

晩期型星から初期太陽系までの星周アルミナ形成
・進化史解明に向けた

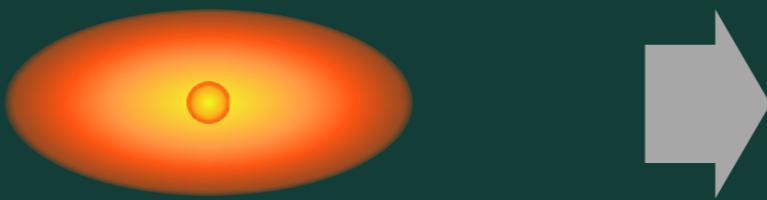
非平衡普通コンドライト中のアルミナ粒子分析

瀧川 晶

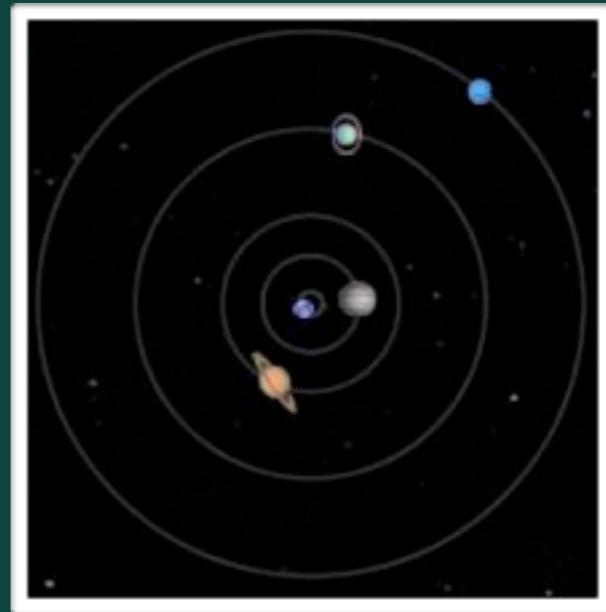
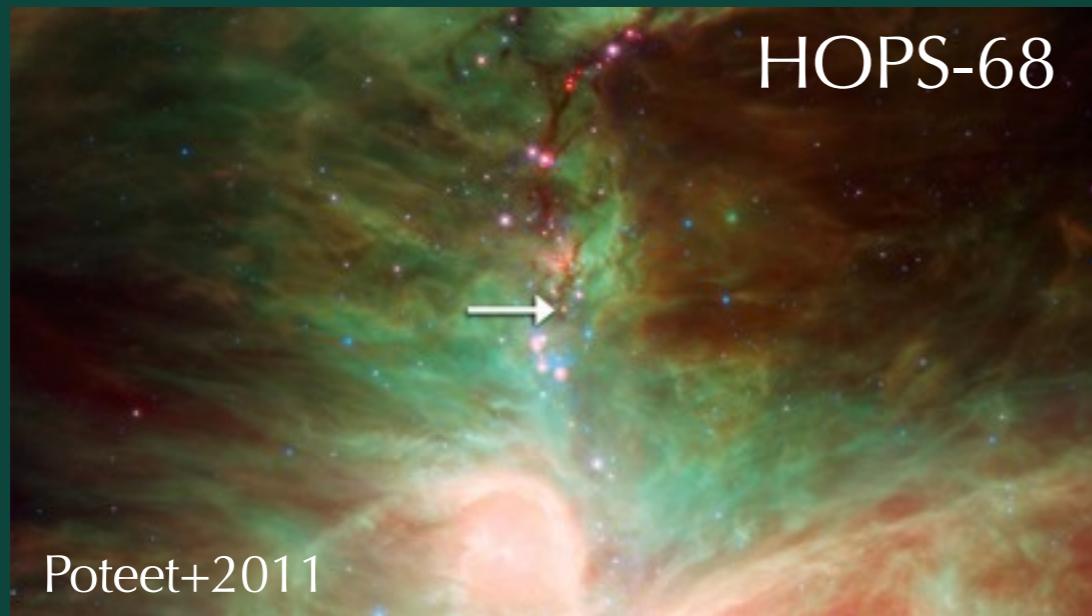
東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

太陽系の”元年”

原始太陽系円盤



太陽系



■ 恒星系の進化

原始星形成 → 原始太陽系円盤の形成 → 微惑星・隕石母天体の形成 → 惑星形成

■ 太陽系最古の固体物質形成 (CAI)からの太陽系

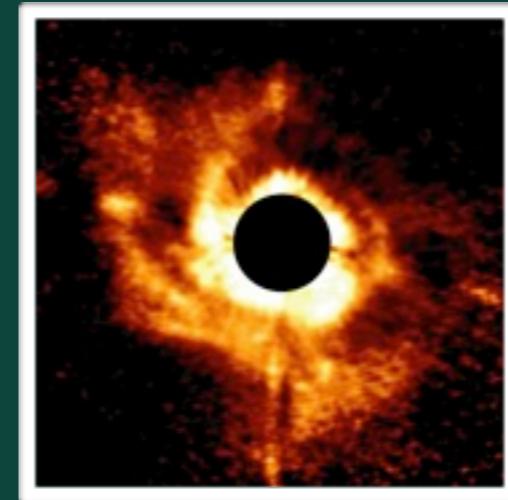
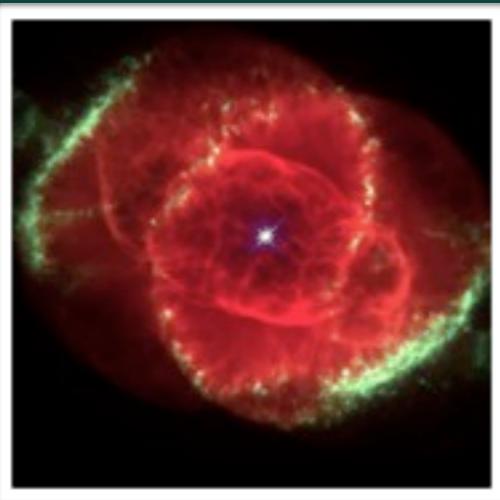
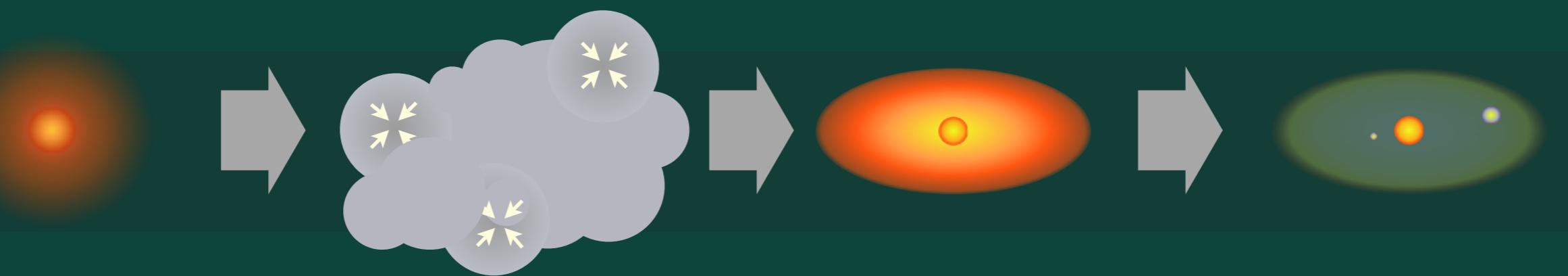
“紀元前”太陽系

晚期型星

分子雲

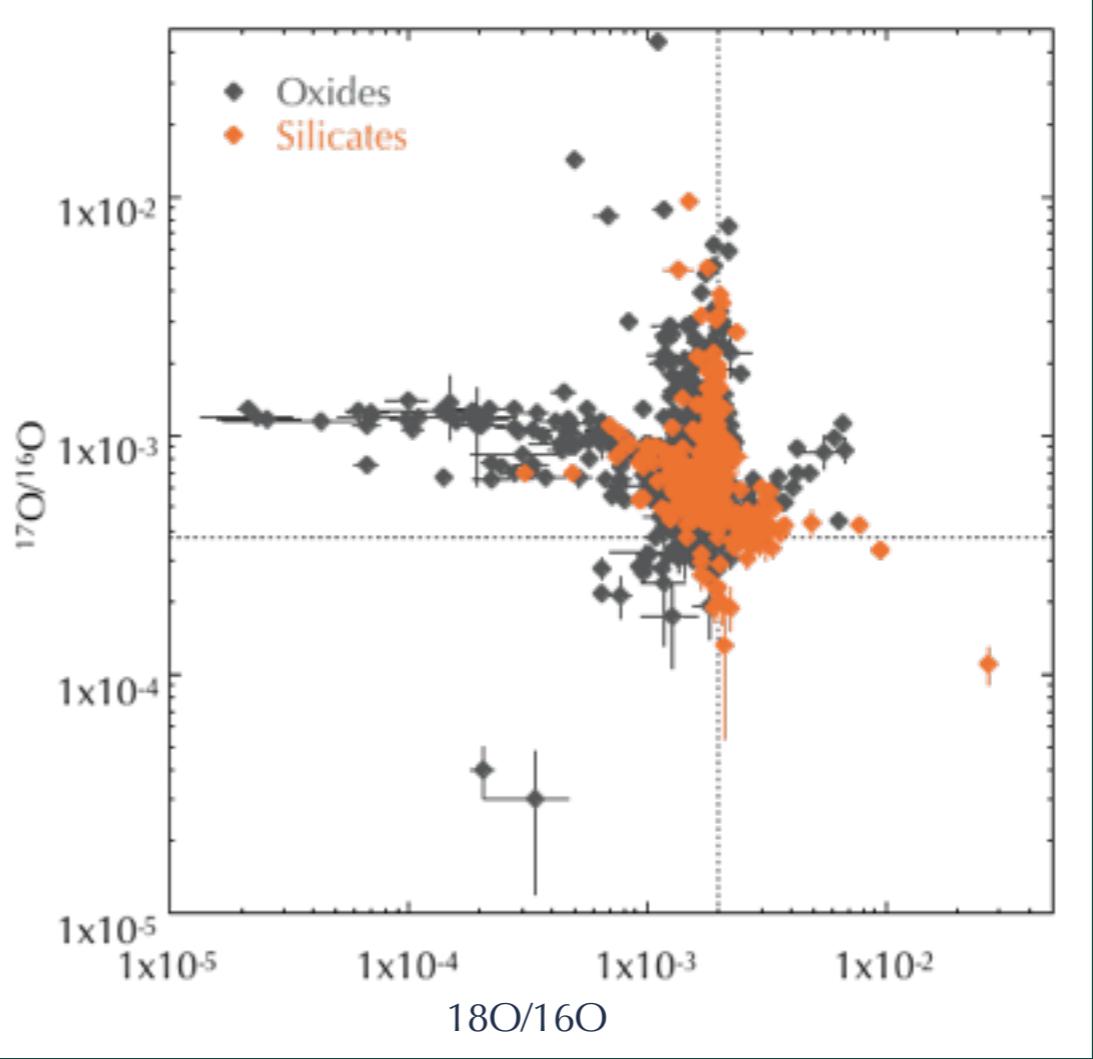
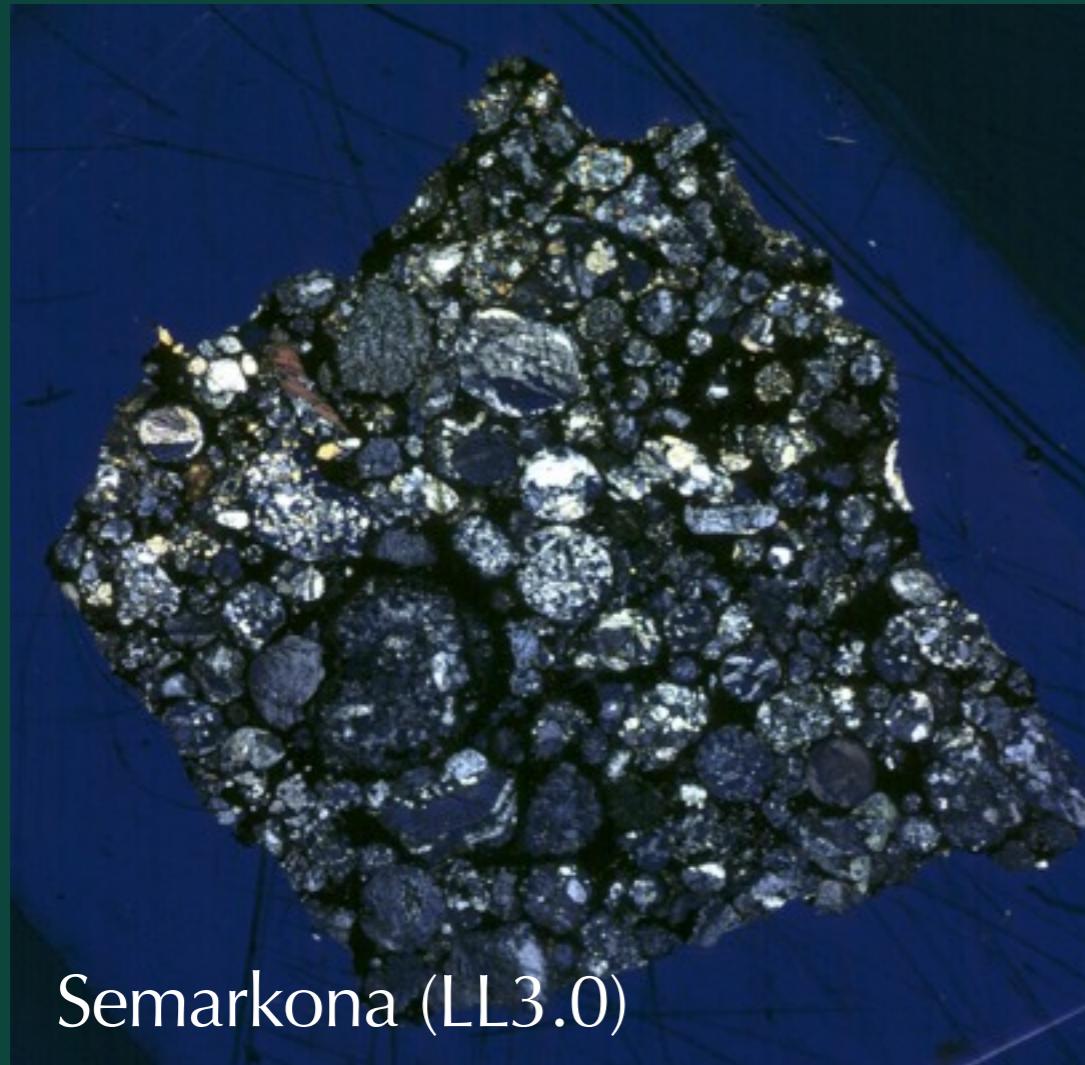
原始太陽系円盤

太陽系



プレソーラー粒子

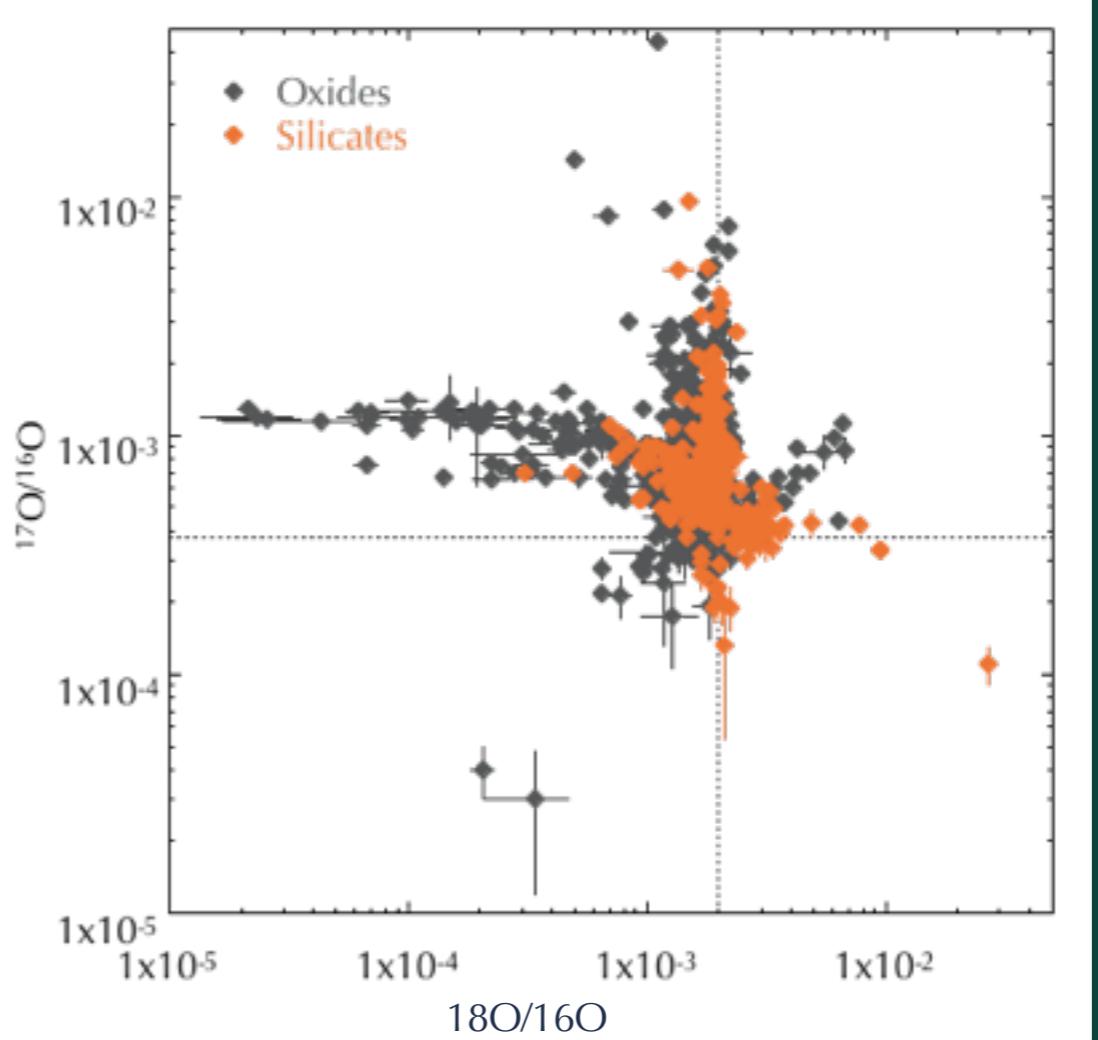
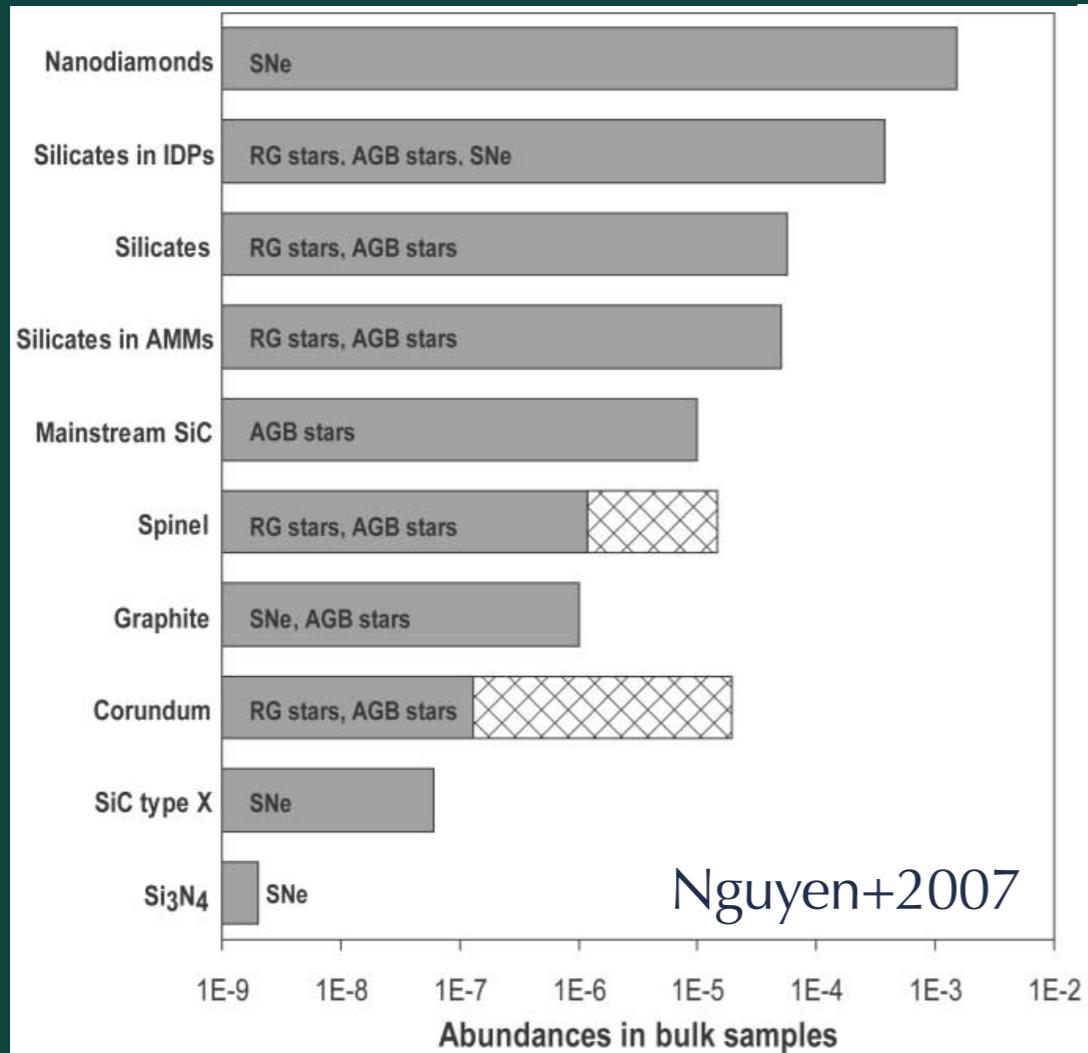
early solar system



- 大きな同位体異常(e.g., $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{solar}}=0.037\%$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{solar}}=0.2\%$)
- コンドライト中に<0.1%で存在

