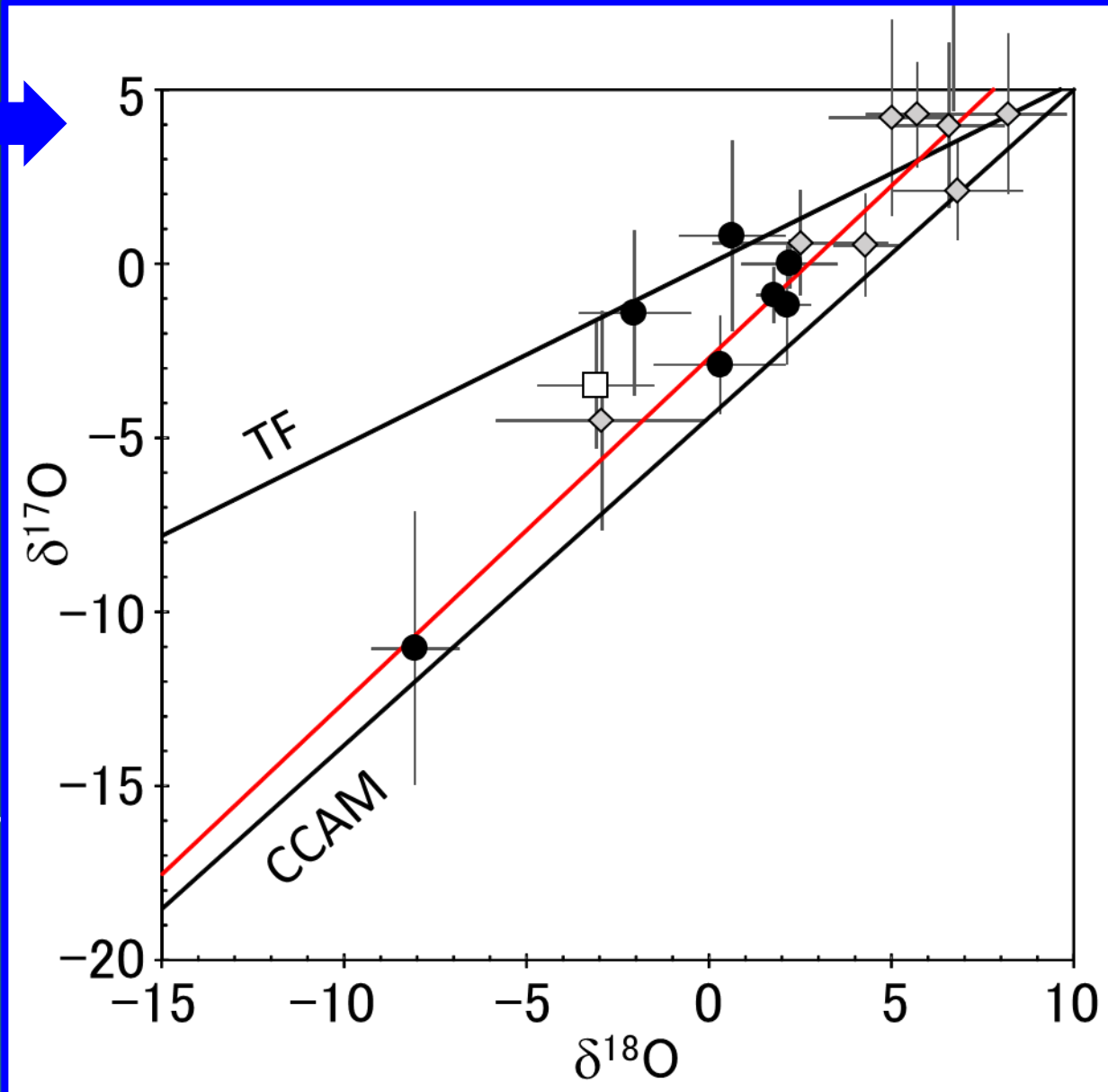
- とにかく小さい
- Mg# < 90 が多い



# Chondrules & Crystals of Comet Wild 2

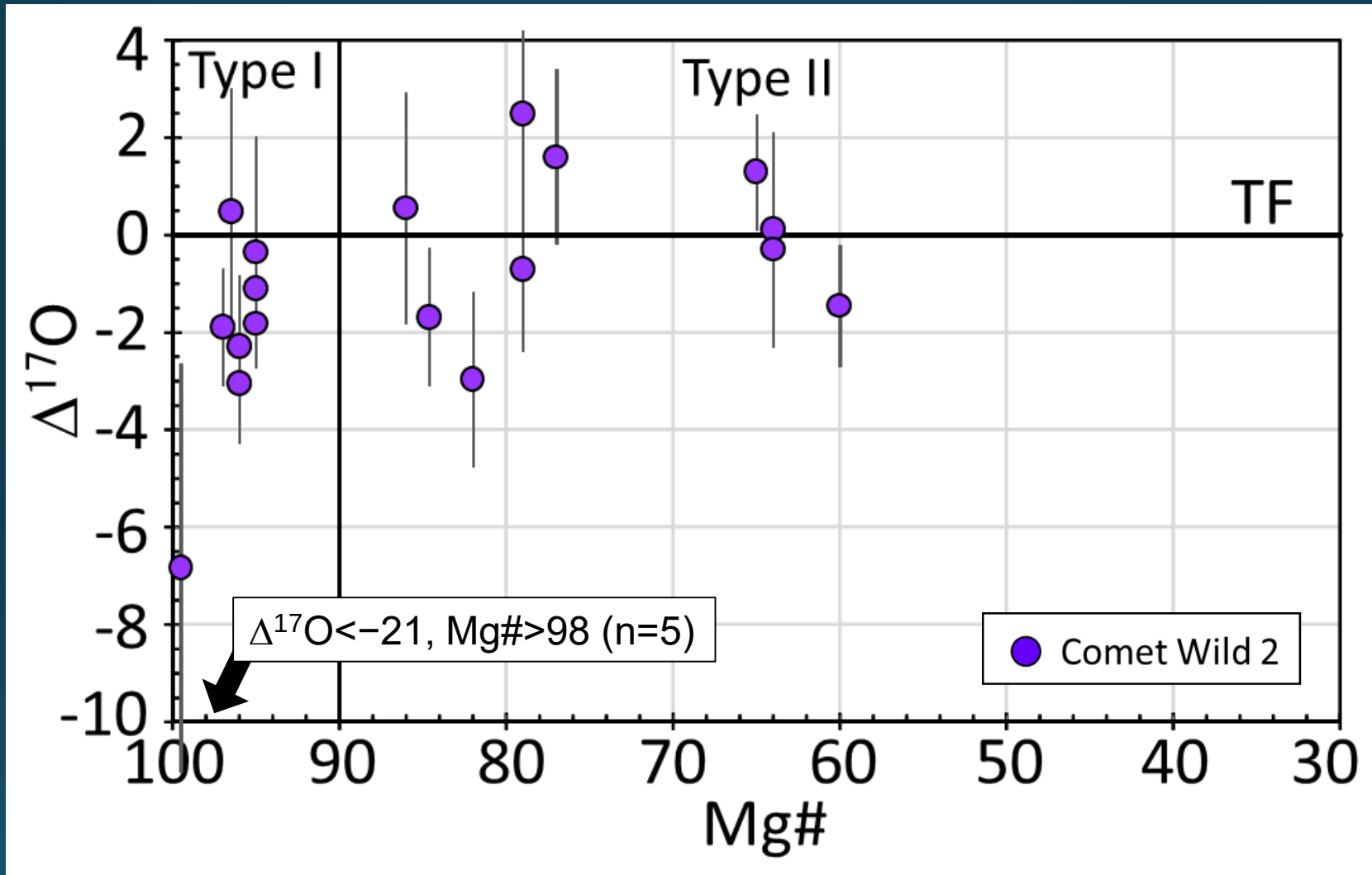


Defouilloy et al. (2017) EPSL



Data from  
McKeegan et al. (2006) Science  
Nakamura et al. (2008) Science,  
Nakashima et al. (2012) EPSL,  
Ogliore et al. (2012) ApJ,  
Joswiak et al. (2014) GCA,  
Ogliore et al. (2015) GCA,  
Defouilloy et al. (2017) EPSL