プレソーラー粒子

early solar
system



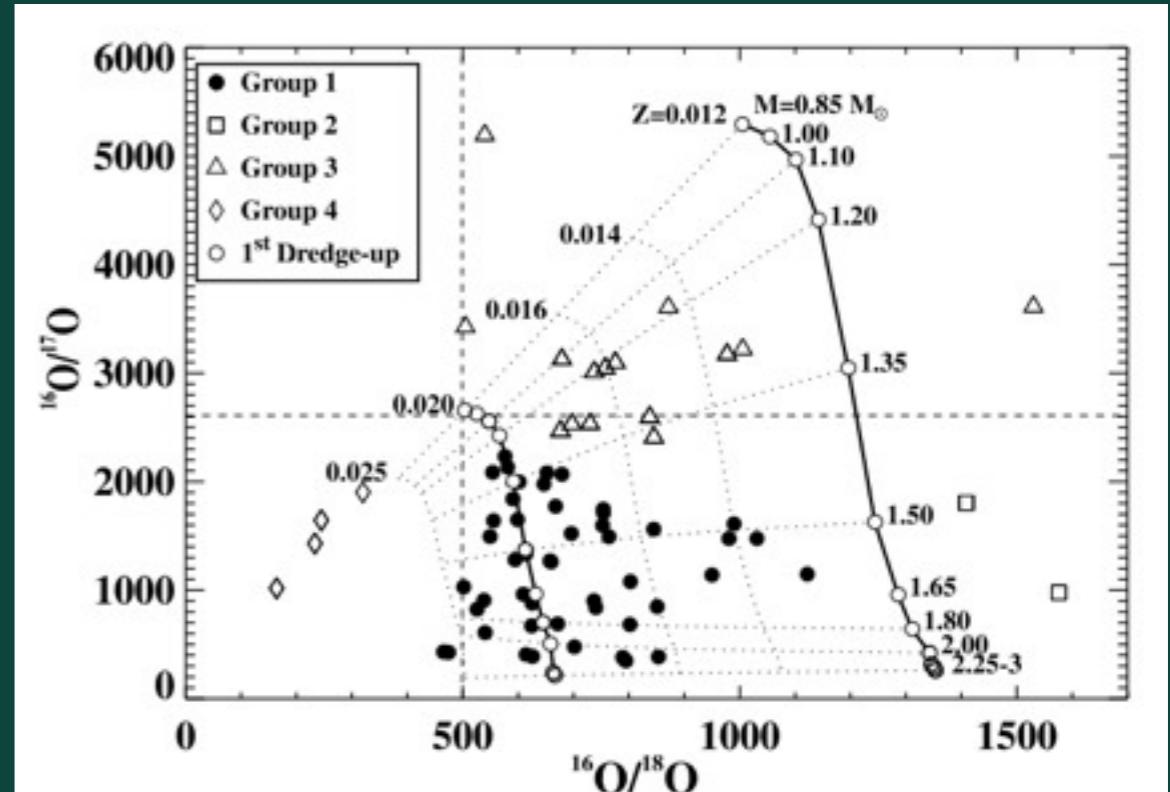
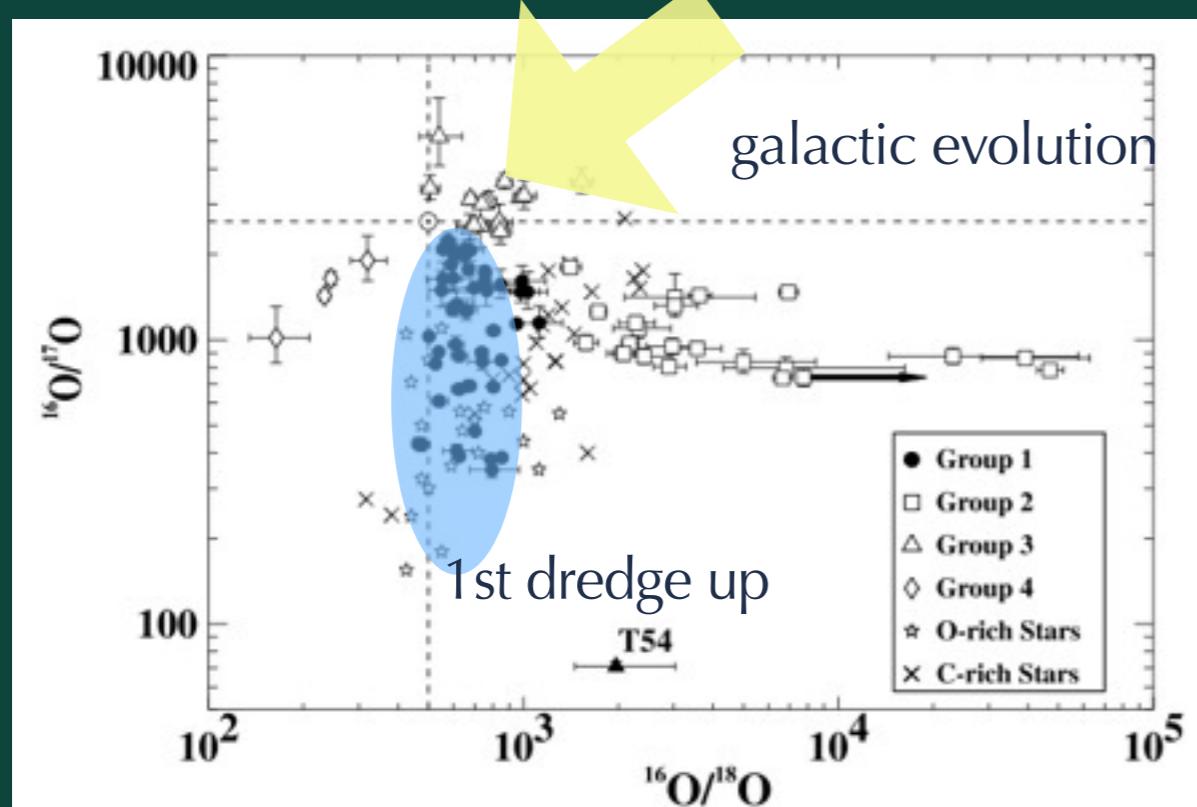
presolar database at Univ. Washington in St. Louis

- 大きな同位体異常(e.g., $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{solar}}=0.037\%$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{solar}}=0.2\%$)
- コンドライト中に<0.1%で存在

プレソーラー粒子

evolved stars

16O/17Oは星のMassに依存

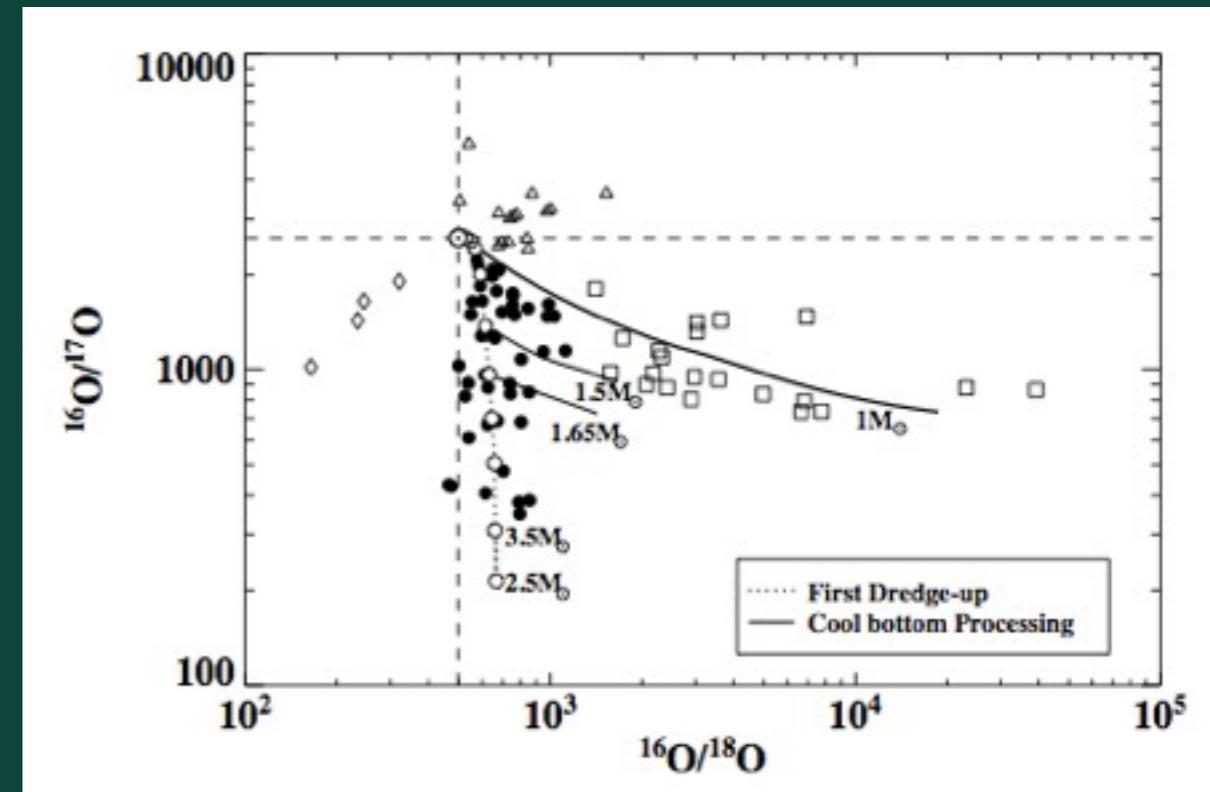
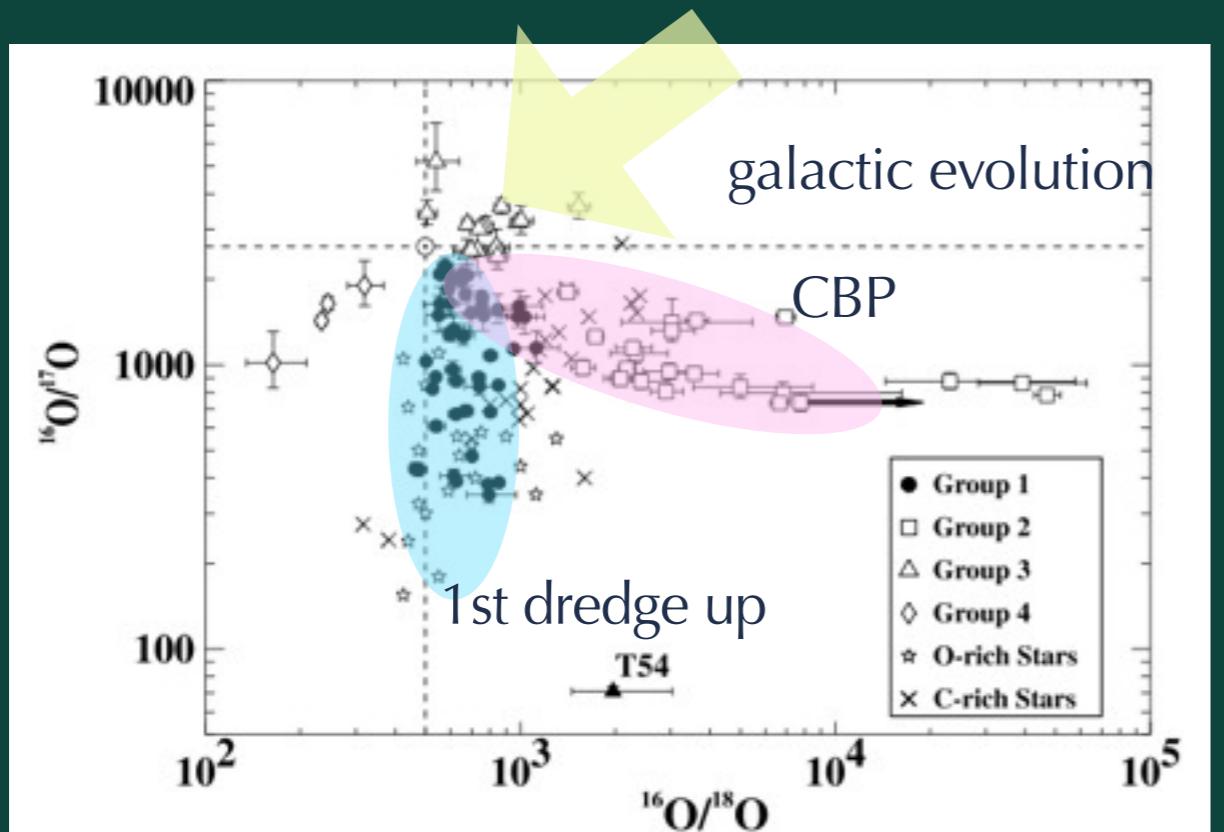


Nittler+1997 a, b

- group1: core H-burning最後のfirst dredge-up
- group3: low mass & low metallicity RedGiant

プレソーラー粒子

evolved stars

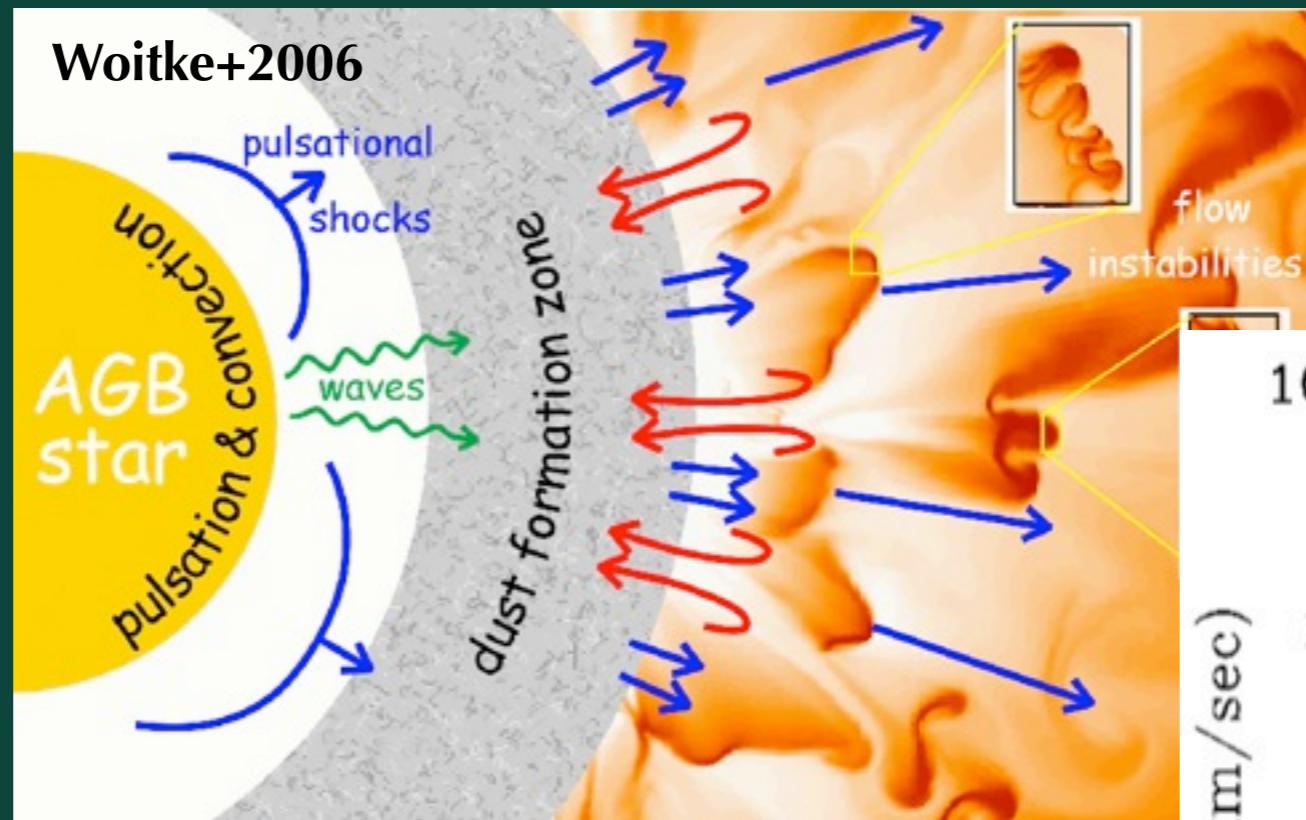


Nittler+1997 a, b

- group1: core H-burning最後のfirst dredge-up
- group3: low mass & low metallicity RedGiant
- group2: cool bottom processing(low mass AGB star)

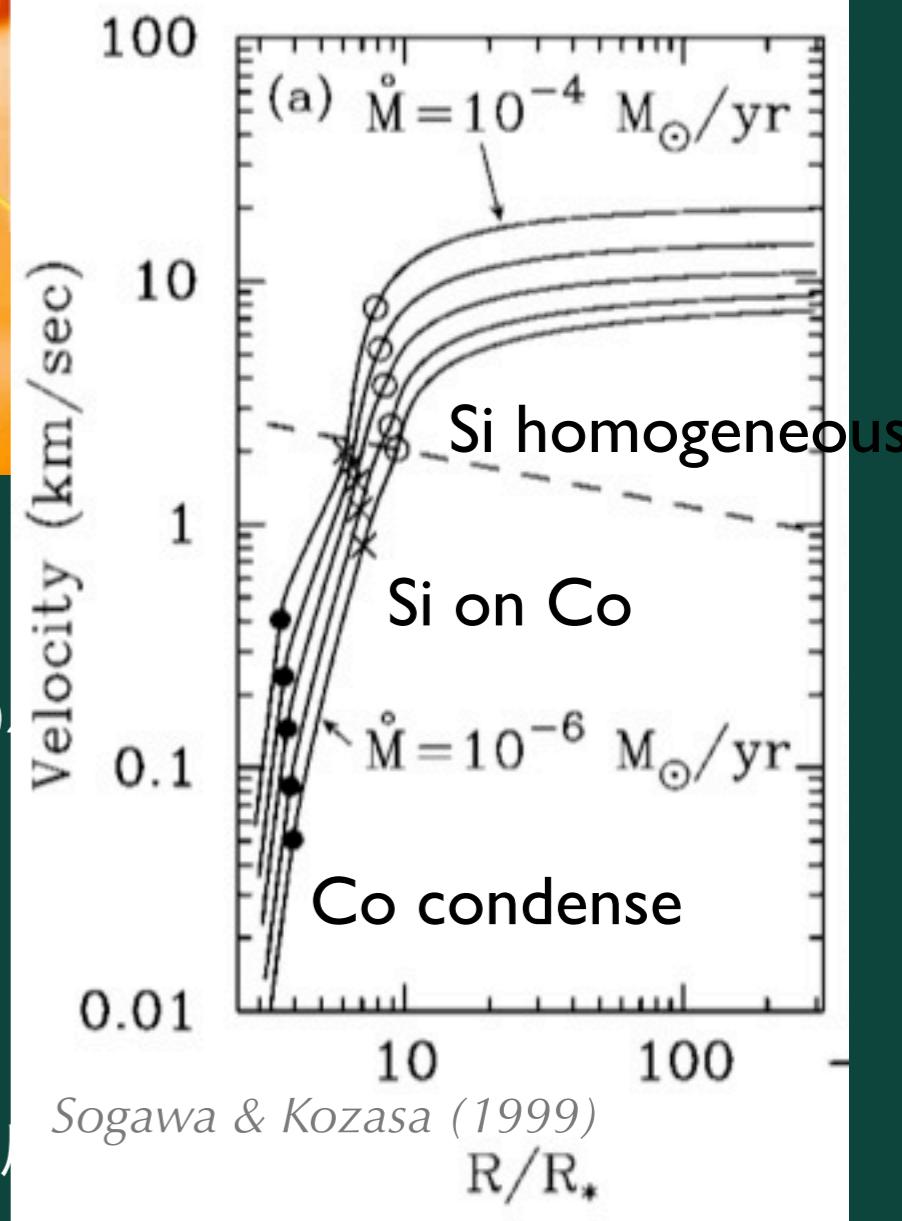
質量放出風でのダスト形成

晚期型星



□ Dust-driven Wind (e.g., Sedlmayr & Dominik 1997)

- a) 対流, 脈動による衝撃波伝搬 → 高密度領域形成
- b) 初生ダスト形成・ダスト成長, 周囲ガスとの化学反応
- c) 辐射圧を受けてダスト加速, 摩擦によりガス加速
- d) ガスの冷却によるダスト形成・成長, 周囲ガスとの化学反応



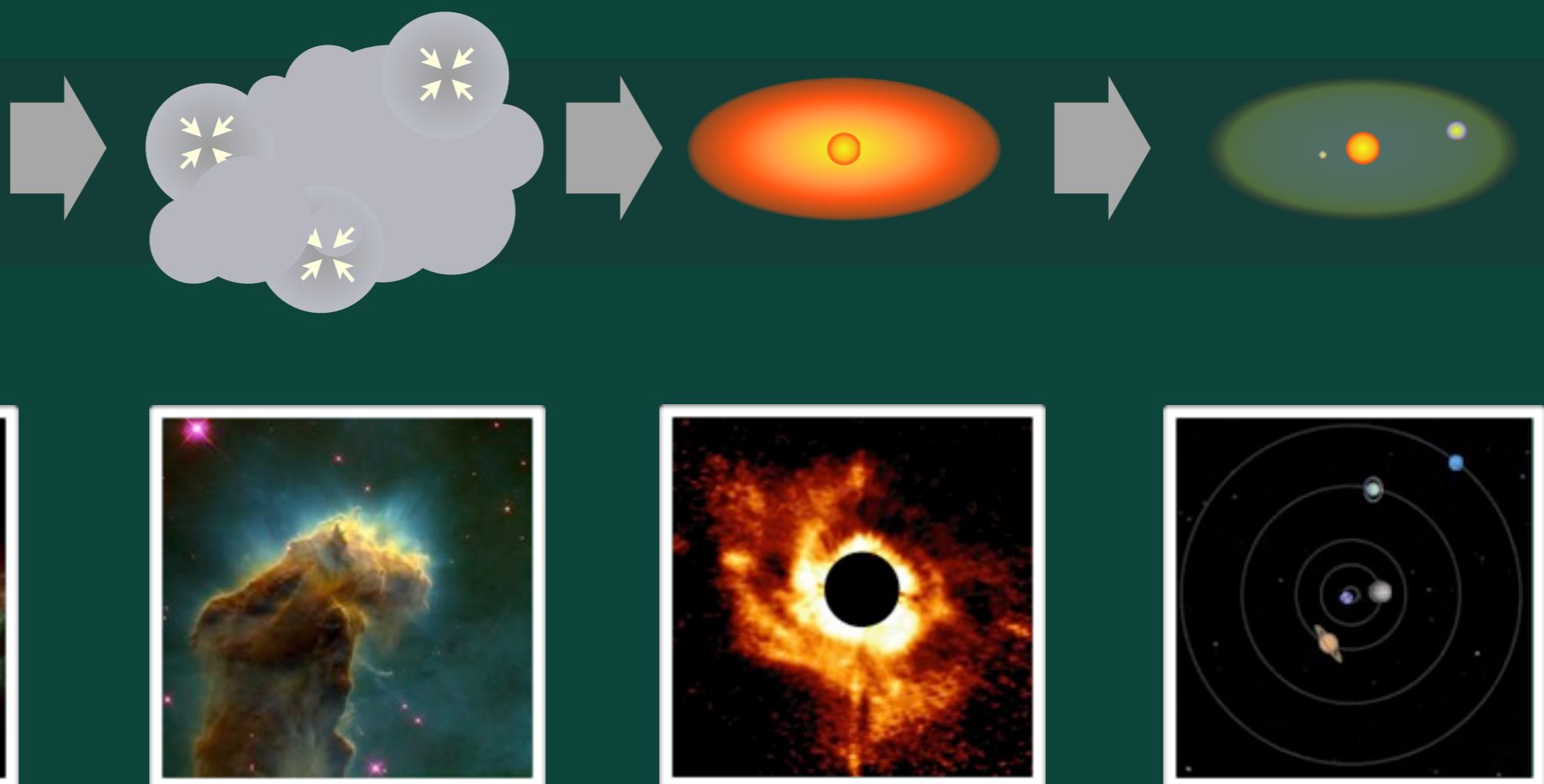
“紀元前”太陽系

晚期型星

分子雲

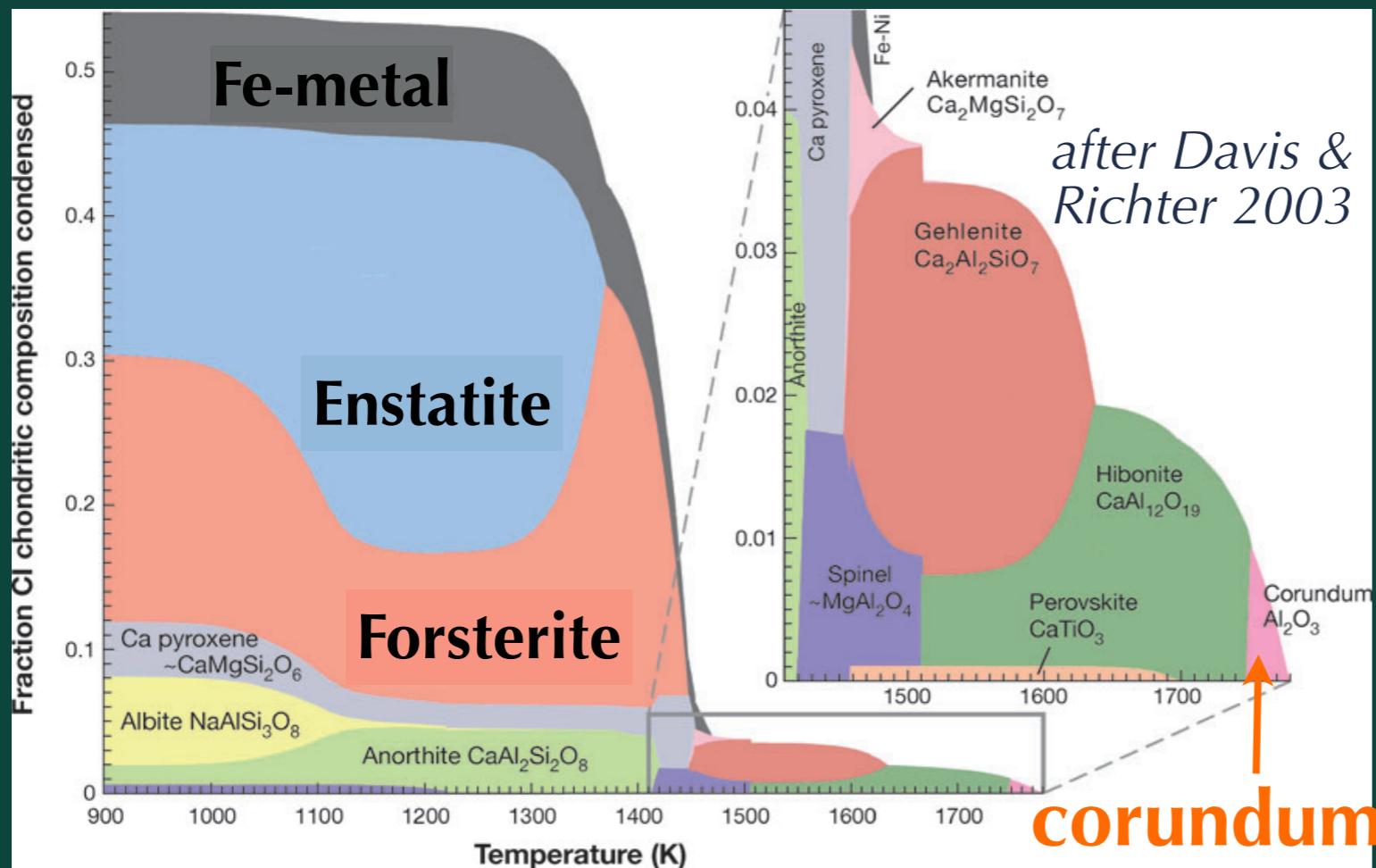
原始太陽系円盤

太陽系

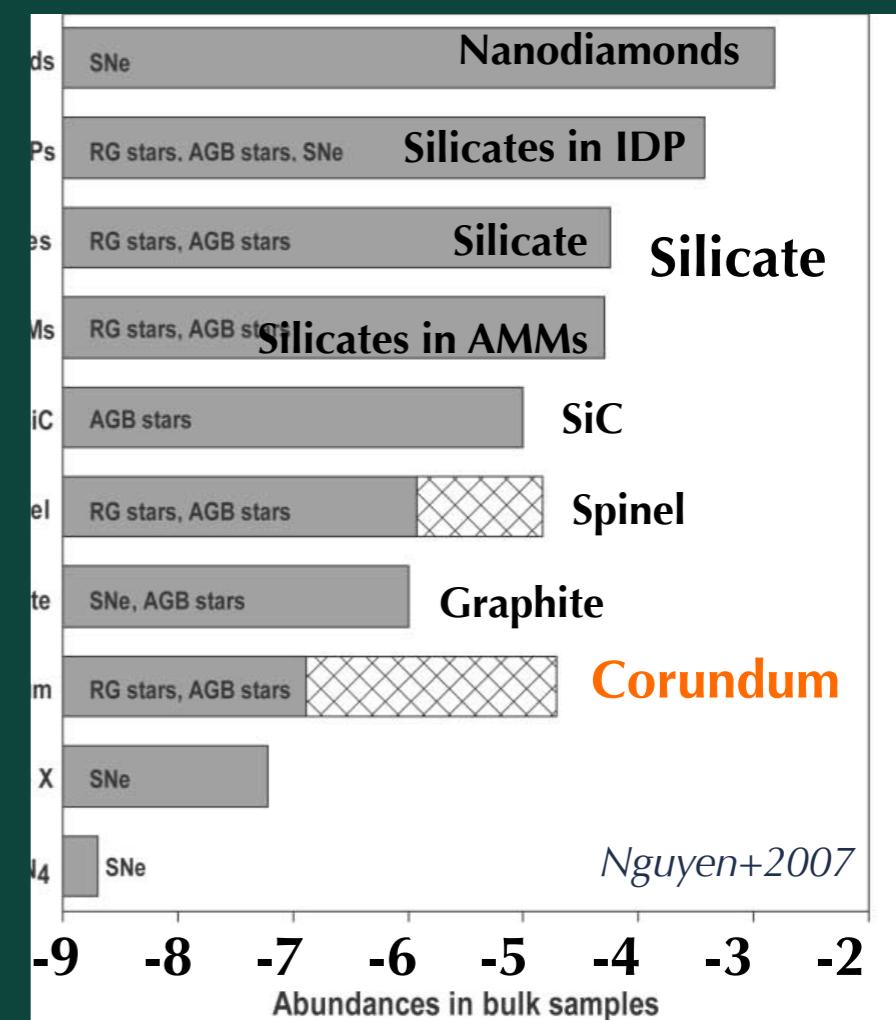


■ 赤外観測可能でプレソーラー粒子としても存在する鉱物が重要

プレソーラー粒子として解析可能



corundum

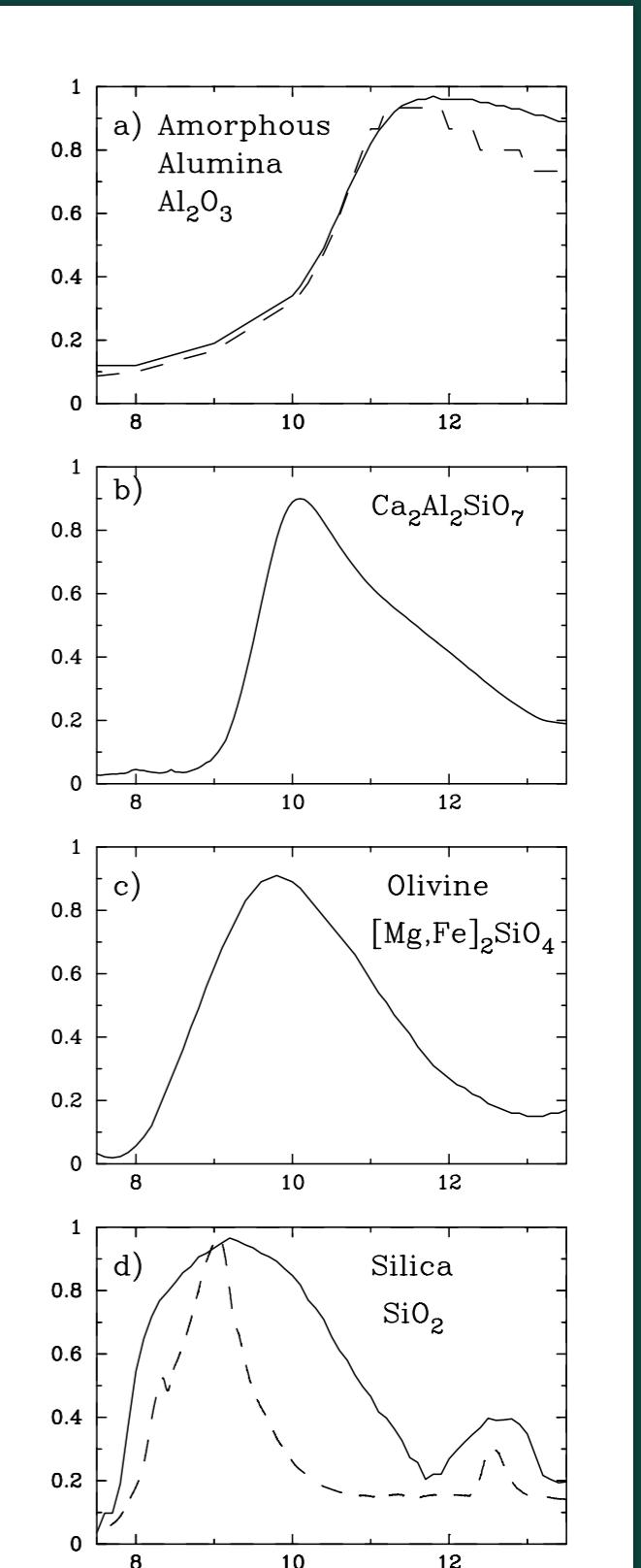
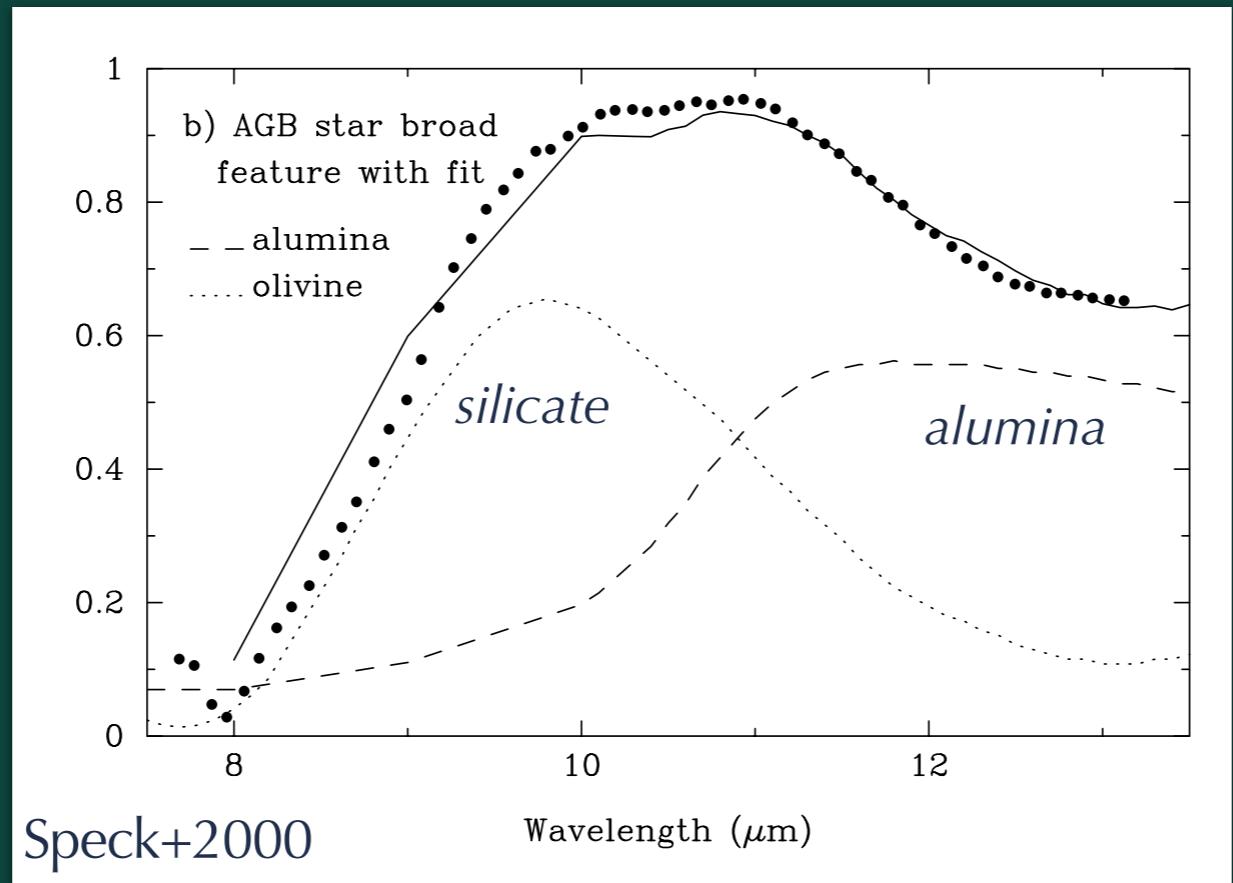


- 存在度が高い
- 酸に難溶（隕石中から抽出可能）

質量放出風でのダスト形成

晚期型星

evolved
stars



■ 9.7- μm フィーチャー : Si-O

■ ~12- μm のブロードピーク : Al-O

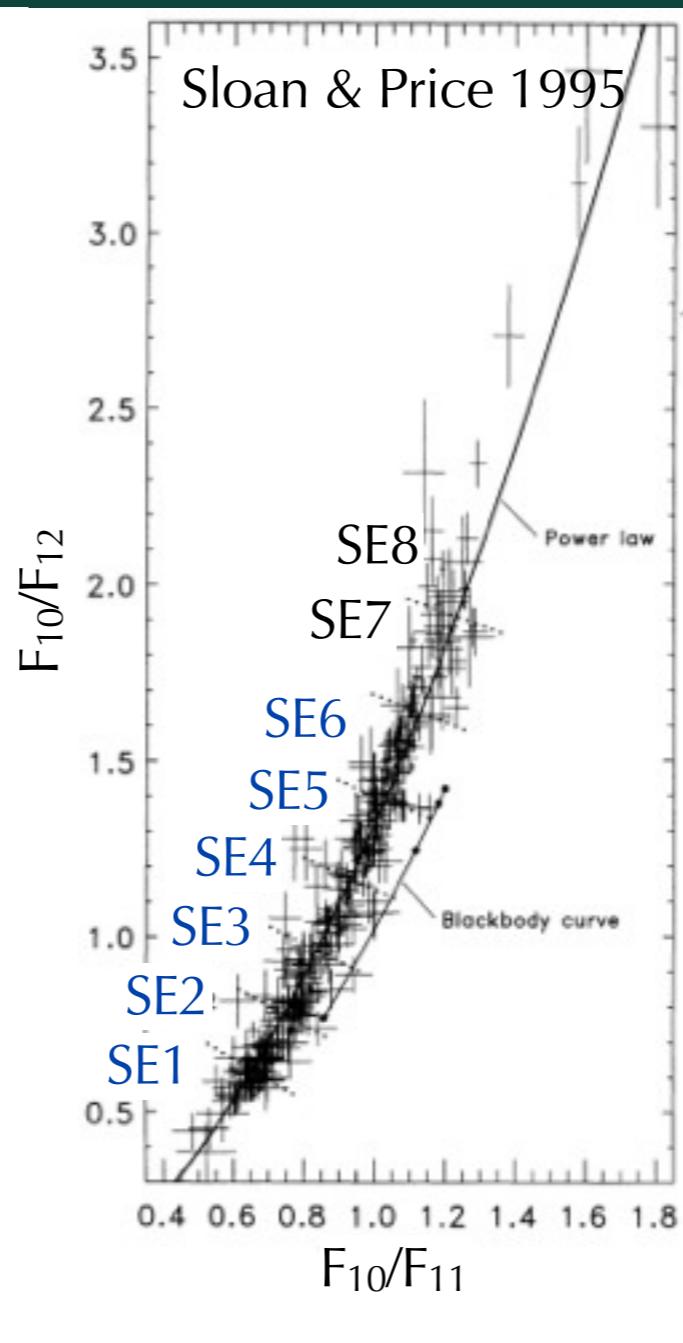
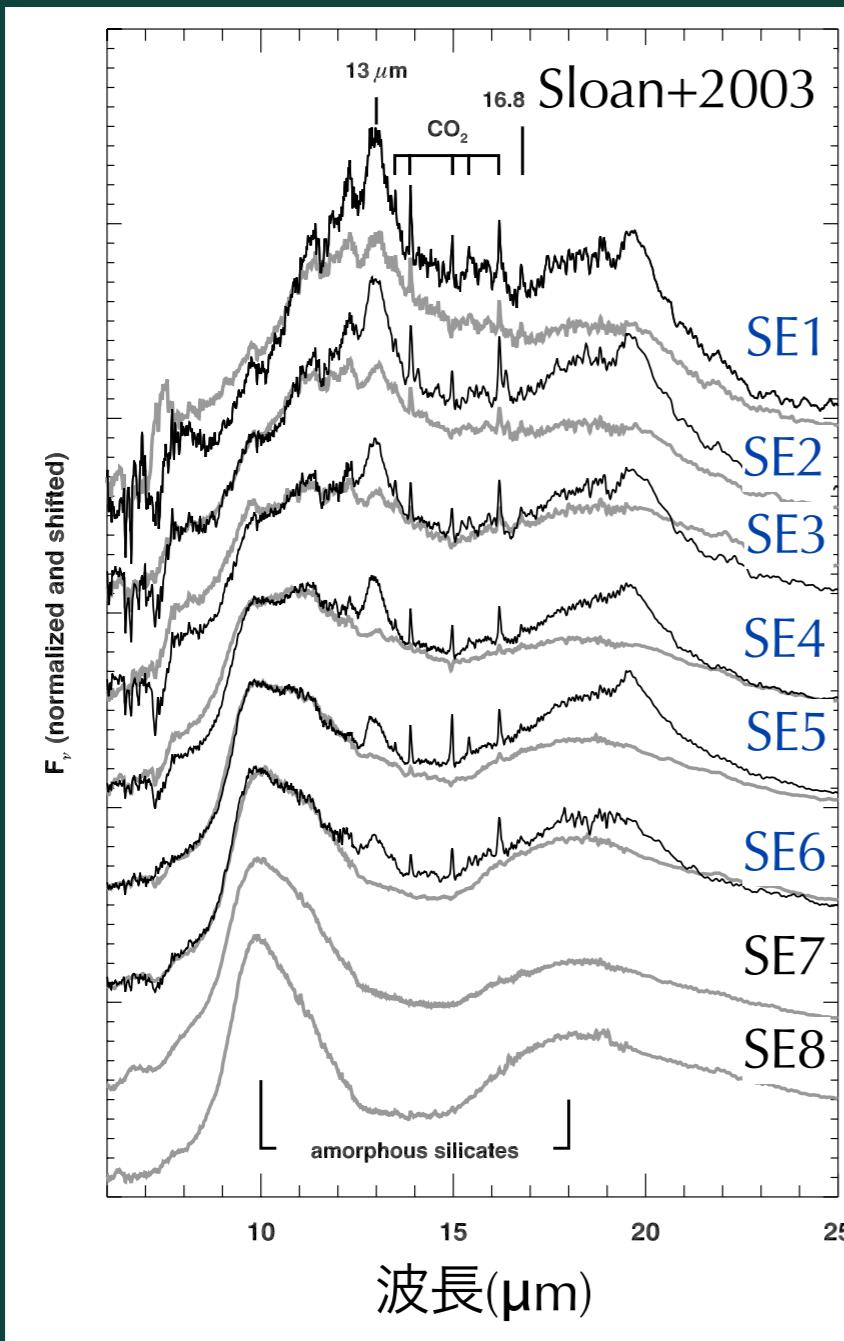
e.g., Onaka+1989, Sloan and Price 1995, Sloan+1998, 2003,
Miyata+2000, Speck+2000, DePew+2006

O-rich AGB星の赤外観測

evolved
stars

■ 酸化的晚期型星

: 75-80%の半規則型変光星, 20-25%のミラ型変光星から13μmピーク



星周ダスト

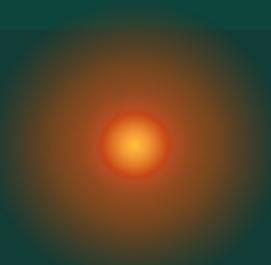
| | 存在量 | 分析可能 | 観測可能 |
|------------------------------------|-----|------|------|
| Al₂O₃ | ○ | ○ | ○ |
| その他酸化物 | ○ | ○ | ○ |
| ケイ酸塩 | ○ | △ | ○ |
| 金属鉄 | ○ | × | × |
| 揮発性ダスト | ○ | × | ○ |

■ アルミナ(Al₂O₃)

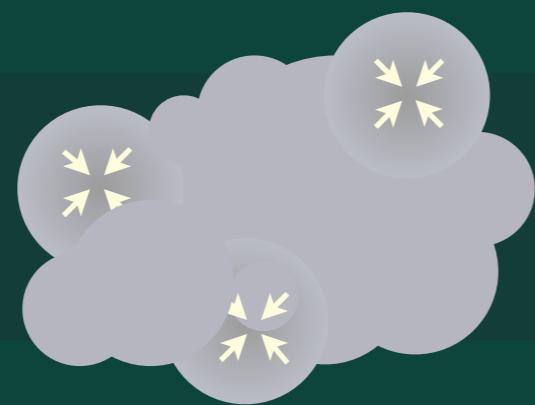
: 最初の凝縮物, 赤外観測可能, プレソーラーアルミナ

“紀元前”太陽系

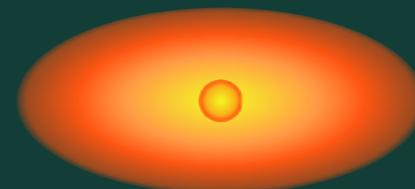
晚期型星



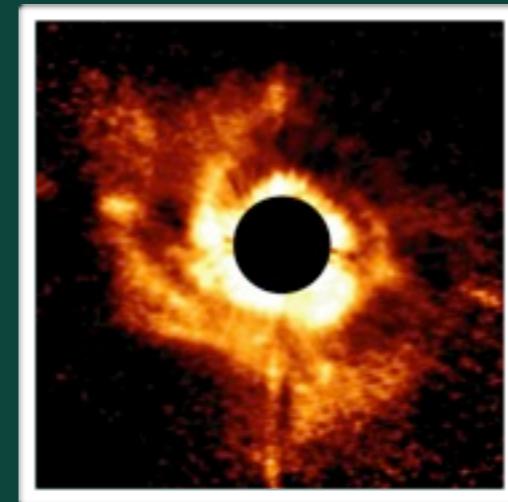
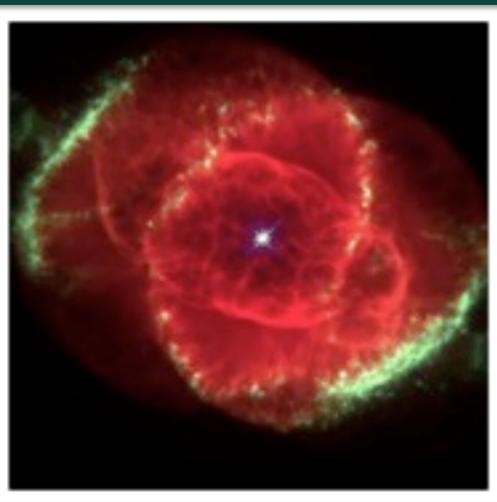
分子雲



原始太陽系円盤



太陽系



星間空間・分子雲

ISM & Molecular
cloud



II 衝撃波加熱・破碎・sputtering

- heating in shock wave <150-350K (Jäger et al. 2003)
- grain-grain collision (>20km/s)
- 衝撃波中のsputtering (H^+ , He^+)

II ダストのlifetime

- ケイ酸塩のlifetime ~0.4Gyr < ダスト供給 t ~2.5Gyr

(Jones et al. 1994, 1996, Tielens 1990)

↔ ダスト破壊の効率, SN爆発エネルギーのISMへの供給効率などの不確定さ

(Jones & Nuth 2011)

- アルミナのlifetime (Wang et al. 1998)

Xe⁺によるコランダムの非晶質化照射量: SiO₂の100倍, フォルステライトの10倍

■ プレソーラーアルミナ = “Stardust”

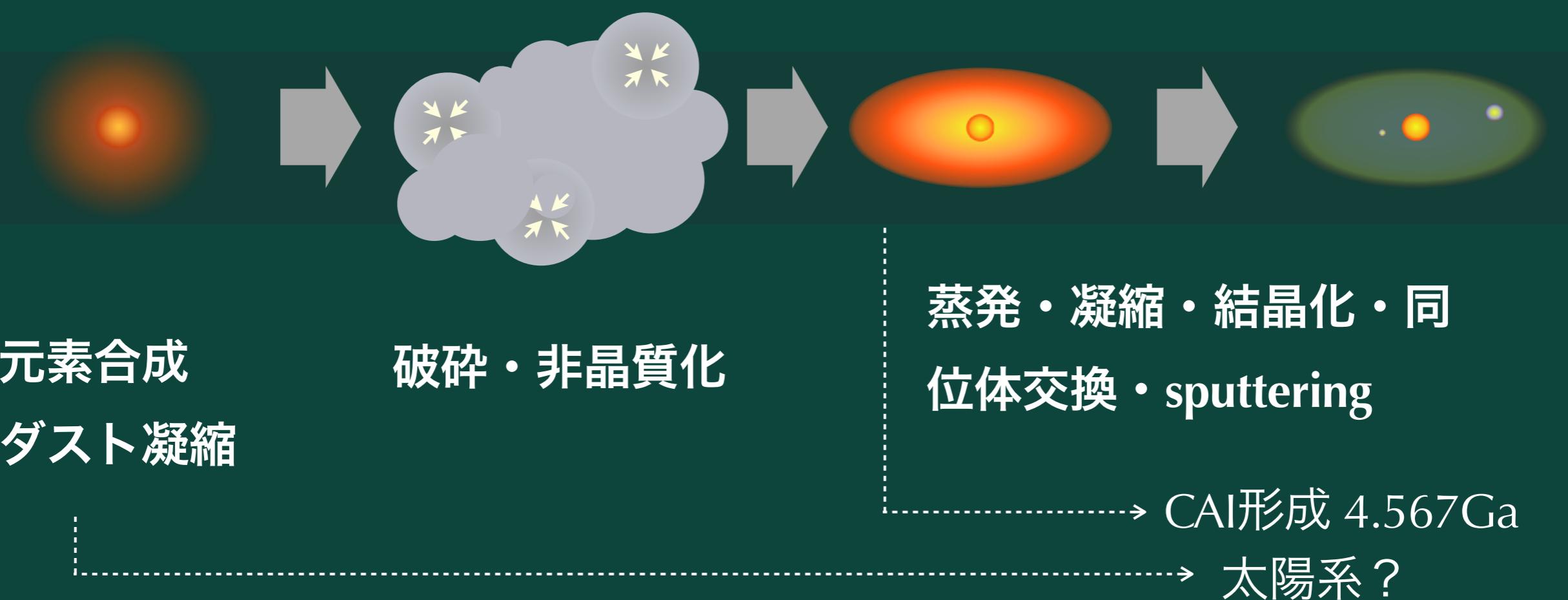
“紀元前”太陽系

晚期型星

分子雲

原始太陽系円盤

太陽系



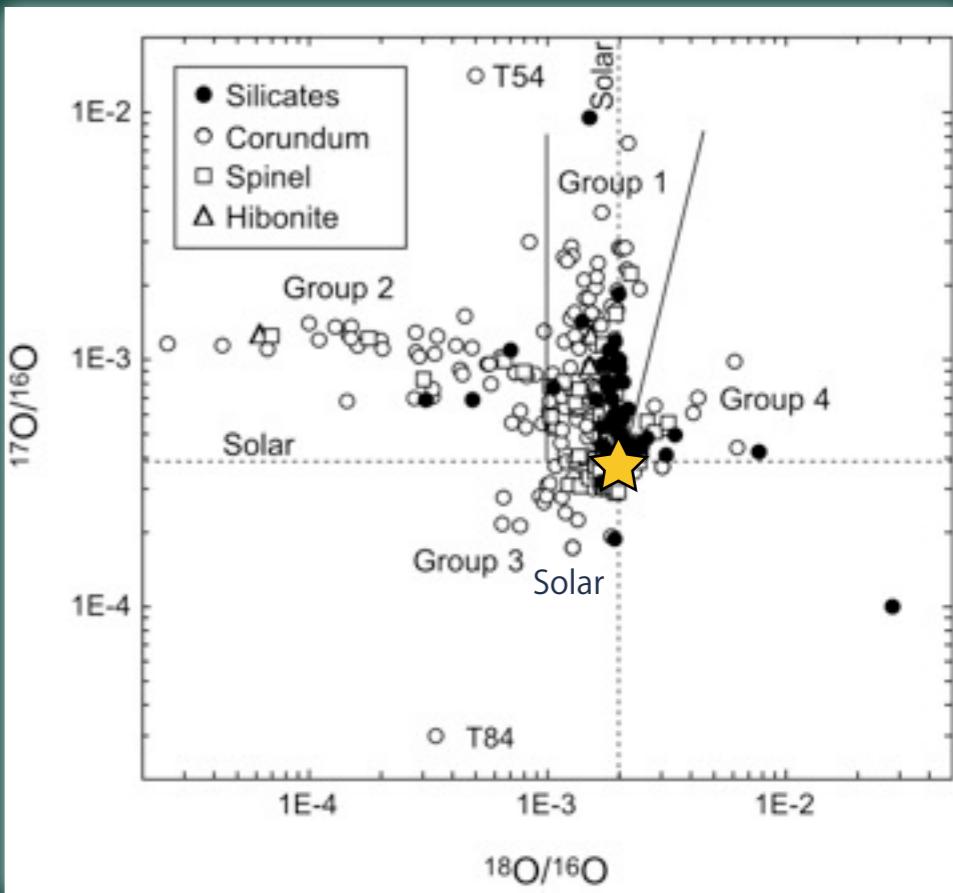
■ アルミナを通じて太陽系前史を遡る

星周アルミナ (Al_2O_3)