# Wild 2 Mg#- $\Delta^{17}\text{O}$

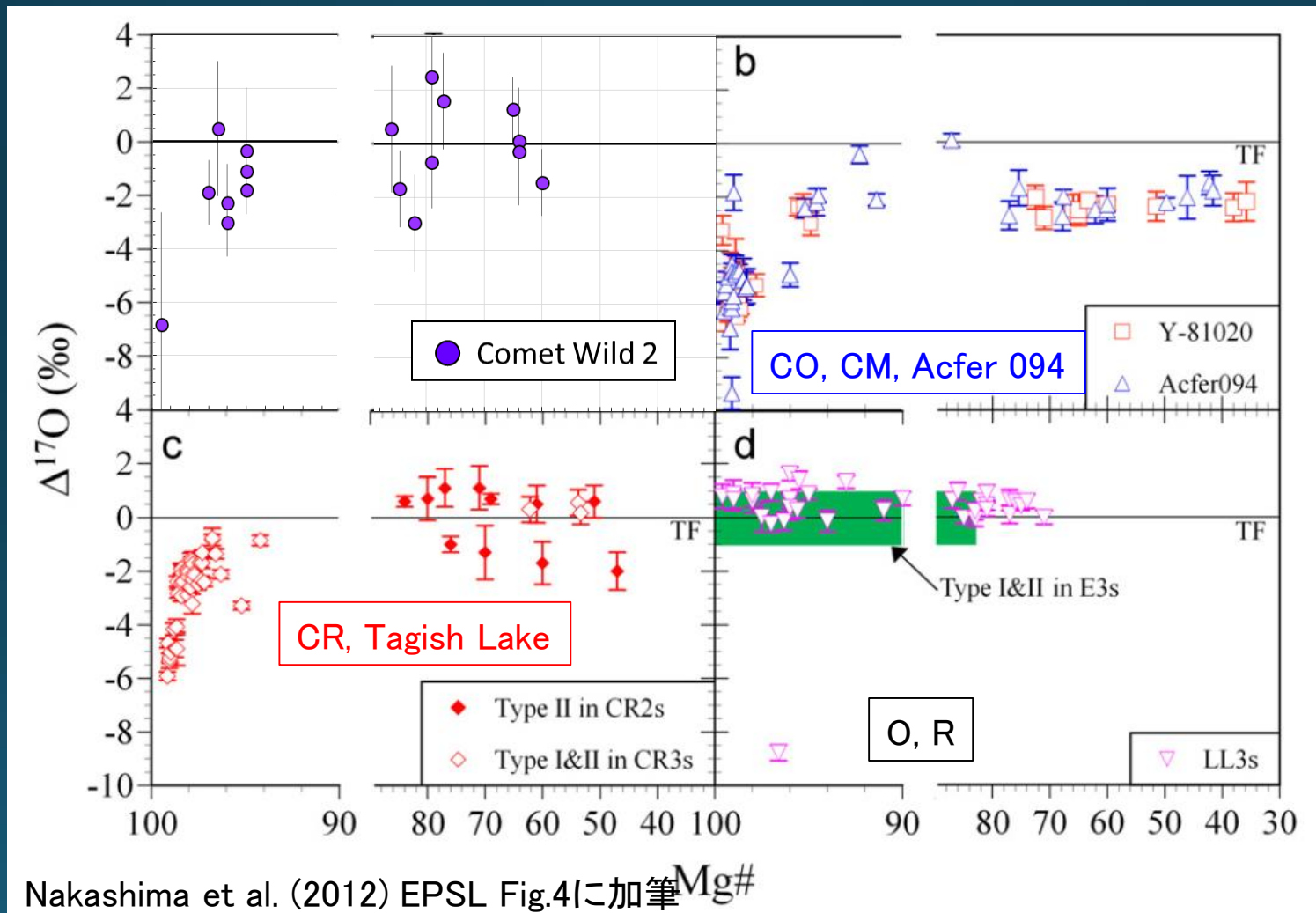


- $\Delta^{17}\text{O} \sim -2\text{‰}$ が多い
- Mg# < 90 で  $\Delta^{17}\text{O} > 0\text{‰}$ が見つかる