□ プレソーラー Al_2O_3

- 大きな同位体異常
- AGB星・超新星→太陽系
- プレソーラー $\text{Al}_2\text{O}_3 > 250$

Huss+1994, Hutcheon+1994, Nittler 1994, 1997, 1998, 2008, Strelbel+2003, Zinner+2003, Choi +1998, Nguyen+2003, Makide+2009



Meyer & Zinner 2006

□ プレソーラーから得られる情報

- 組成・結晶形状・結晶構造・同位体組成
- (内部結晶構造・同位体組成分布・包有物・微量元素)

✓ 表面構造 (Choi+1998)

✓ 結晶構造 (Stroud+2004)

... ほとんど分かっていない

□ 本研究：プレソーラーアルミナの結晶形・表面構造を詳細に調べる

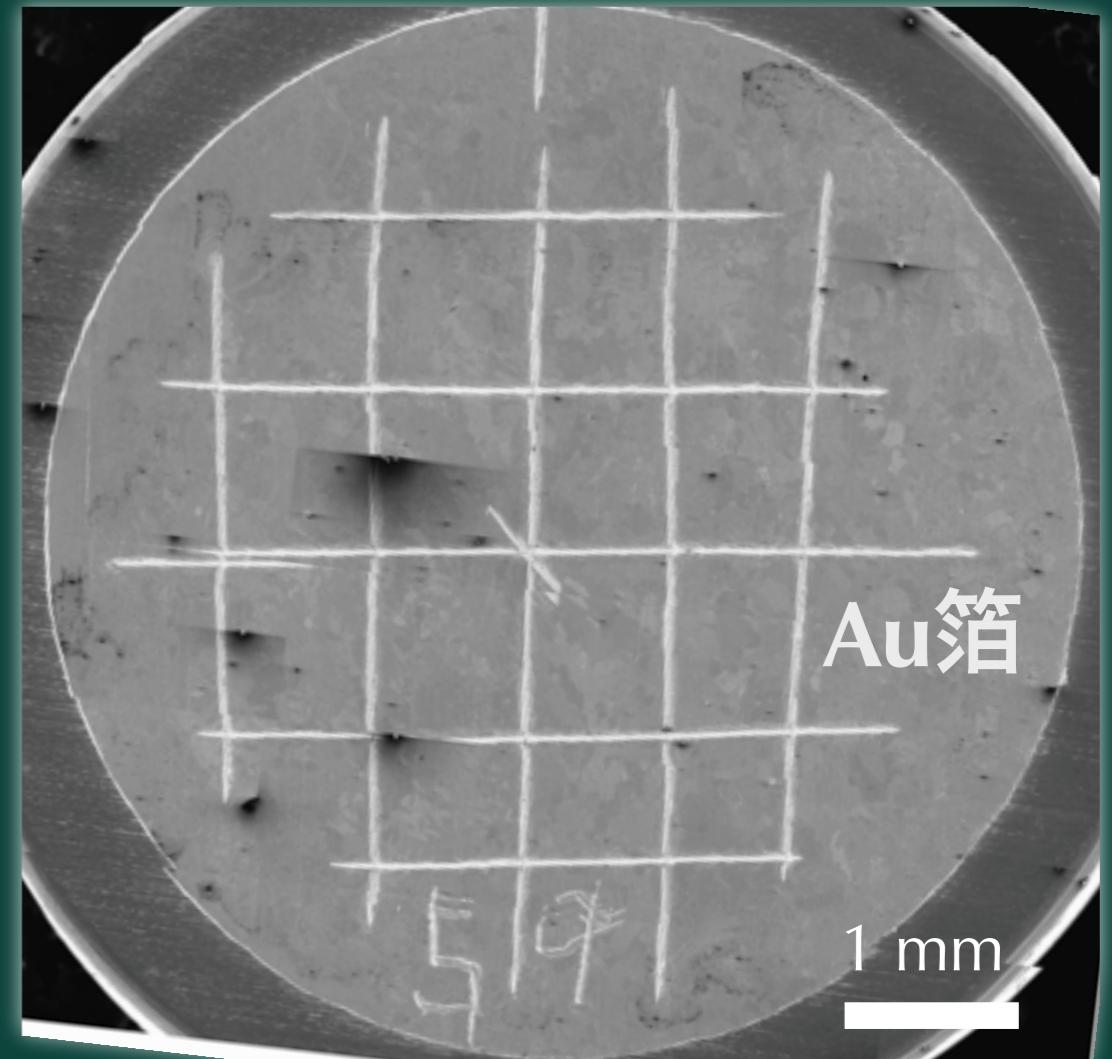
アルミナの同定

✓ 試料

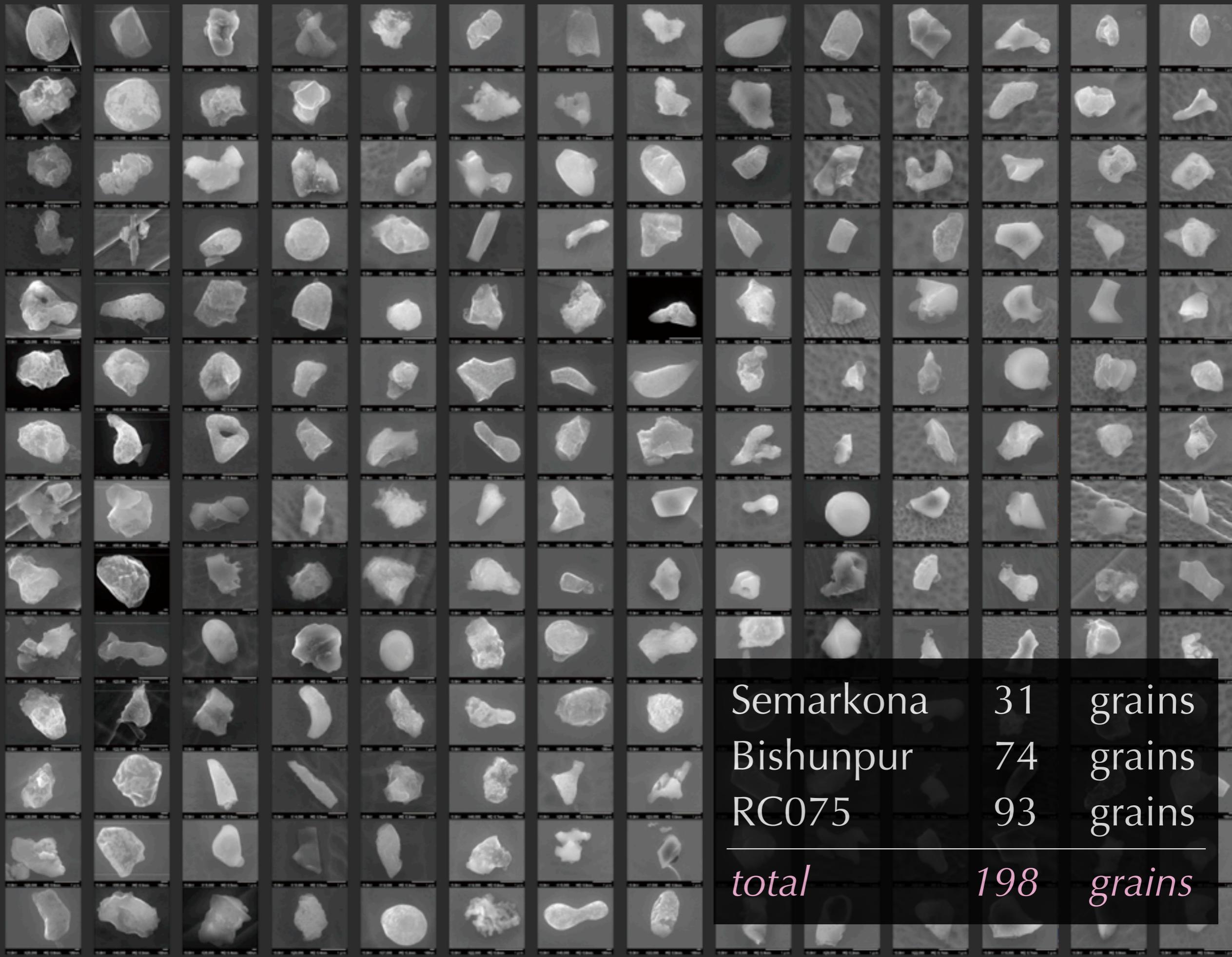
- Semarkona (LL3.0), Bishunpur (LL3.1), RC 075 (H3.2) の酸処理残渣
- アルミナ, スピネル, SiC *(Huss and Lewis, 1995)*

✓ 同定

- カソードルミネッセンス (CL)
- エネルギー分散型X線分光(EDS)



Corundum grains in Ordinary Chondrites



Semarkona
Bishunpur
RC075

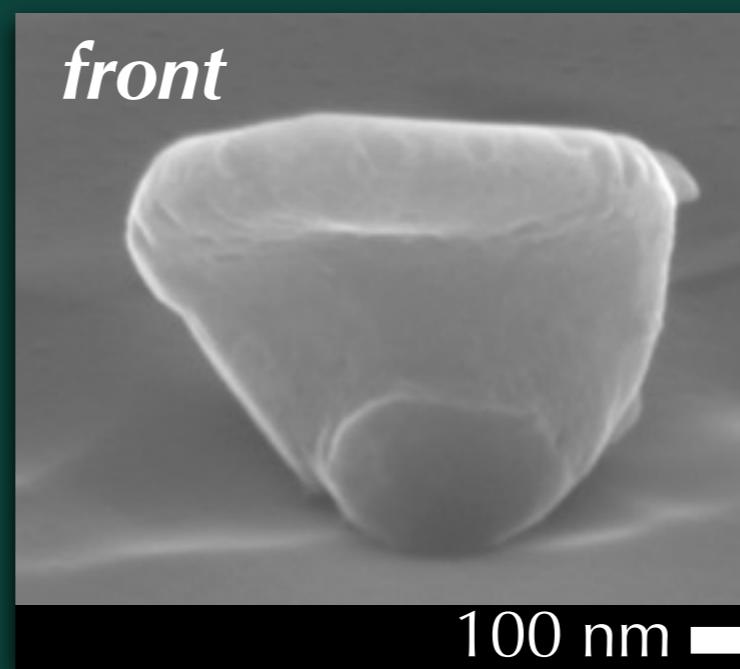
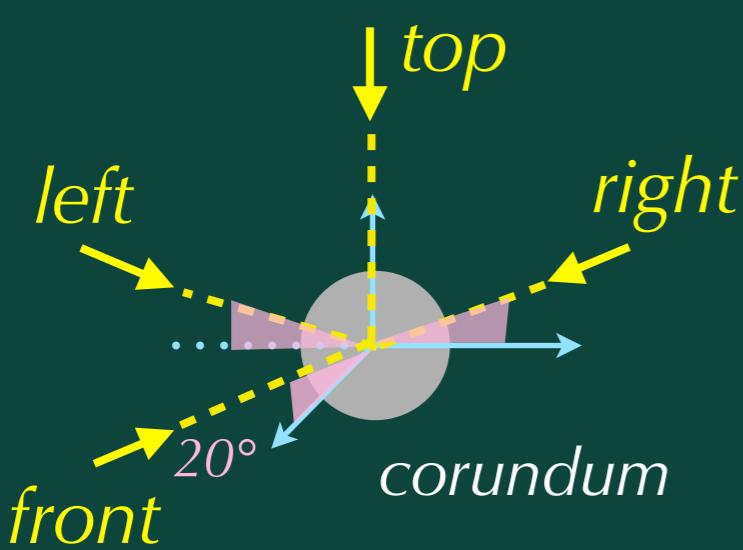
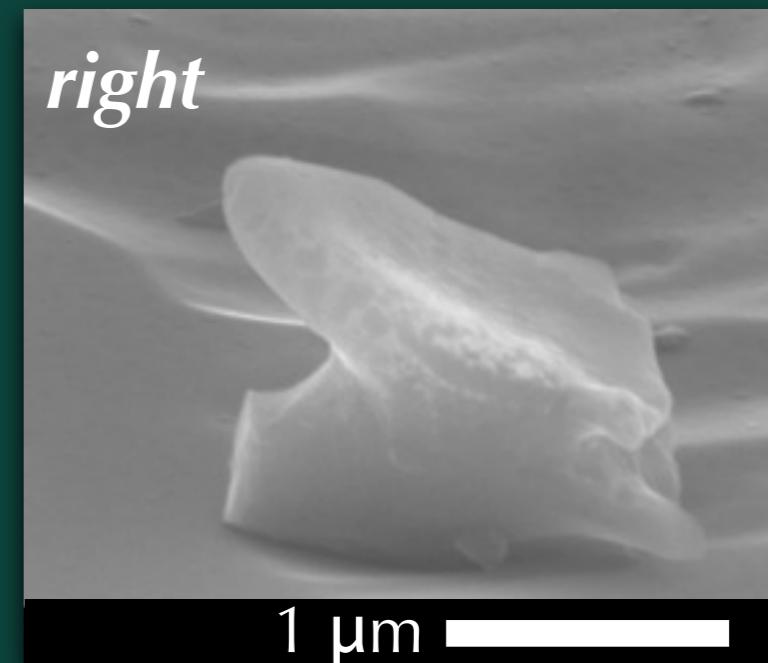
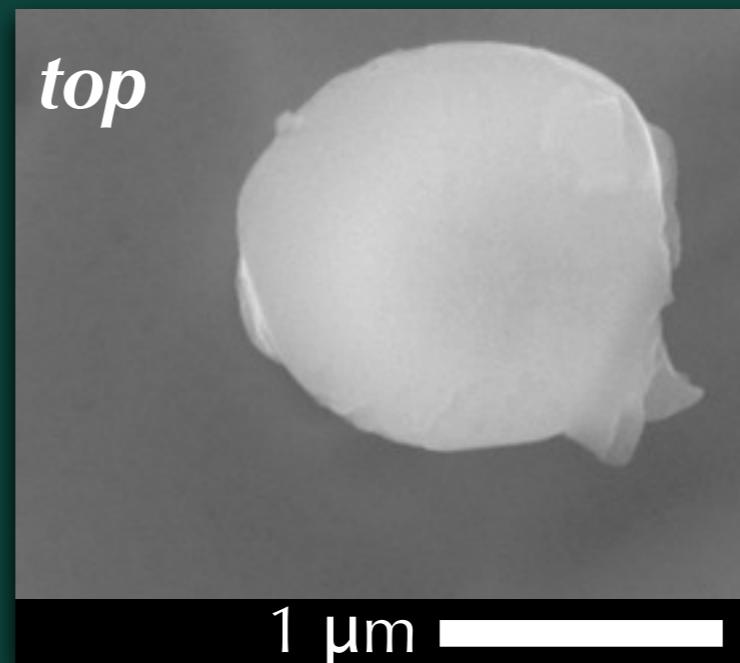
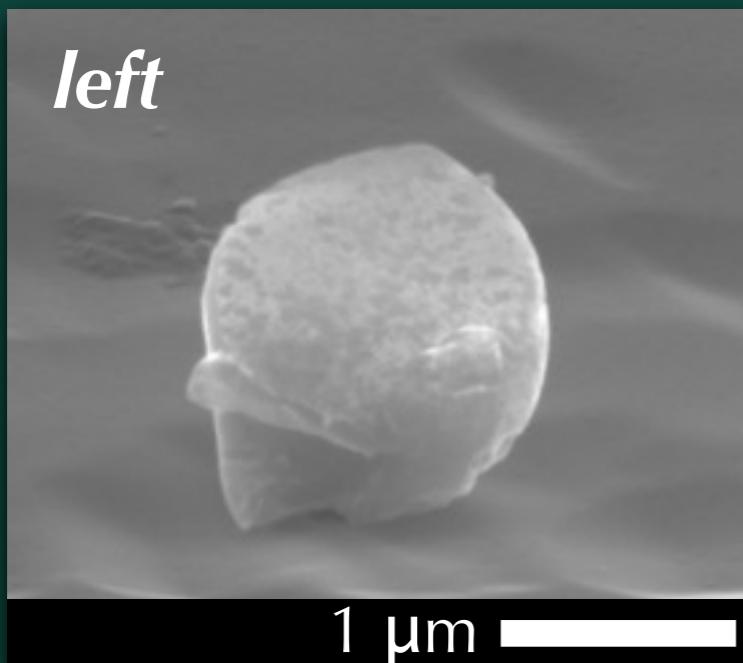
total

31 grains
74 grains
93 grains

198 grains

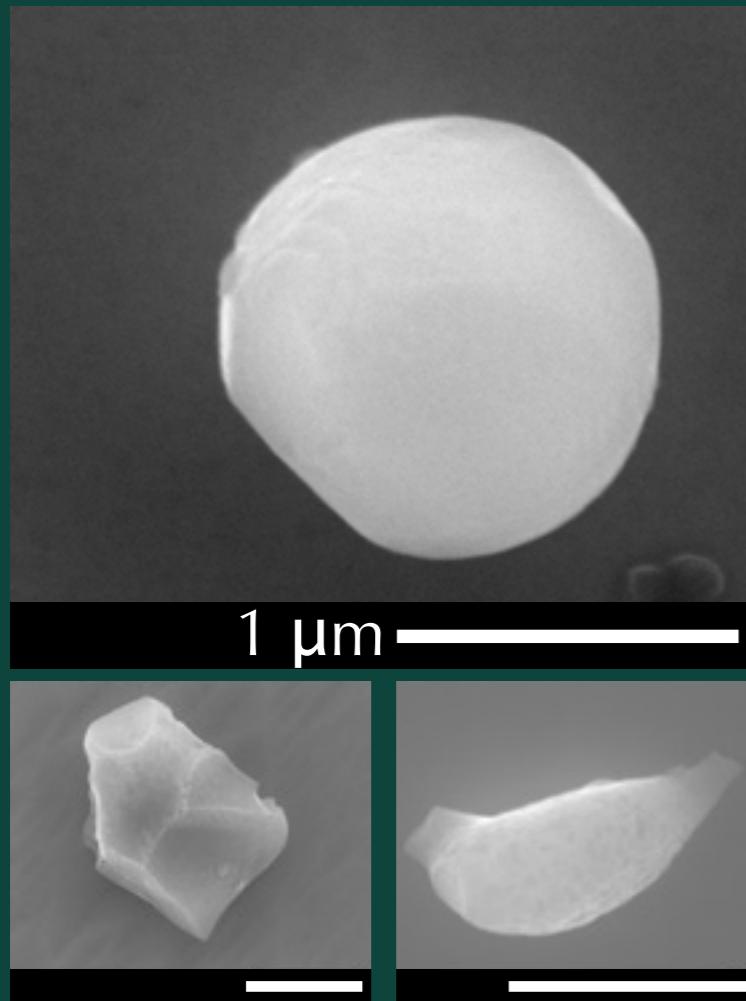
アルミナ粒子の形状

✓ 3D 形状 - 各粒子にたいして4方向からのSEM観察

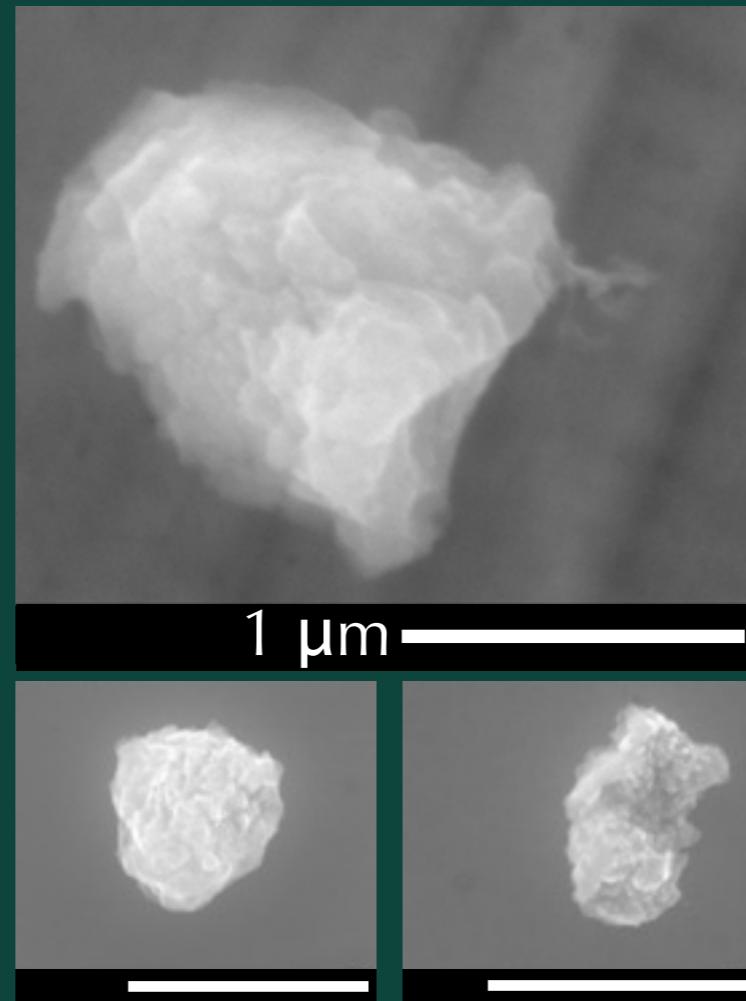


アルミナの表面構造

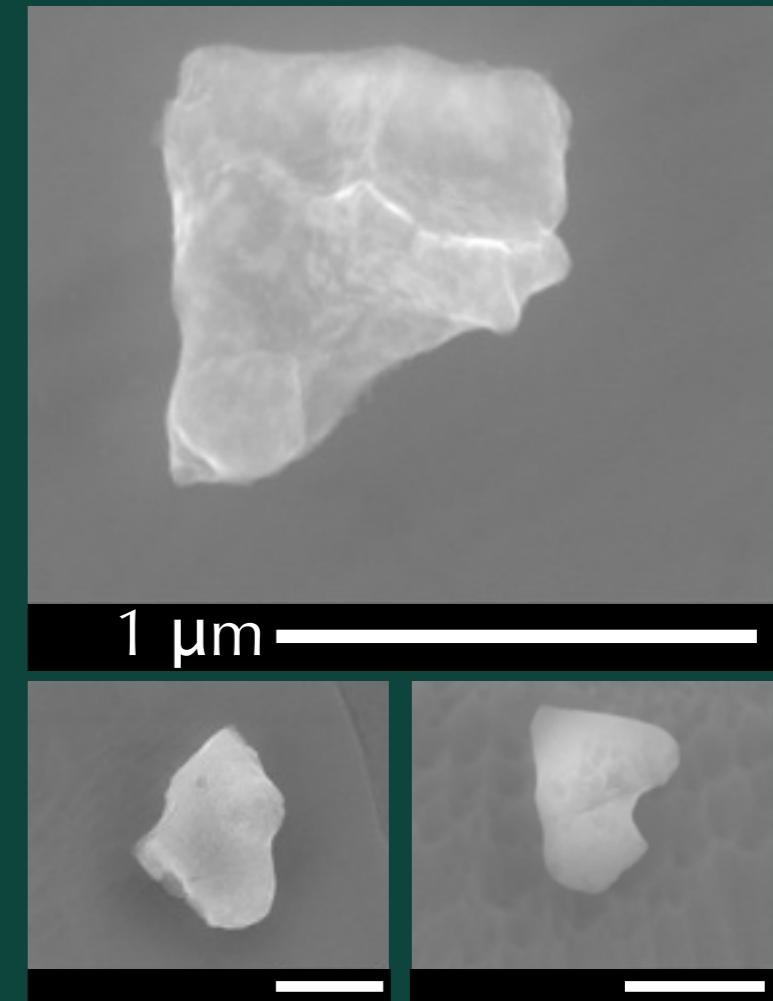
Type A



Type B



Type C



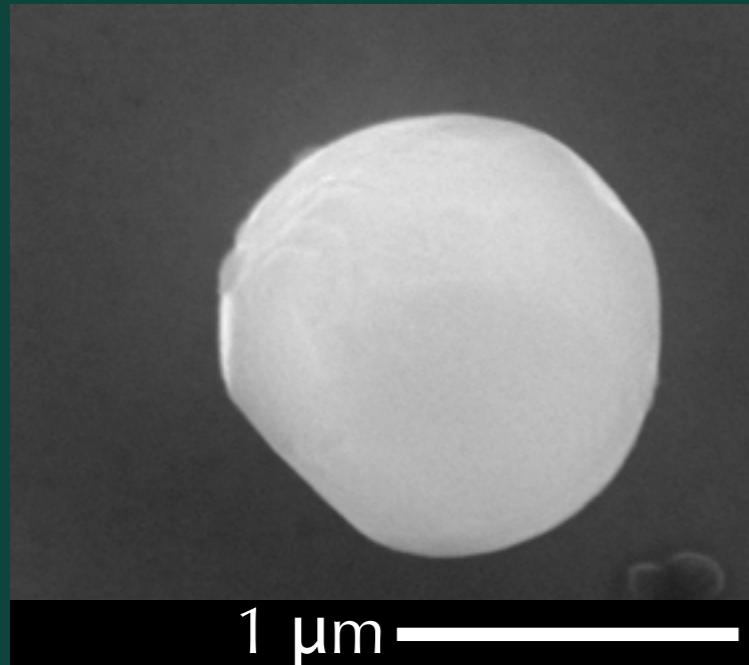
: 数十nmスケールで
スムースな表面

: 10-100 nmサイズ
の微細構造を伴う
凸凹した表面

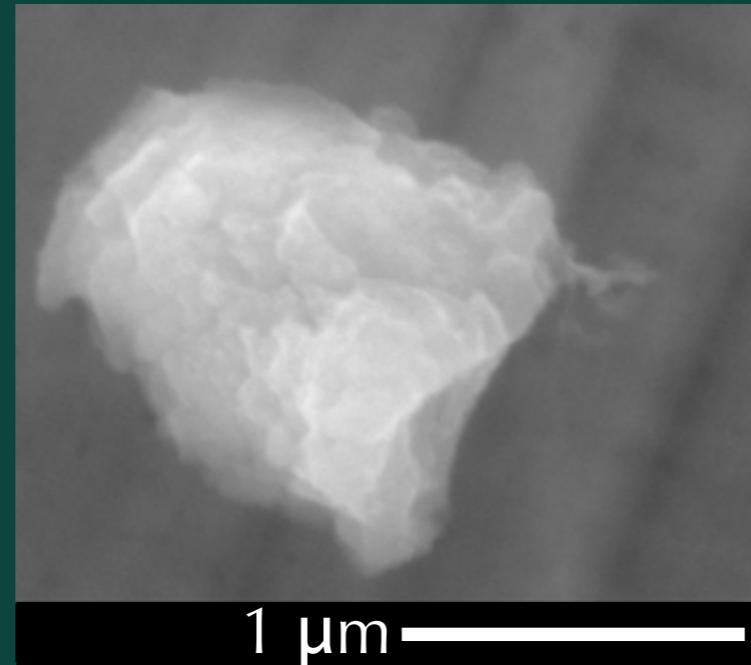
: Type A, B以外

アルミナの表面構造

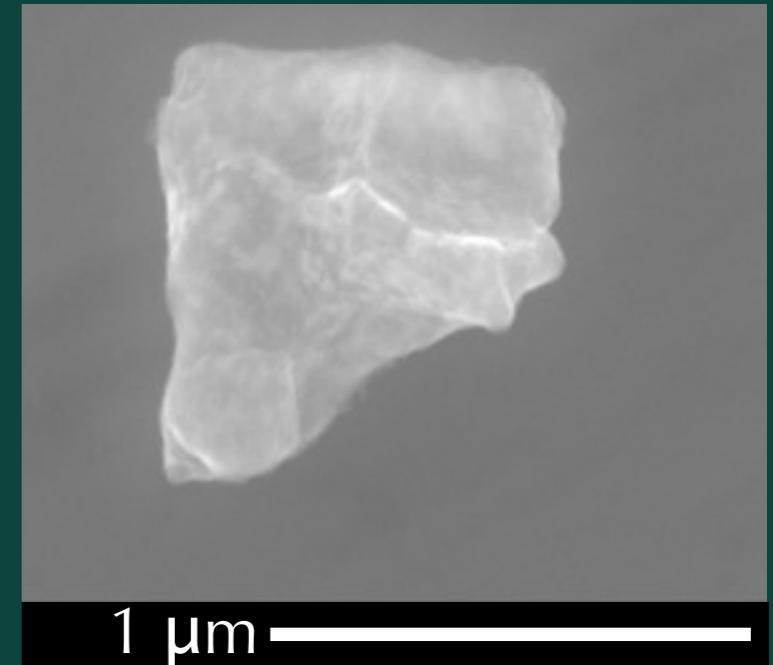
Type A



Type B



Type C



1 μm

1 μm

1 μm

| | Type A | Type B | Type C | total |
|-----------|--------|--------|--------|-------|
| Semarkona | 7 | 13 | 11 | 31 |
| Bishunpur | 31 | 16 | 27 | 74 |
| RC 075 | 38 | 35 | 20 | 93 |
| total | 76 | 64 | 58 | 198 |

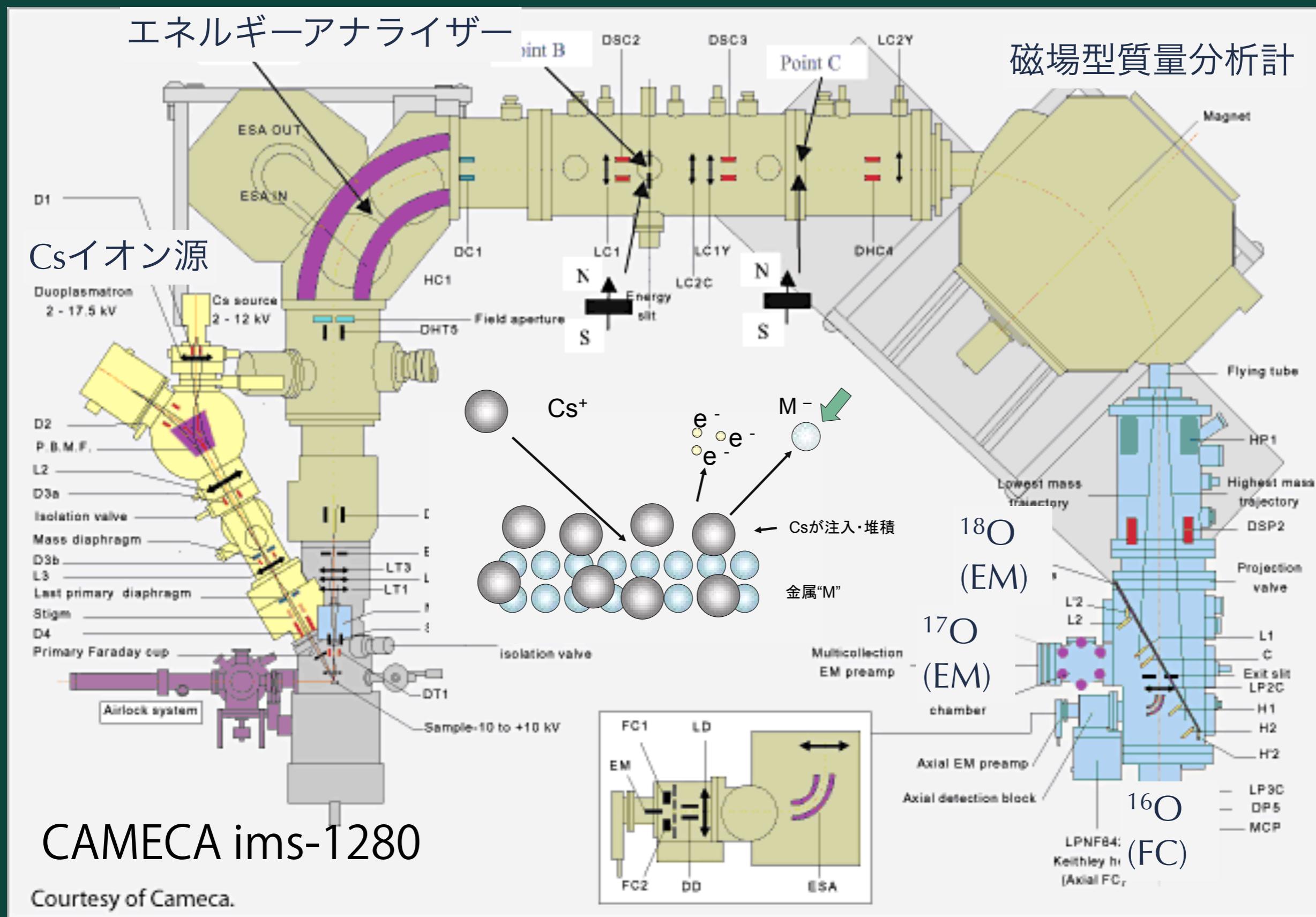
結晶構造

- ✓ 電子後方散乱回折 - 170 粒子からEBSDパターンを取得
 - 148粒子 (87%) から α アルミナ(コランダム)のパターン

| pattern | $\alpha\text{-}Al_2O_3$ | 結晶性悪い |
|-----------|-------------------------|--------------------|
| 測定箇所 | <i>more than 3</i> | <i>more than 3</i> |
| Bishunpur | 57/63 | 6/63 |
| RC 075 | 41/56 | 15/56 |
| total | 98/120 | 22/120 |

- ~82%の粒子は粒子内複数点で同一パターン：单結晶コランダム

二次イオン質量分析計(SIMS Cameca ims-1280)

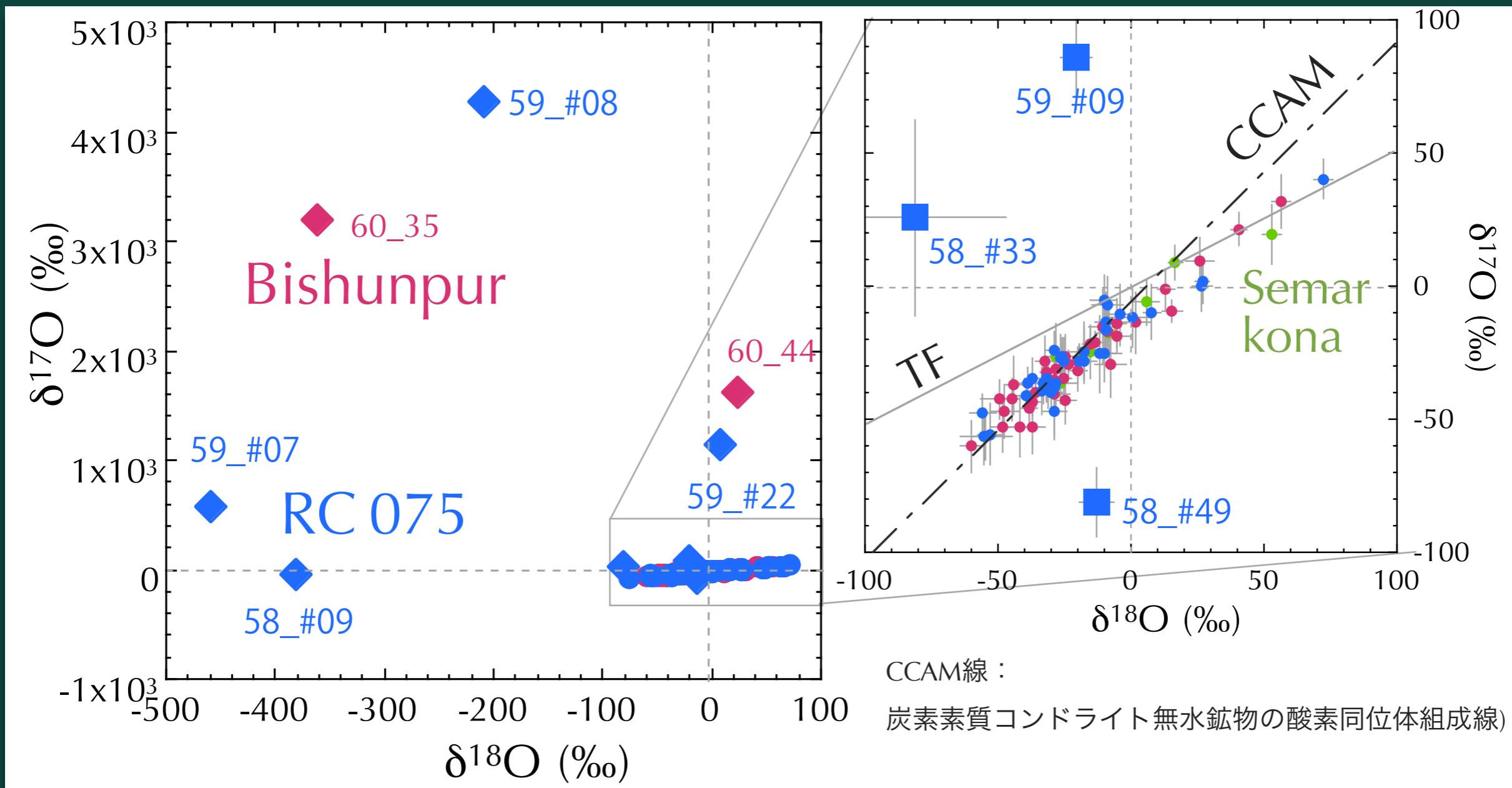


酸素同位体比測定

✓ UH Cameca ims-1280 (Makide+2009)

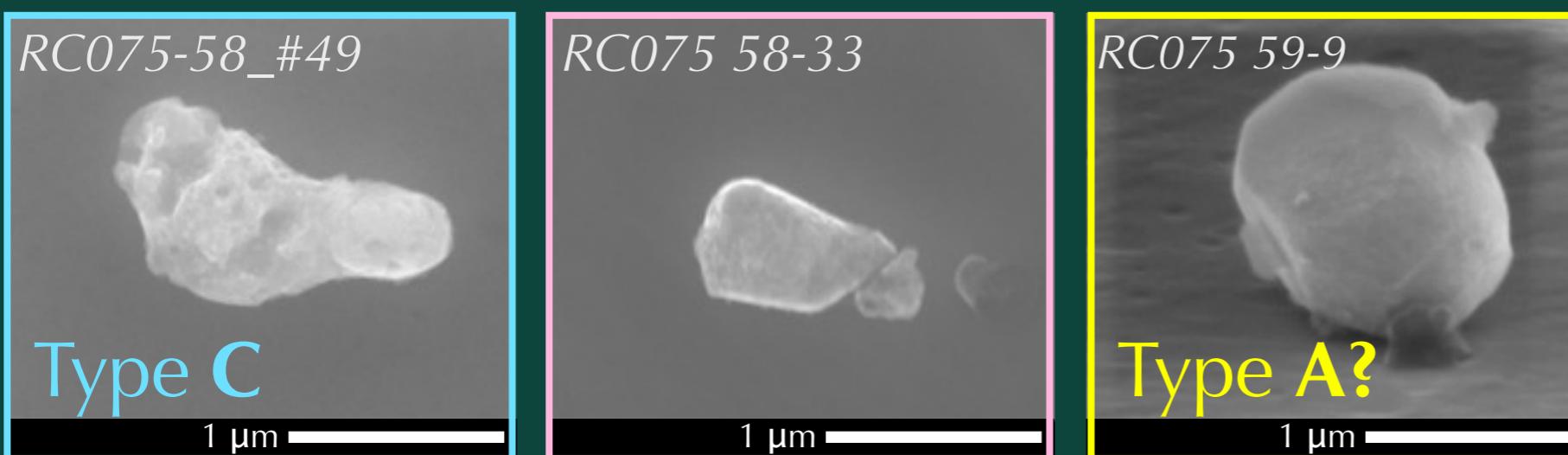
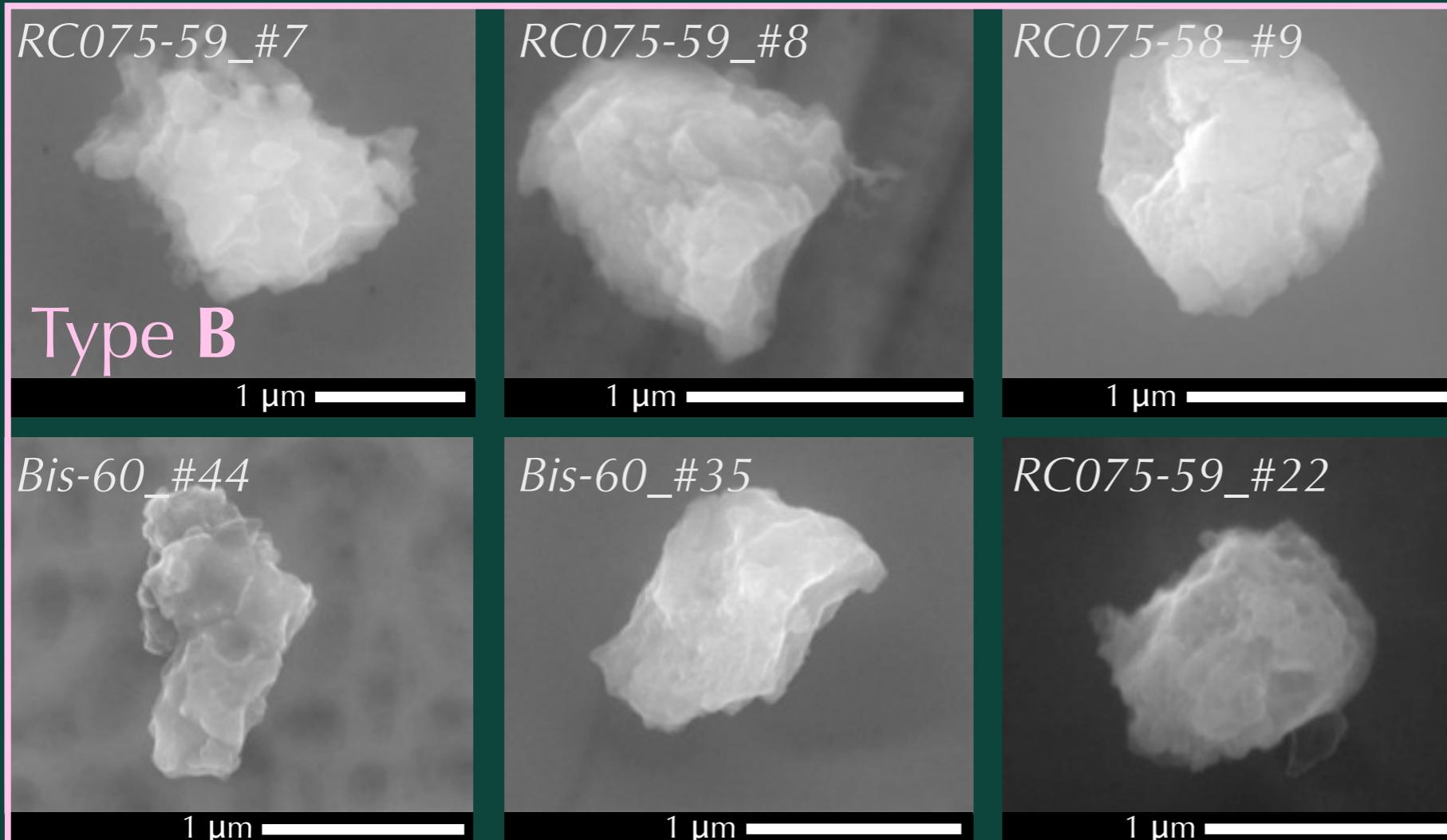
- Cs⁺ ビーム径 ~30 μm <2.5 nA (¹⁶O: $\geq 10^6$ cps)
- 1500×1500 μm² field aperture
(試料表面で~10 μm², 基板からの酸素 <1%)
- ¹⁶O, ¹⁷O, ¹⁸O の同時測定
 - ¹⁶O & ¹⁸O on multicollection FC & EM w/ MRP~2000
 - ¹⁷O on monocollector EM w/ MRP~5600
- 標準試料: 1-10 μm 金箔に分散させたBurma spinel
- 積分時間 : 50-250 sec (10 sec × 5-20 cycles)
- 分析精度(2-sigma): δ¹⁸O ~ 3‰, δ¹⁷O ~ 6‰
- 分析粒子数: 111