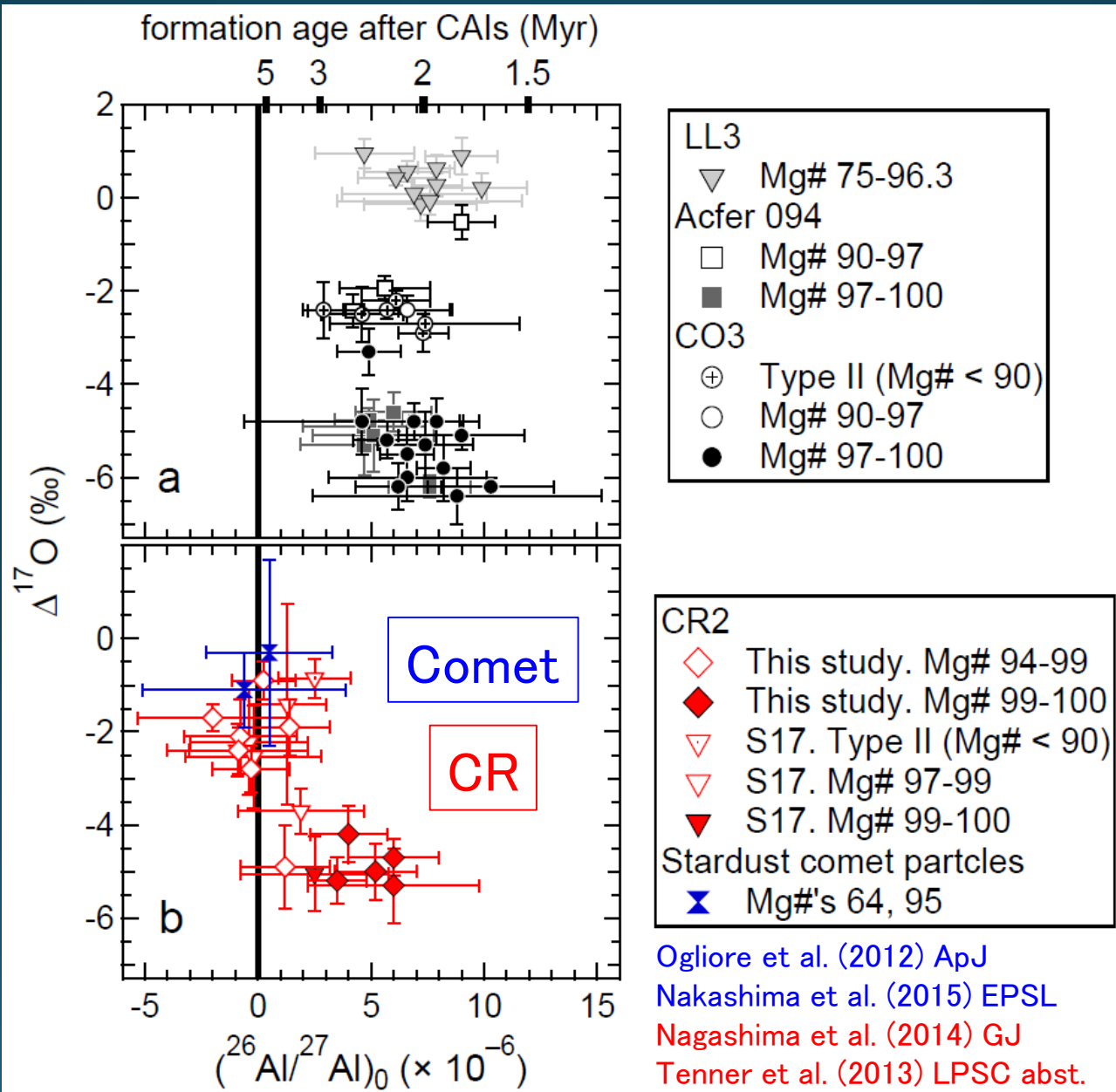
# CR chondrite, Tagish Lake (TL) との共通点

※ Wild 2 silicateはMg#<90の割合が圧倒的に高い

⇒ CR/TLよりも遠方で形成したコンドラールの割合が高い



# 彗星コンドロールの $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$ 系

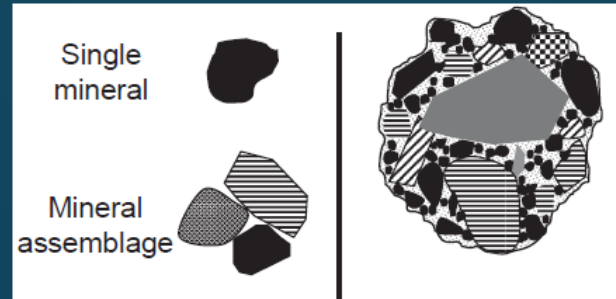




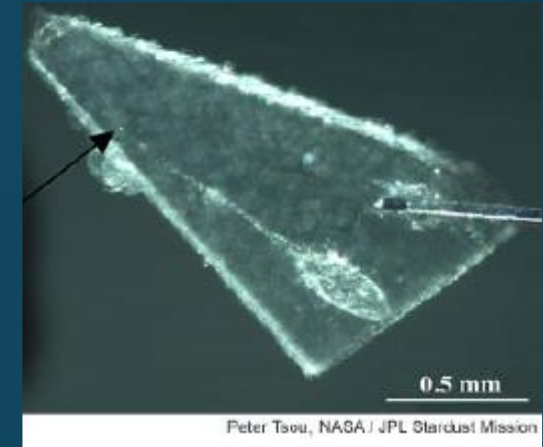