酸素同位体比測定



✓ プレソーラー粒子を9粒子発見

プレソーラーアルミナの表面構造

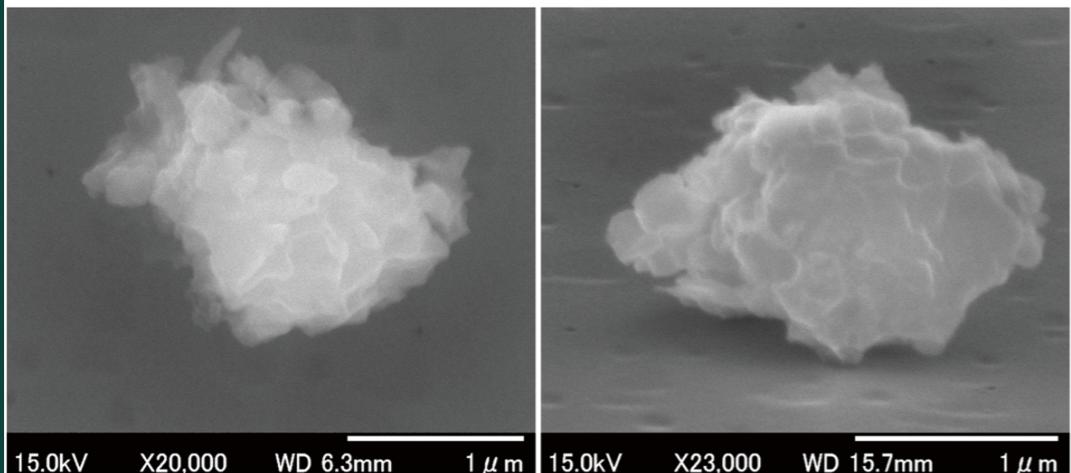


II 8粒子がスムース
でない表面構造

- 1 type A? grains
- 7 type B grains
- 1 type C grain

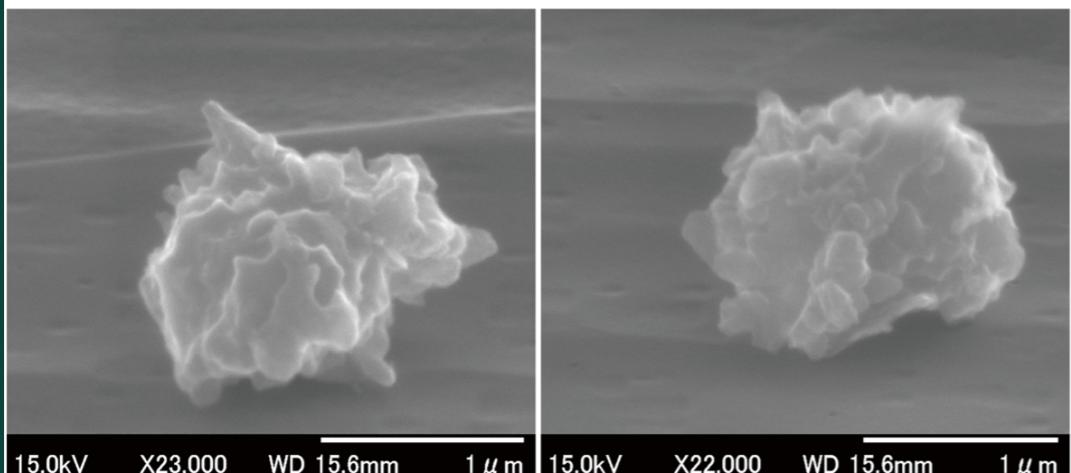
Presolar corundum

RC075-59_#7



07_t0r0_15kV_03nA.tif

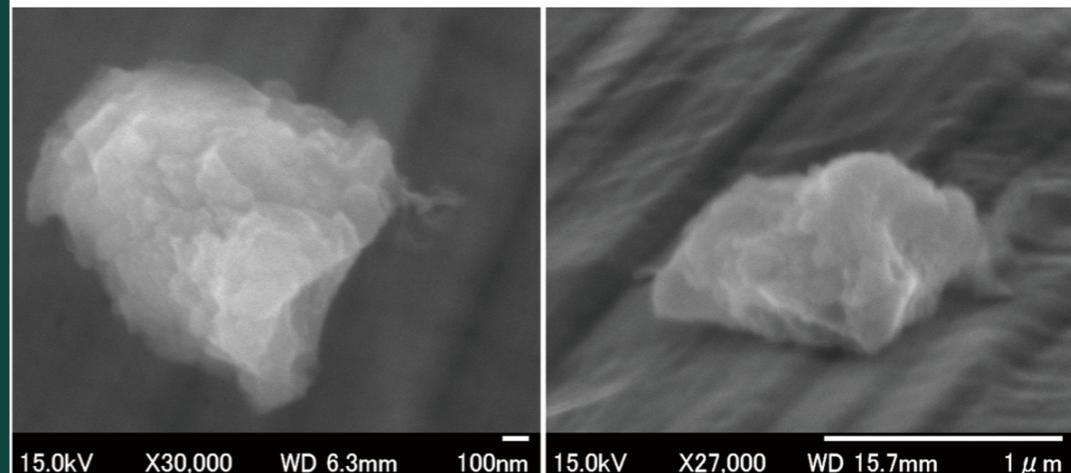
07_t70r0_15kV_03nA.tif



07_t70r90_15kV_03nA.tif

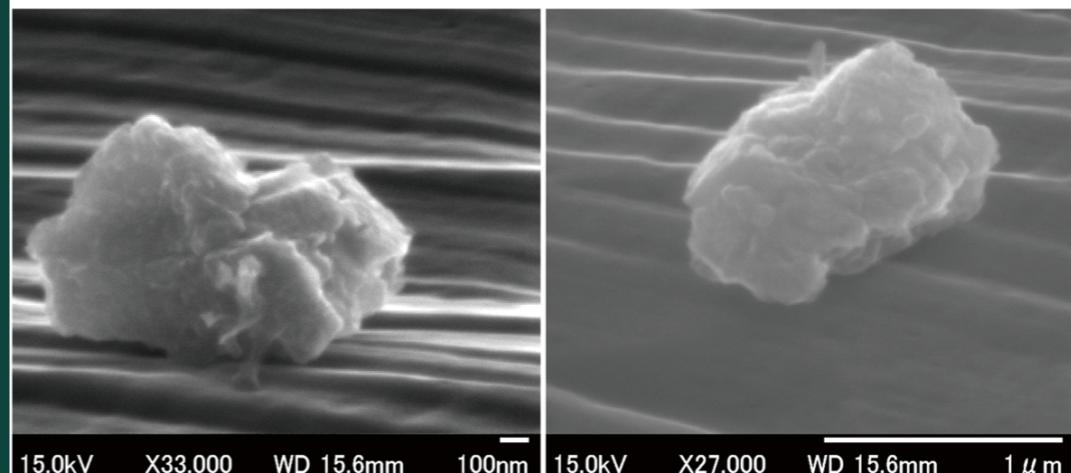
07_t70r270_15kV_03nA.tif

RC075-59_#8



08_t0r0_15kV_03nA.tif

08_t70r0_15kV_03nA.tif

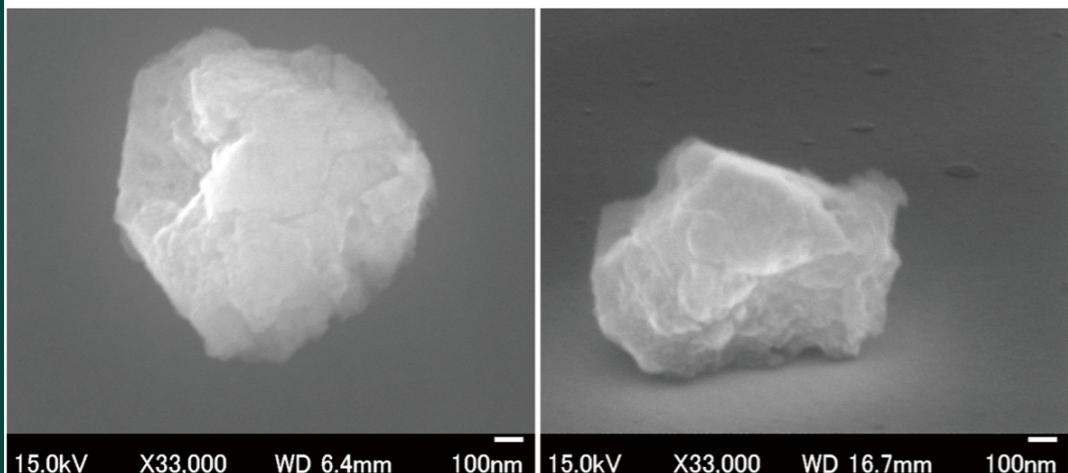


08_t70r90_15kV_03nA.tif

08_t70r270_15kV_03nA.tif

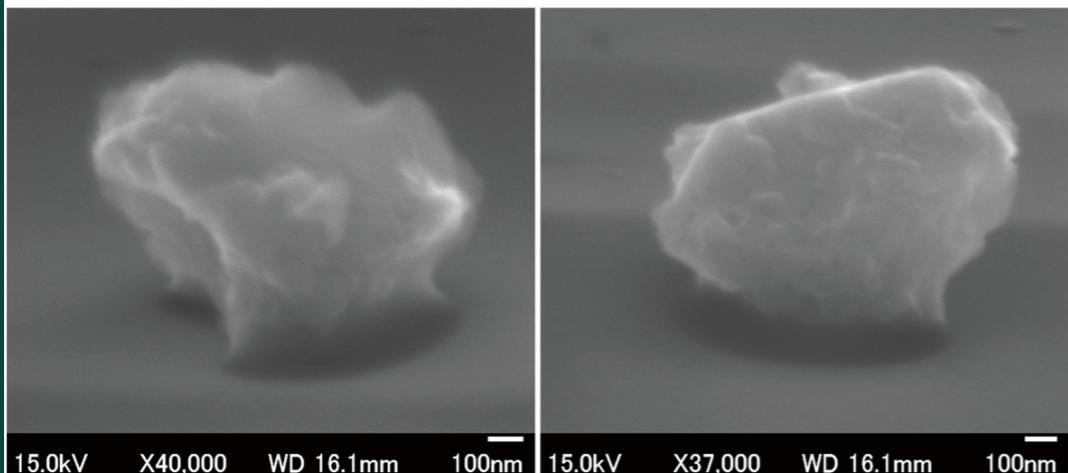
Presolar corundum

RC075-58_#9



09_t0r0_15kV_025nA.tif

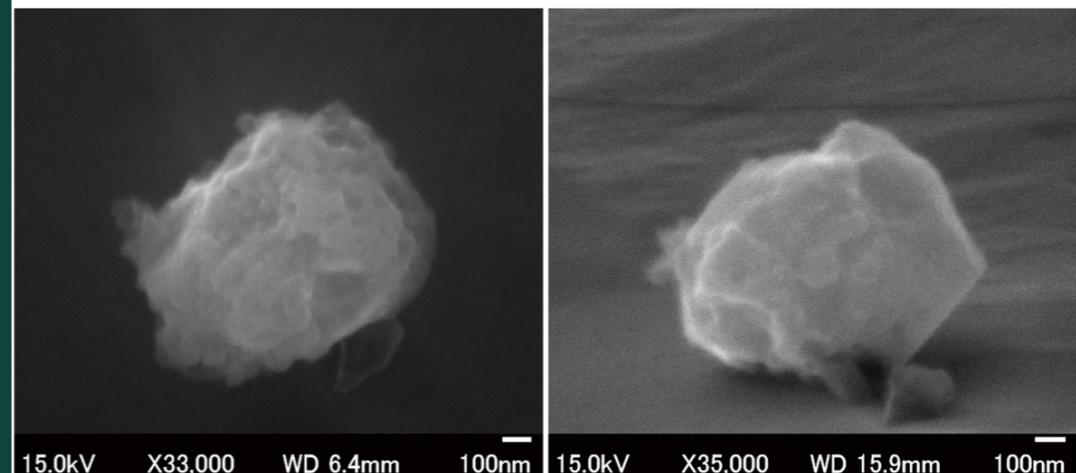
09_t70r0_15kV_025nA.tif



09_t70r90_15kV_03nA.tif

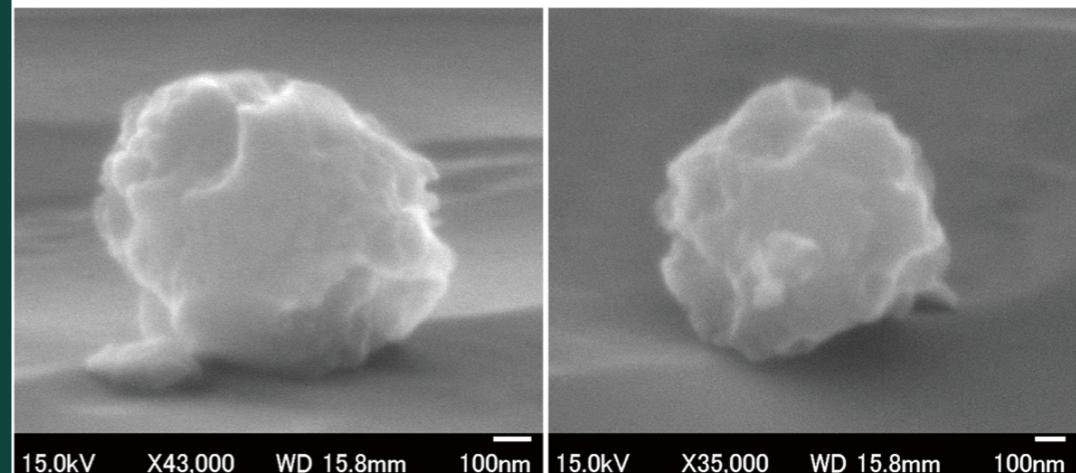
09_t70r270_15kV_03nA.tif

RC075-59_#22



22_t0r0_15kV_03nA.tif

22_t70r0_15kV_03nA.tif

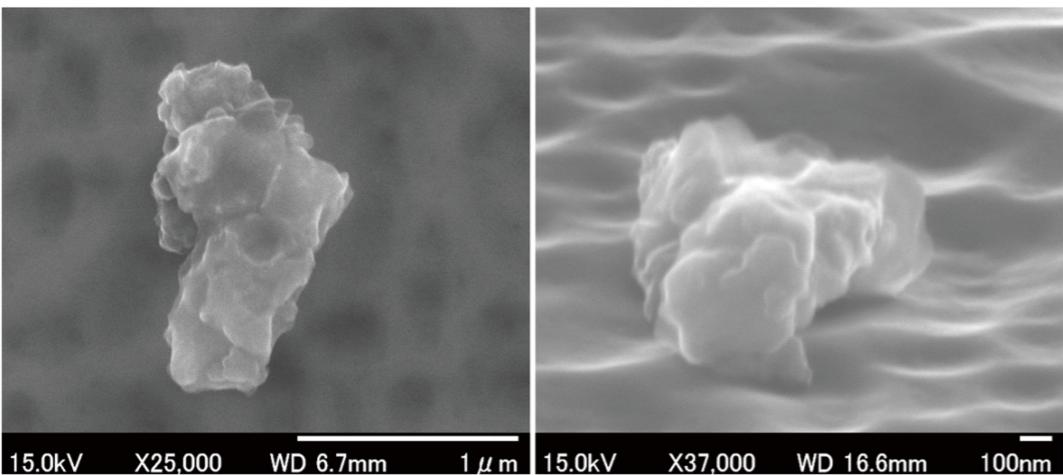


22_t70r90_15kV_03nA.tif

22_t70r270_15kV_03nA.tif

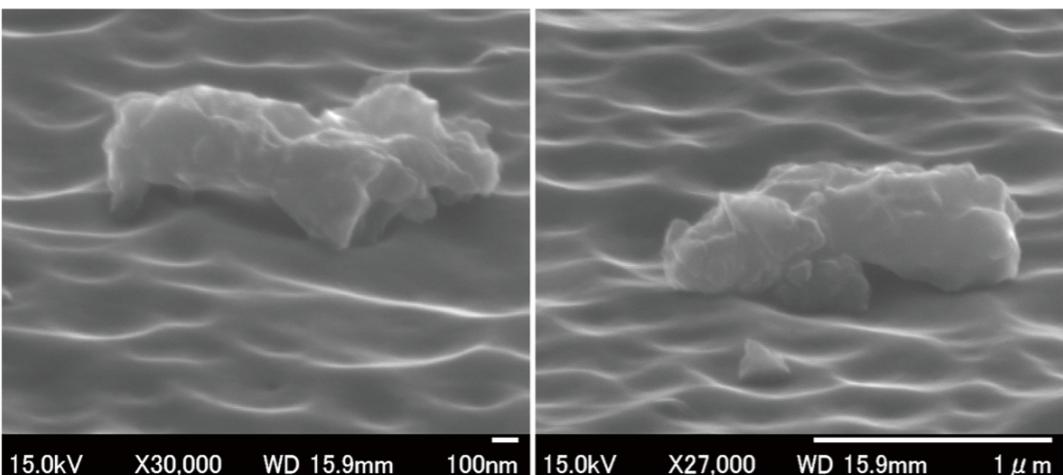
Presolar corundum

Bis-60_#44



44_t0r0_15kV_03nA.tif

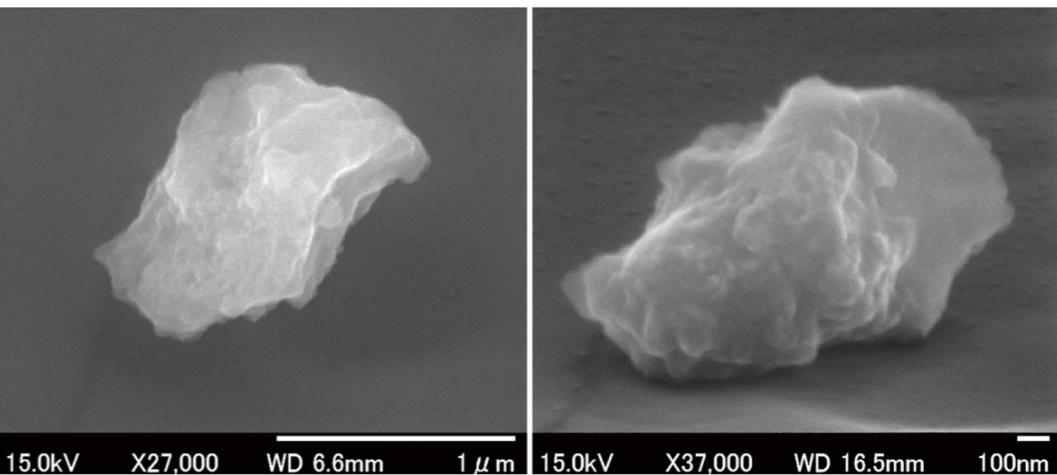
44_t70r0_15kV_03nA.tif



44_t70r90_15kV_03nA.tif

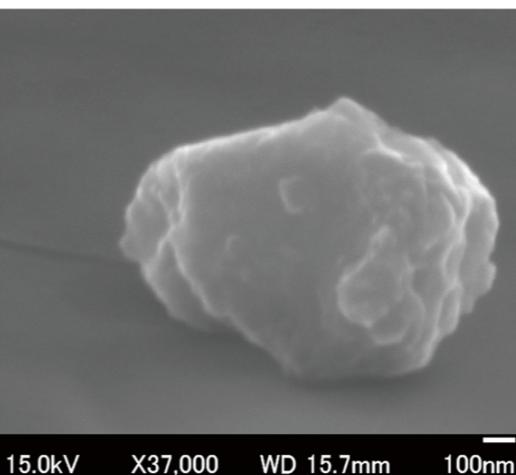
44_t70r270_15kV_03nA.tif

Bis-60_#35



35_t0r0_15kV_03nA.tif

35_t70r0_15kV_03nA.tif

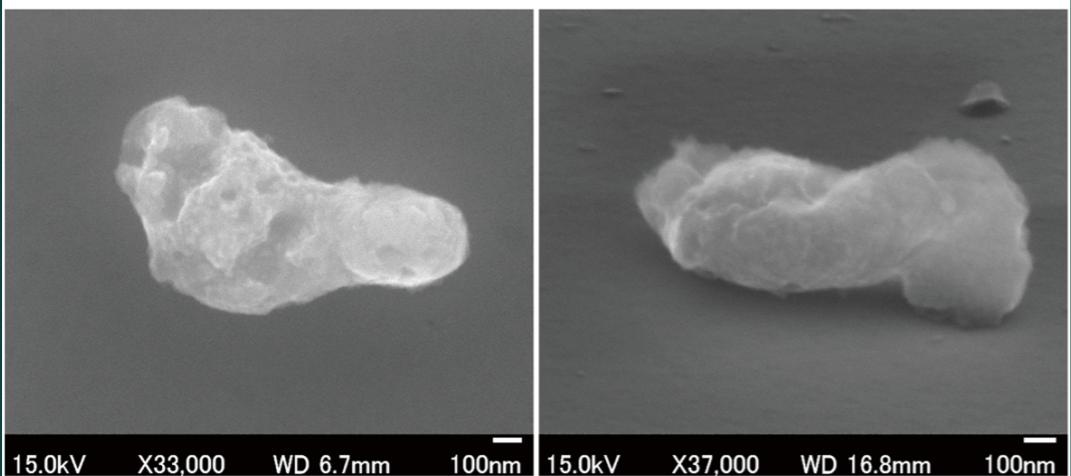


35_t70r90_15kV_03nA.tif

35_t70r270.psd

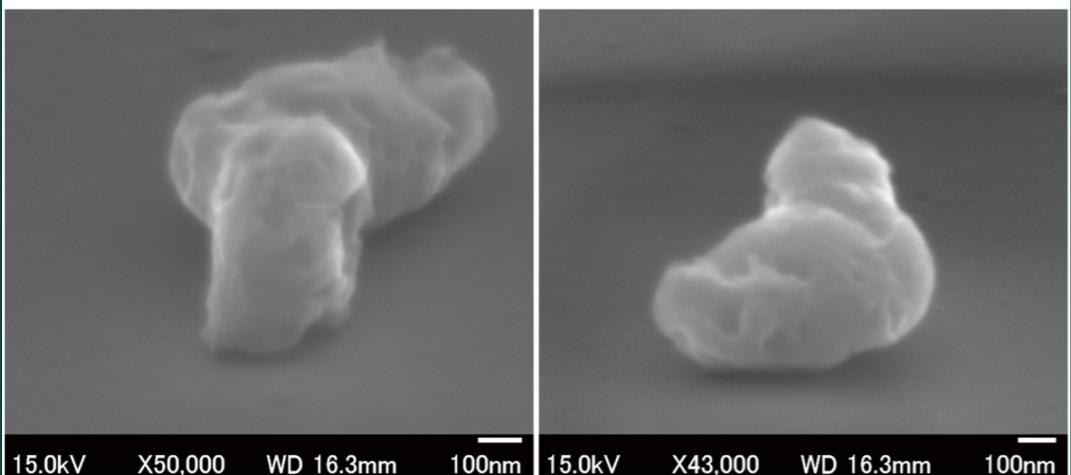
Presolar corundum

RC075-59_#49



49_t0r0_15kV_025nA.tif

49_t70r0_15kV_025nA.tif

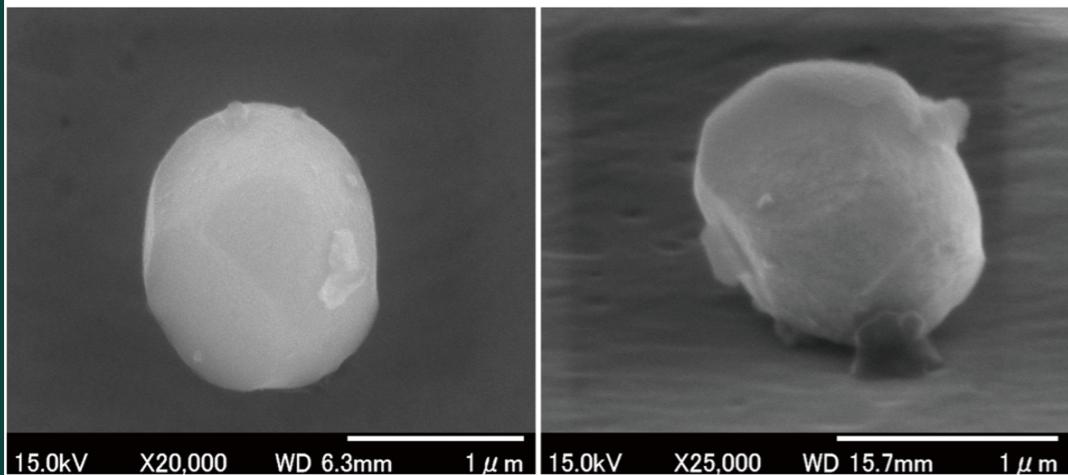


49_t70r90_15kV_03nA.tif

49_t70r270_15kV_03nA.tif

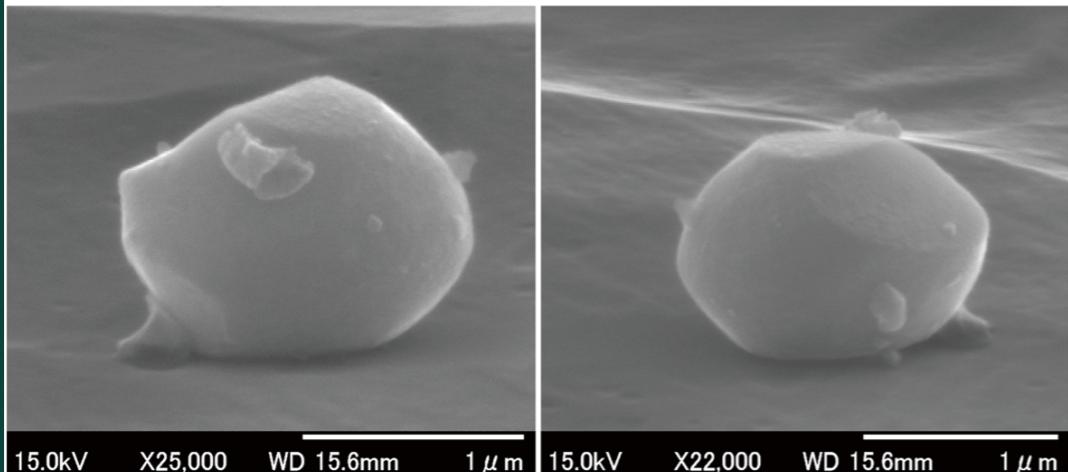
Presolar corundum

RC075-59_#9



09_t0r0_15kV_03nA.tif

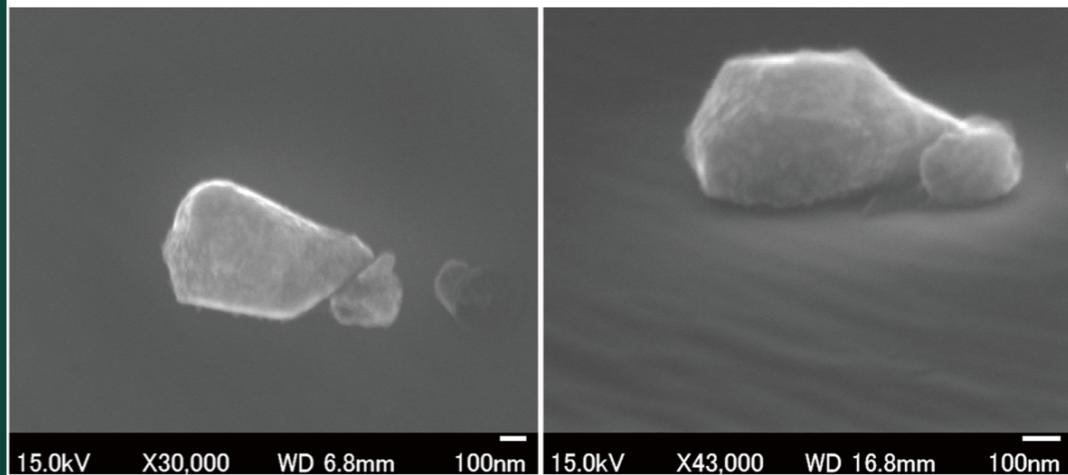
09_t70r0_15kV_03nA.tif



09_t70r90_15kV_03nA.tif

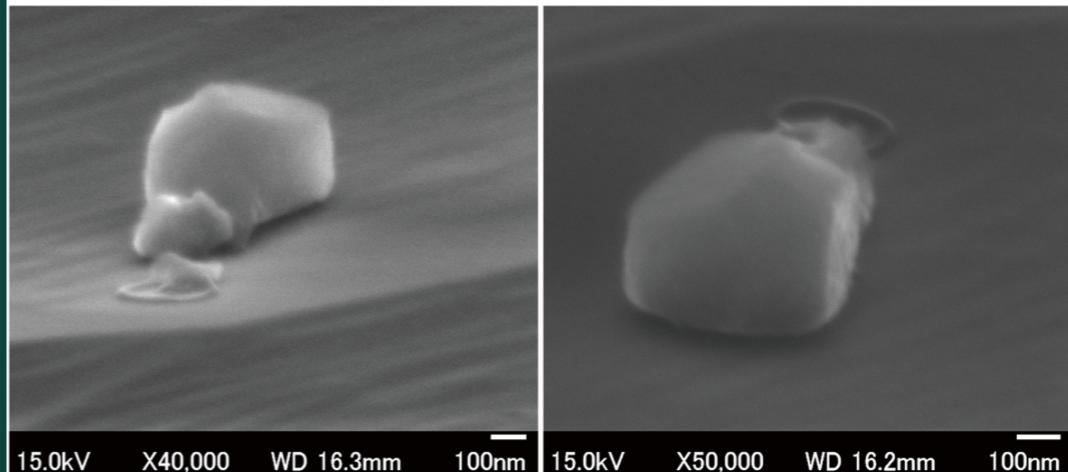
09_t70r270_15kV_03nA.tif

RC075-58_#33



33_t0r0_15kV_025nA.tif

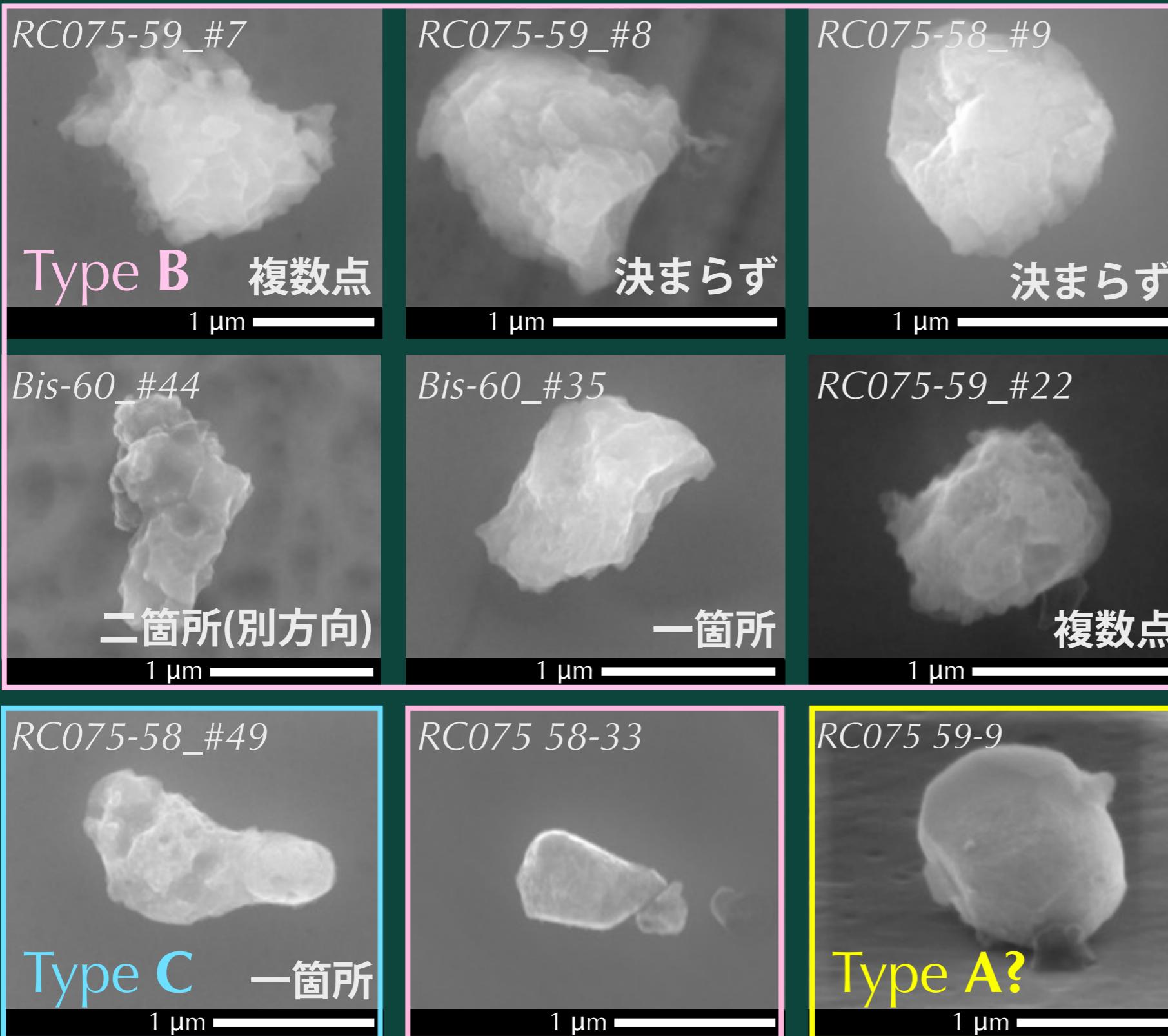