# 彗星コンドロールの輸送機構

前提: 彗星コンドロールは内惑星領域(?)から太陽系  
外縁部に運ばれた

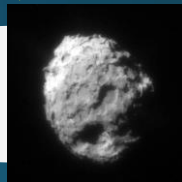
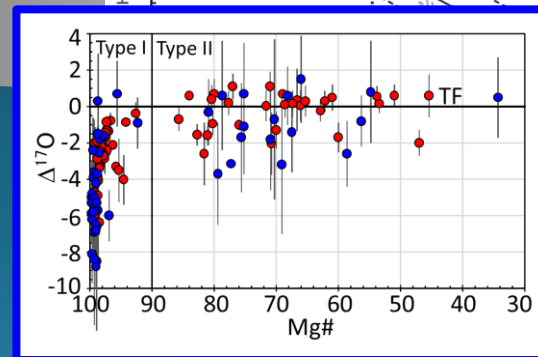
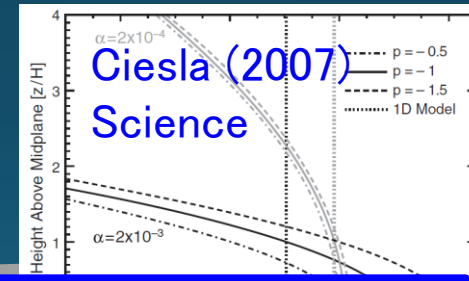
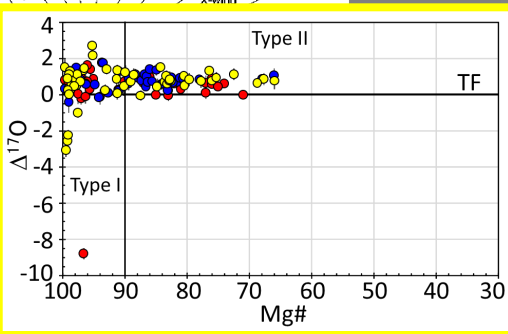
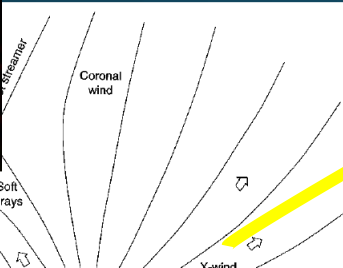
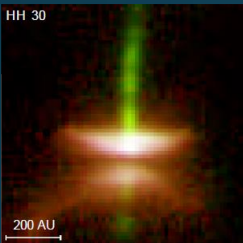
- 珪酸塩を熔融させる熱源に乏しい
- 完全な球粒では無く破片が多い