33_t70r0_15kV_025nA.tif



33_t70r90_15kV_03nA.tif

33_t70r270_15kV_03nA.tif

プレソーラーアルミナの表面構造



プレソーラーアルミナの表面構造

■ 3点以上の分析をした粒子の結晶性

| | single crystal | low crystallinity | unknown |
|-----------|-------------------|----------------------|---------|
| Bishunpur | 57/64 | 7/64 | 0/64 |
| RC 075 | 41/56 | 11/56 | 4/56 |
| total | 98/120 | 18/120 | 4/120 |
| presolar | 2 | 3 | 2 |

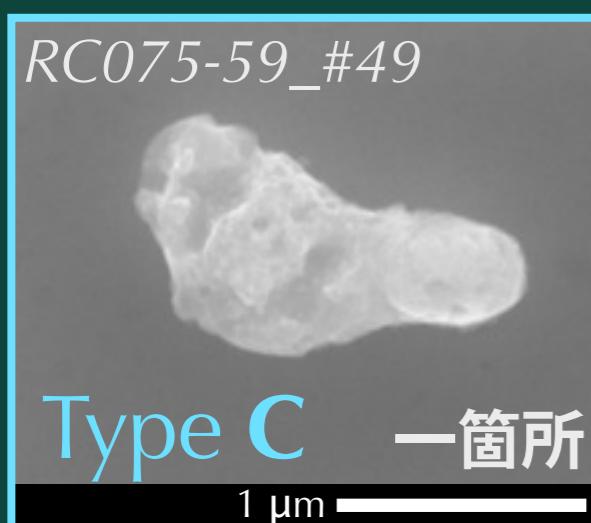
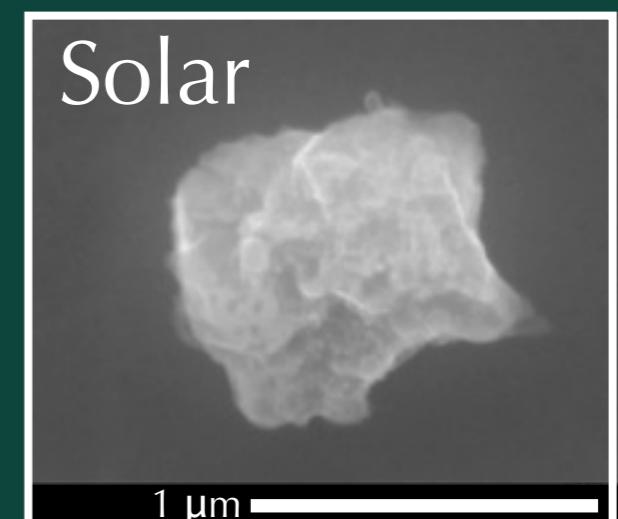
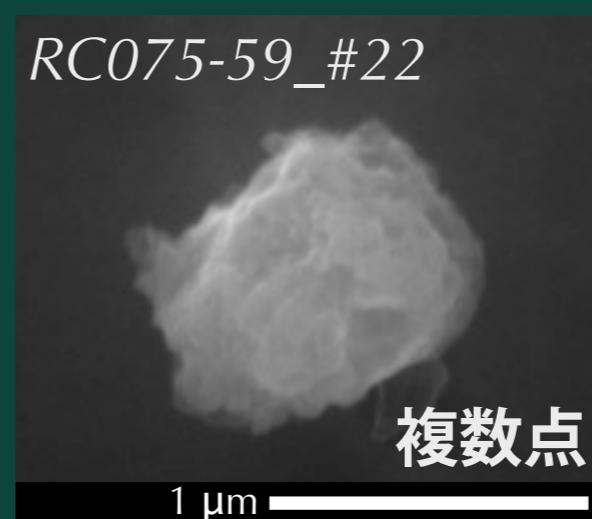
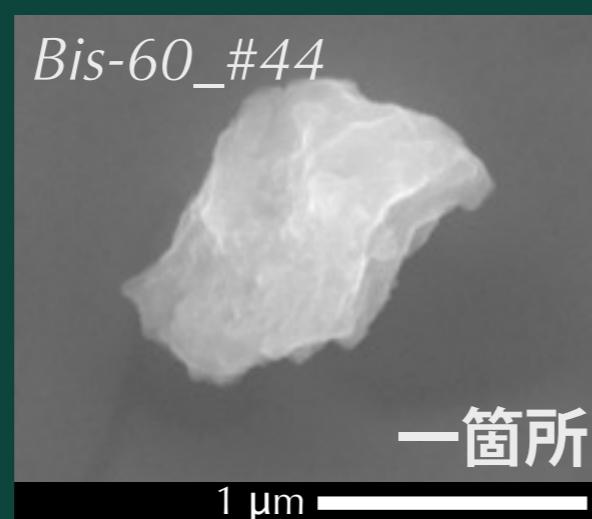
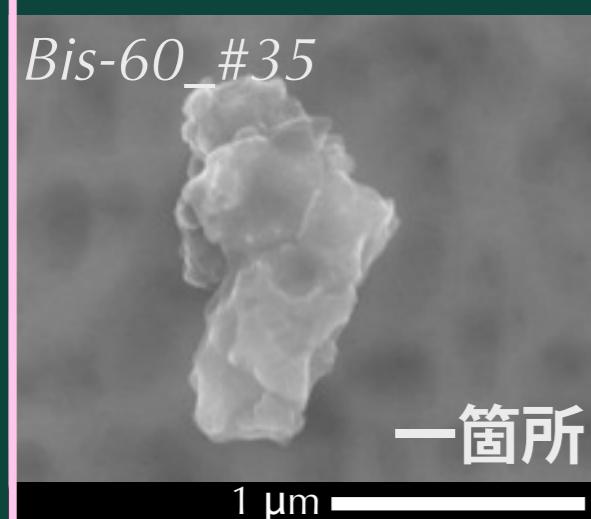
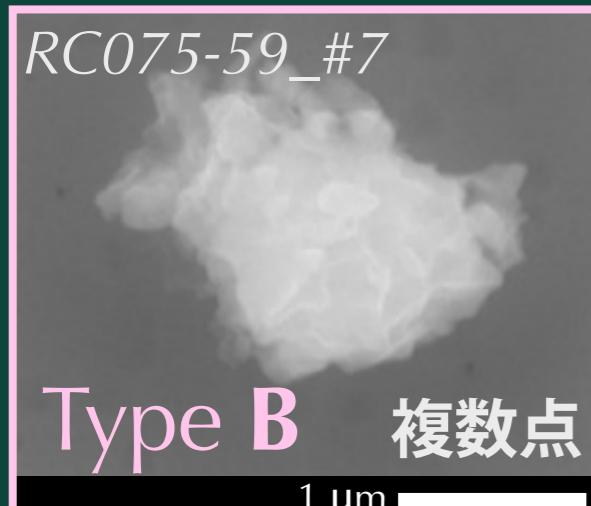
■ 粒子タイプとの関係

| | low crystal- linity | unkn- own |
|-------|---------------------------|--------------|
| A | 4 | 0 |
| B | 9 | 3 |
| C | 5 | 1 |
| total | 18 | 4 |

■ プレソーラー粒子の40%は結晶性が低い (\Leftrightarrow 太陽系アルミナは 13%)

■ 結晶性の低い粒子はTypeBに多い

プレソーラーアルミナの結晶構造



- ✓ プレソーラー粒子の40%は結晶性が低い
(\Leftrightarrow 太陽系アルミナは 13%)
- ✓ 一部の太陽系アルミナとプレソーラーアルミナの表面構造はよく似ている
→酸処理起源?

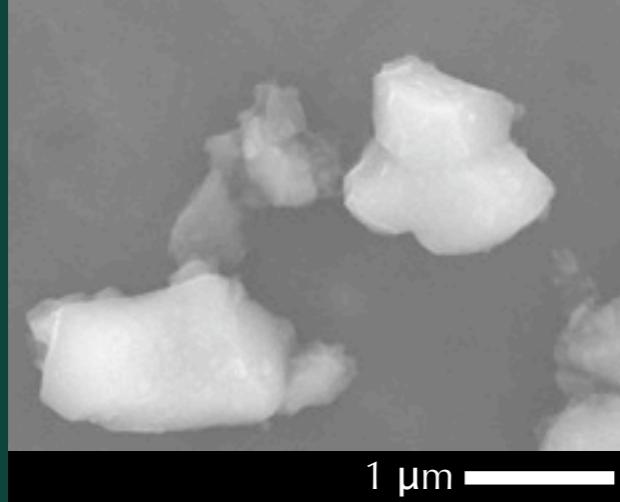
α -Al₂O₃ 酸溶解実験

✓ 酸処理 (Huss and Lewis 1995)

- 1) 12M HF - 6M HCl at 25°C for 10 days
- 2) 2M H₂SO₄ + 0.5N K₂Cr₇O₄ at 75°C for 12 hrs
- 3) HClO₄ at 190-200°C for 2 hrs

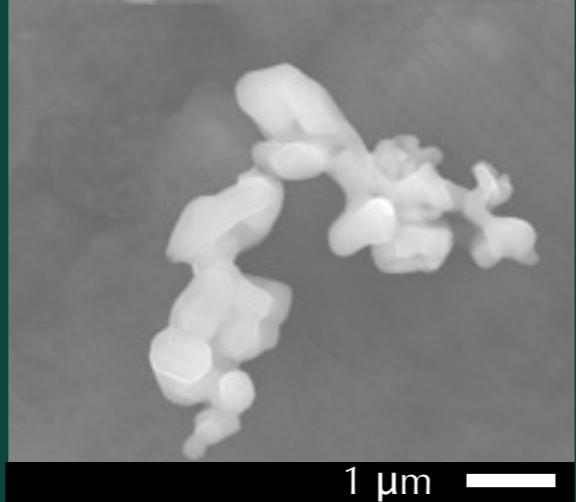
✓ 試料: Al₂O₃ 試薬

α -Al₂O₃ (1)

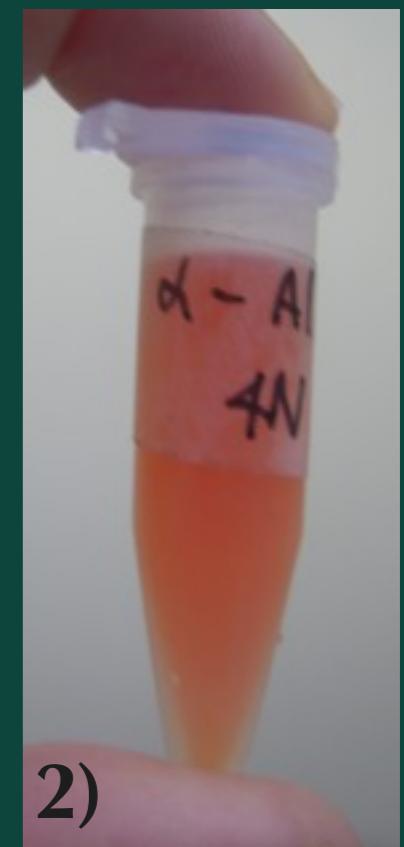
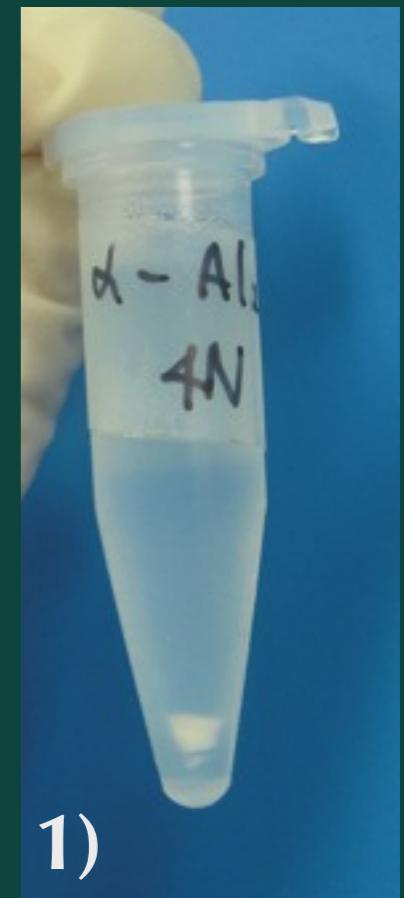


単結晶の粉末化

α -Al₂O₃ (2)



水酸化物の脱水



$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 酸溶解実験

出発試料

1) $\text{HF} - \text{HCl}$

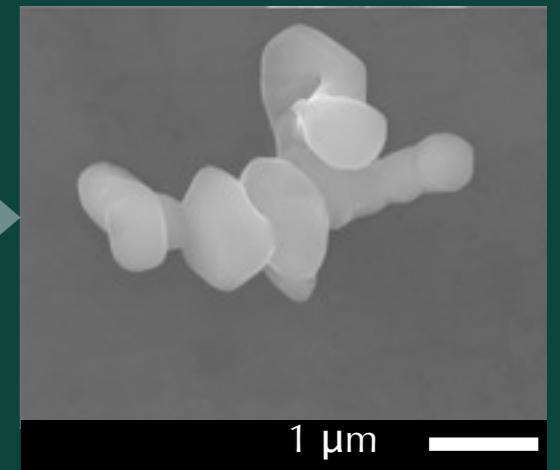
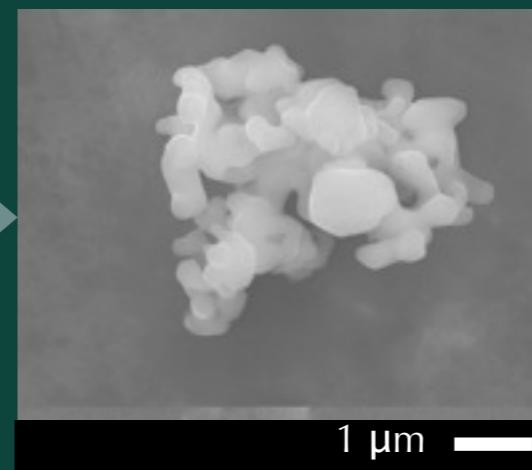
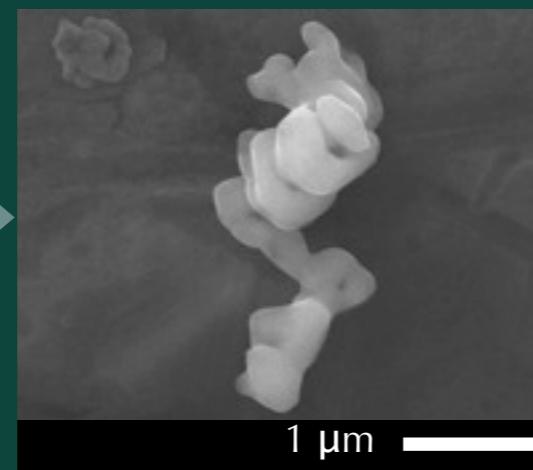
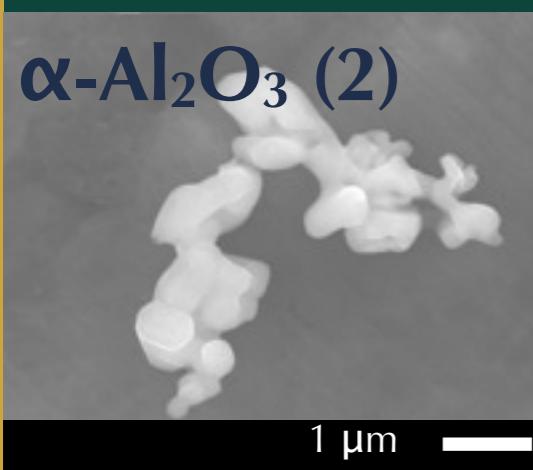
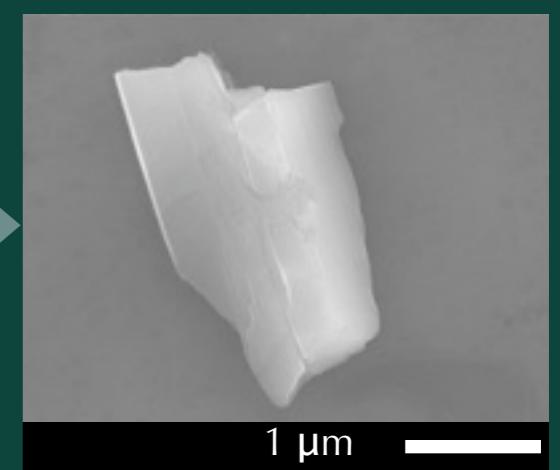
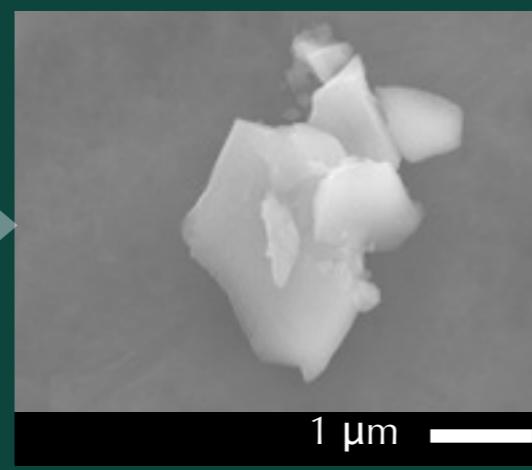
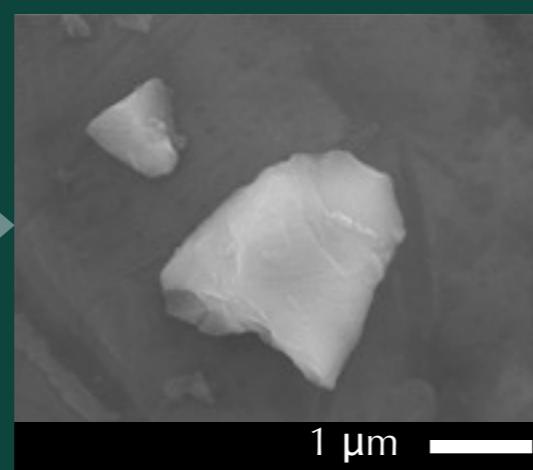
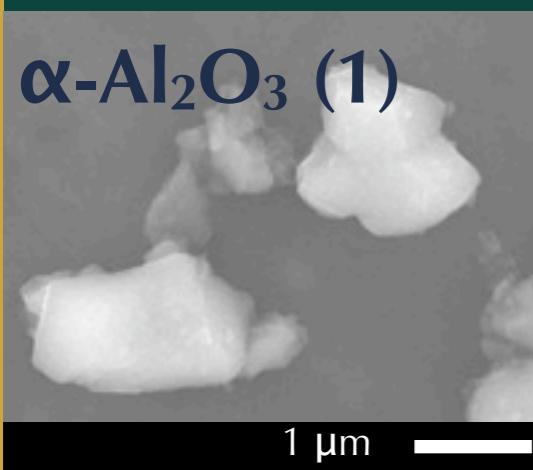
$25^\circ\text{C}, 10\text{ days}$

2) $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{K}_2\text{Cr}_7\text{O}_4$