Joswiak et al. (2012) MAPS



Shu et al. (1997) Science



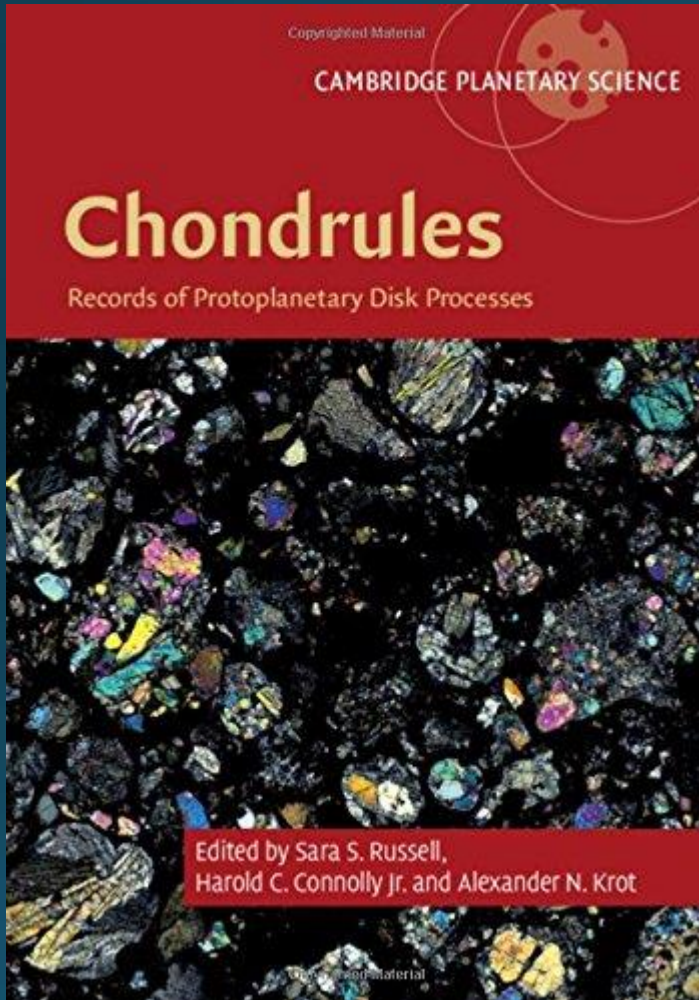


彗星コンドロールの $\Delta^{17}\text{O}-\text{Mg}\#$ の相関、 $^{26}\text{Al}$ 初生量の特徴は  
CRコンドライトやTagish Lake隕石のコンドロールに似る

“多くは太陽から遠方で形成したコンドロール”

彗星コンドロールは  
原始惑星円盤上空を飛んで行かずに  
原始惑星円盤内を拡散して移動した

# この夏 出版予定



## Chondrules

Records of Protoplanetary Disk Processes  
(Cambridge Univ. Press)

## Chapter 8 (pp.196–246)

Oxygen isotope characteristics of chondrules  
from recent studies by SIMS

Tenner T. J., Ushikubo T., Nakashima D.,  
Schrader D. L., Weisberg M. K., Kimura M.,  
and Kita N. T.