$75^\circ\text{C}, 12\text{ hrs}$

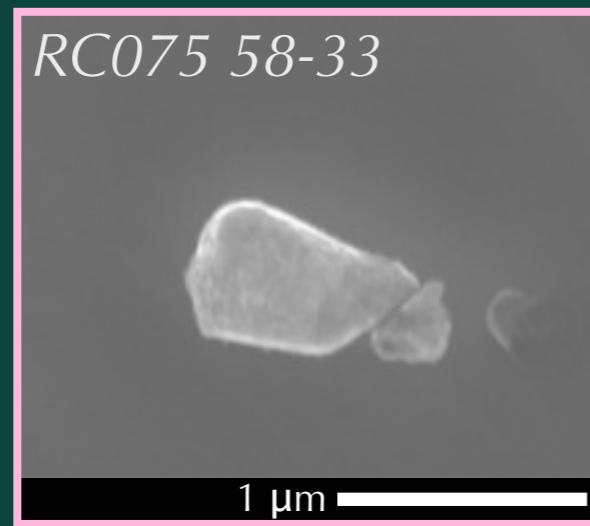
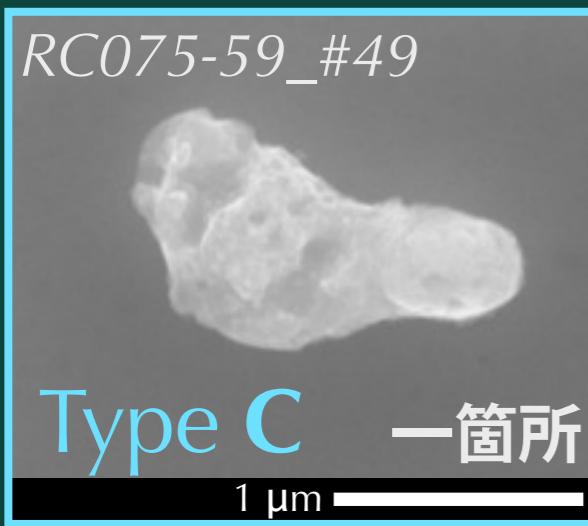
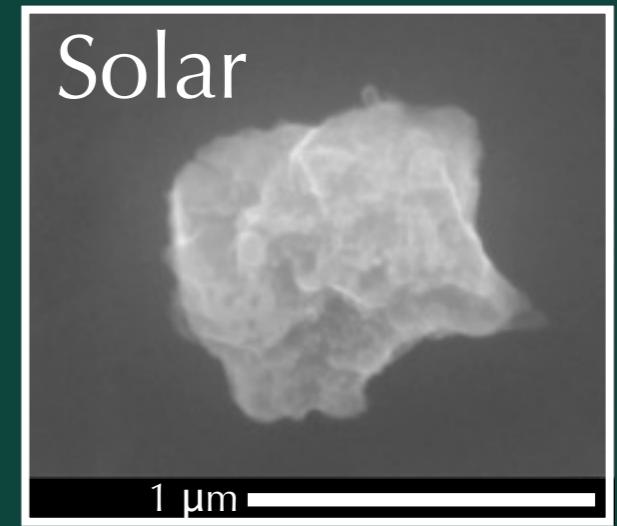
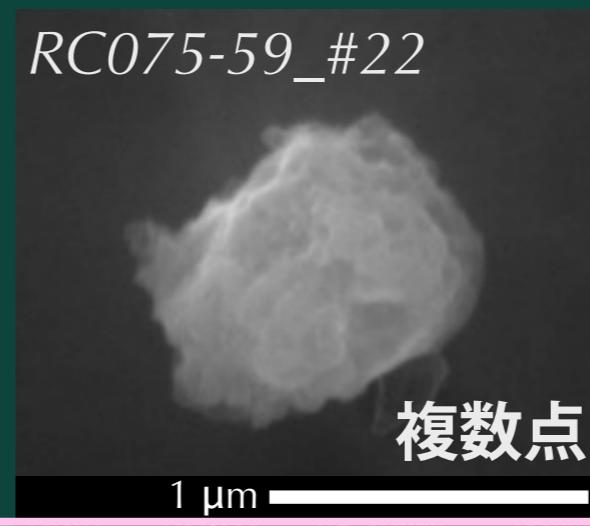
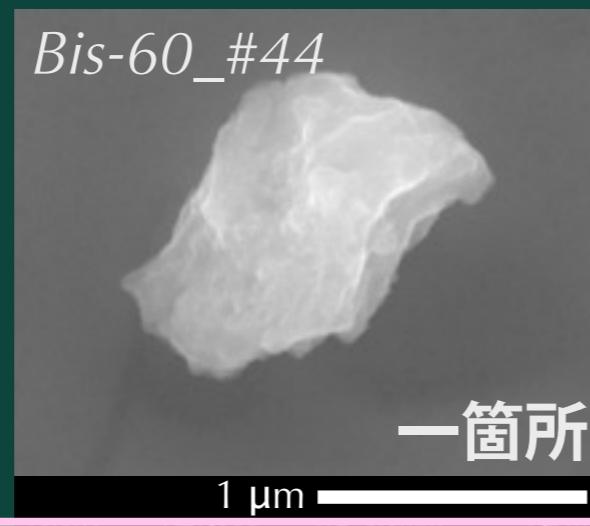
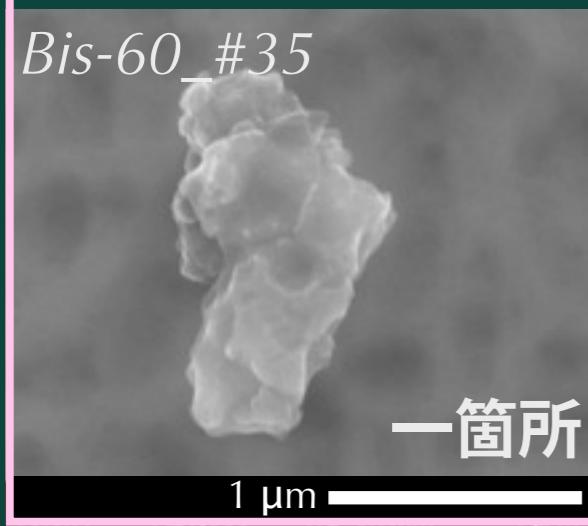
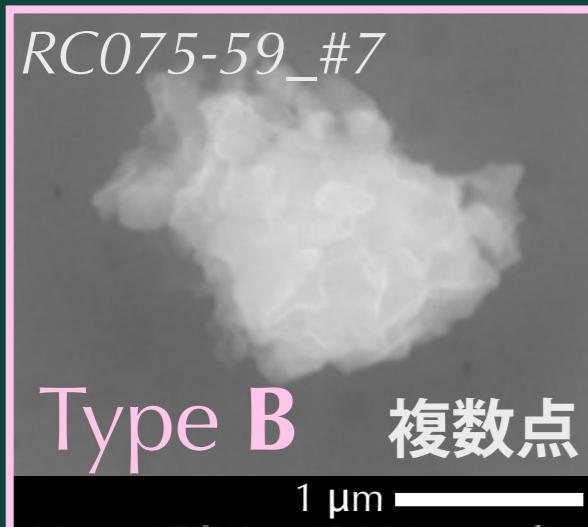
3) HClO_4

$190\text{-}200^\circ\text{C}, 2\text{ hrs}$



✓ 表面組織に変化はみられない

プレソーラーアルミナの表面構造

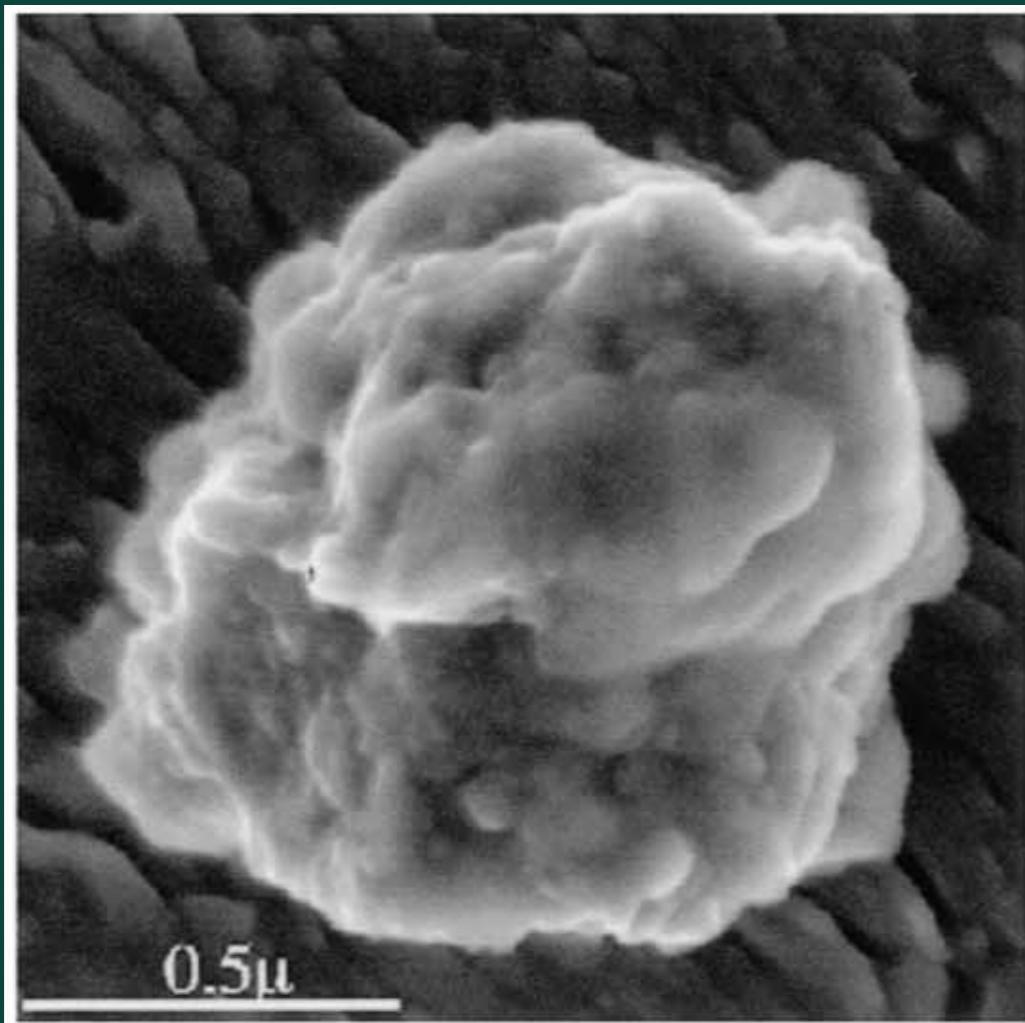


✓ Type B の表面構造は酸処理によるものではなく、宇宙空間で形成

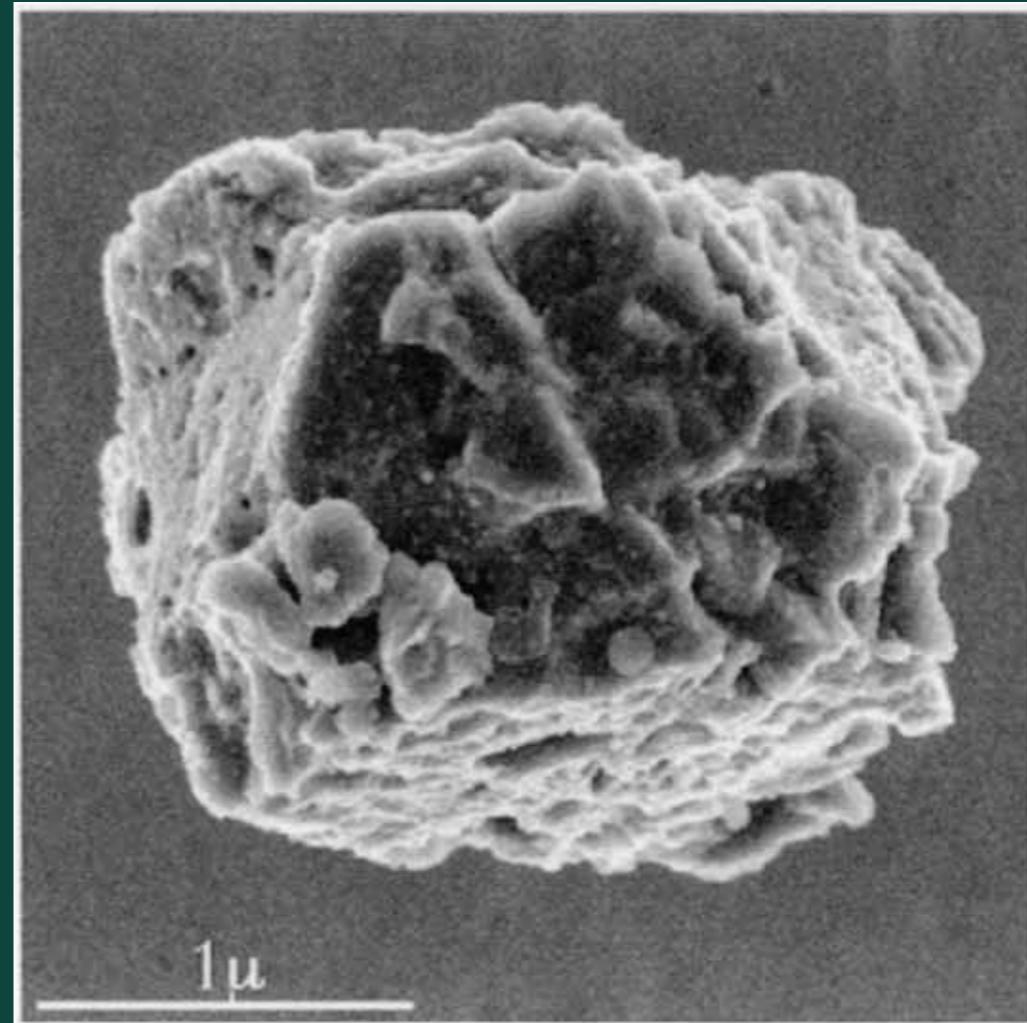
プレソーラーアルミナの表面構造

✓ Pristine SiC (Bernatowicz et al. 2003)

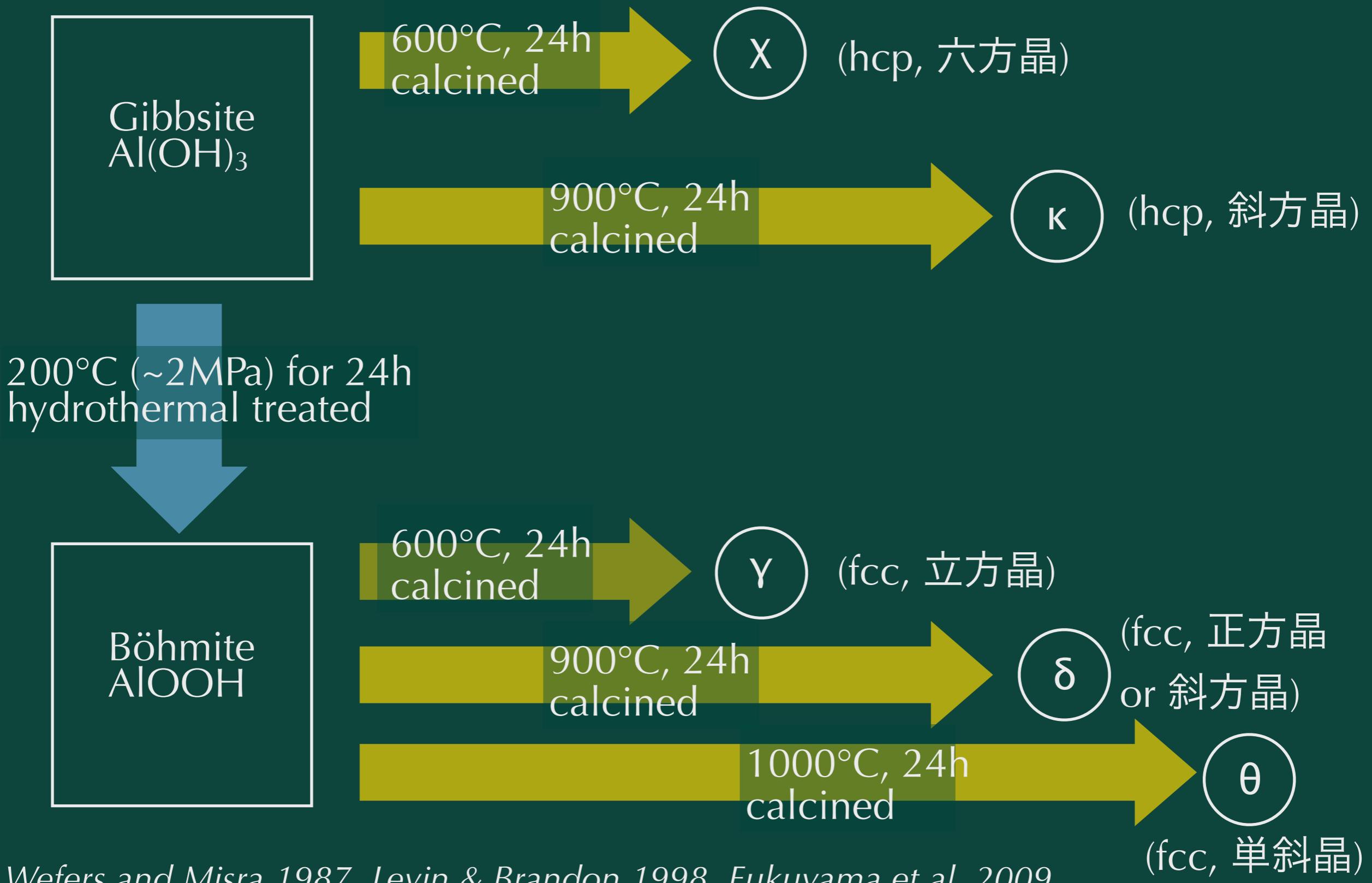
酸処理前



酸処理後

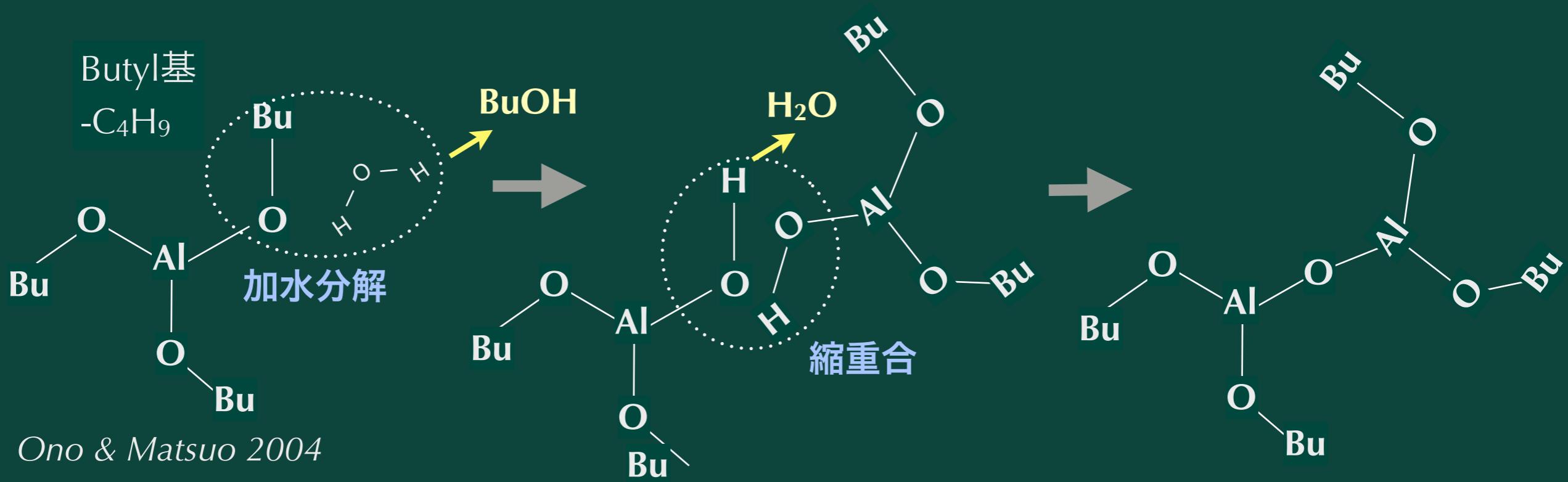


遷移Al₂O₃多形

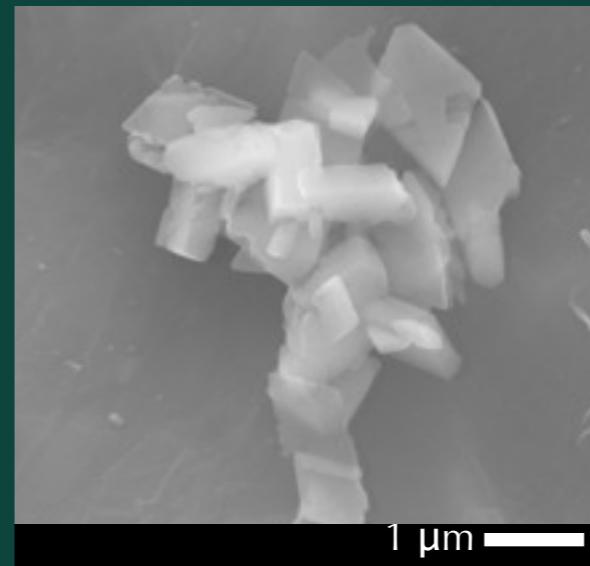
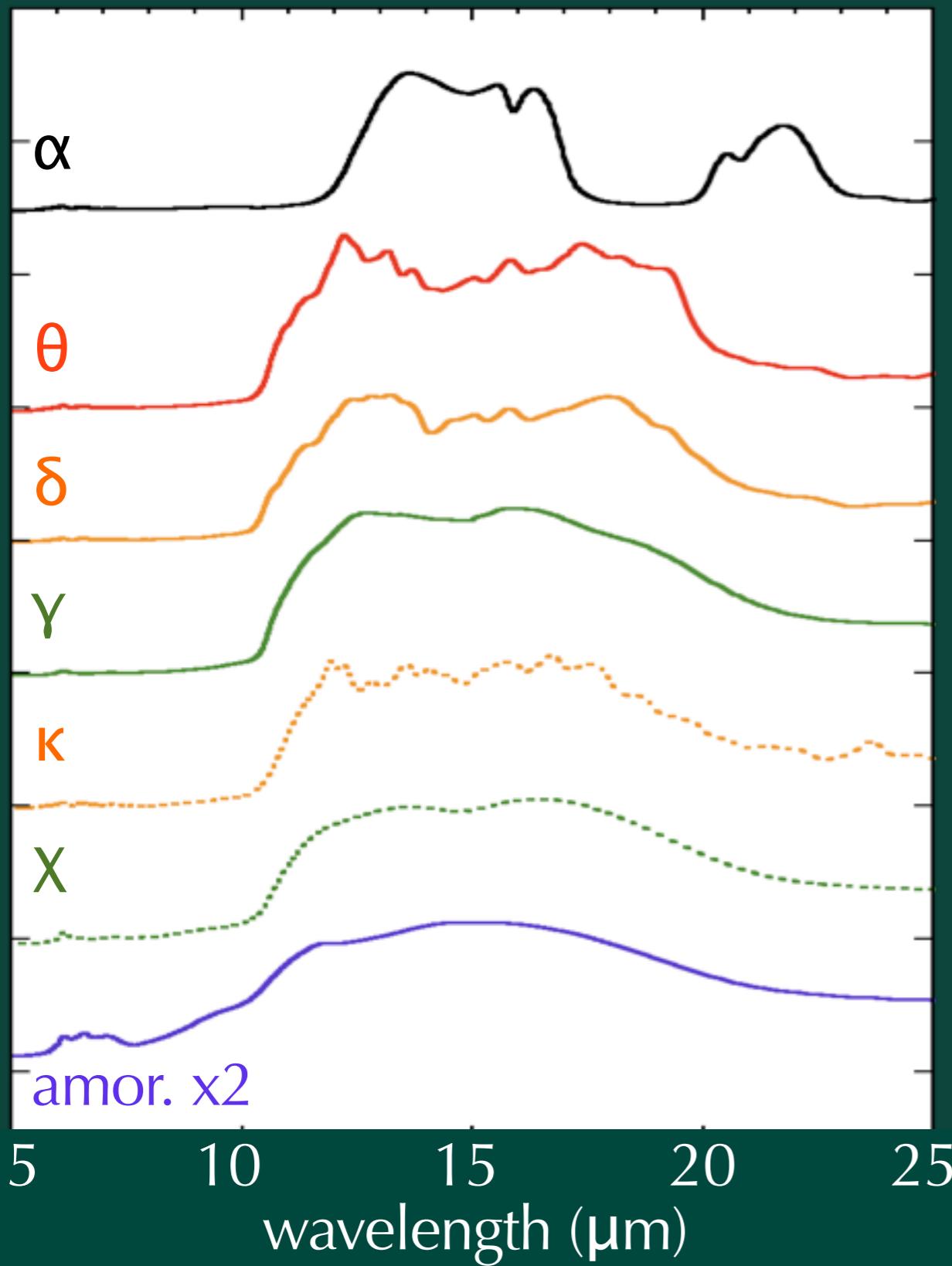


ゾルゲル法による非晶質アルミナ作成

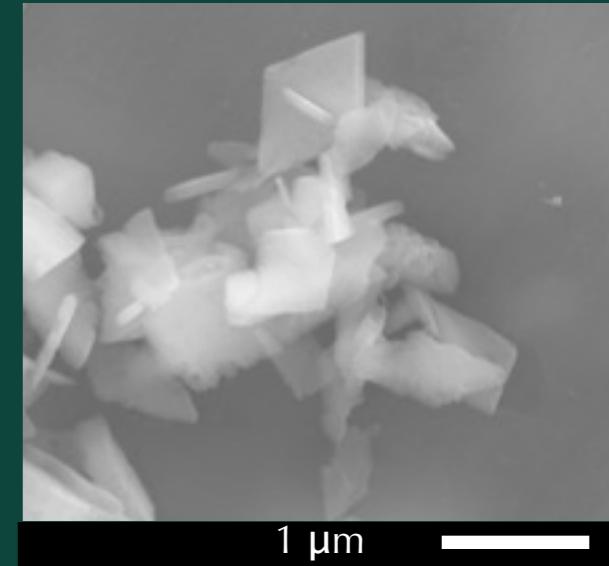
■ アルミニウム(III)sec-ブドキシドの加水分解・縮重合反応 → 500°Cで2hか焼
(Al(O-secC₄H₉)₃ or Al(OBu)₃)



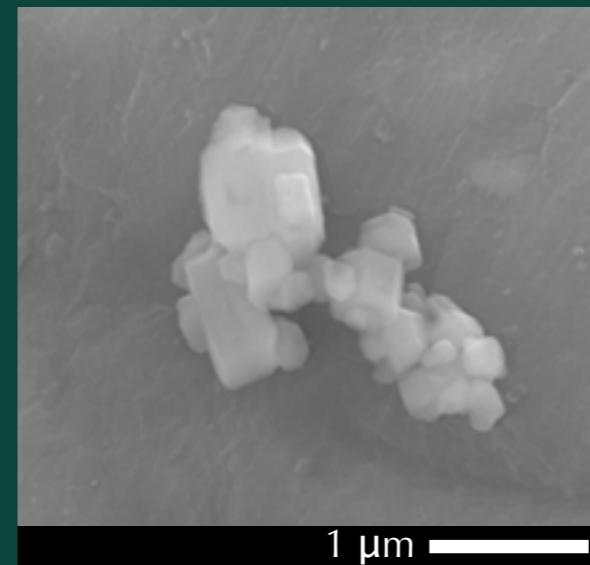
合成遷移Al₂O₃



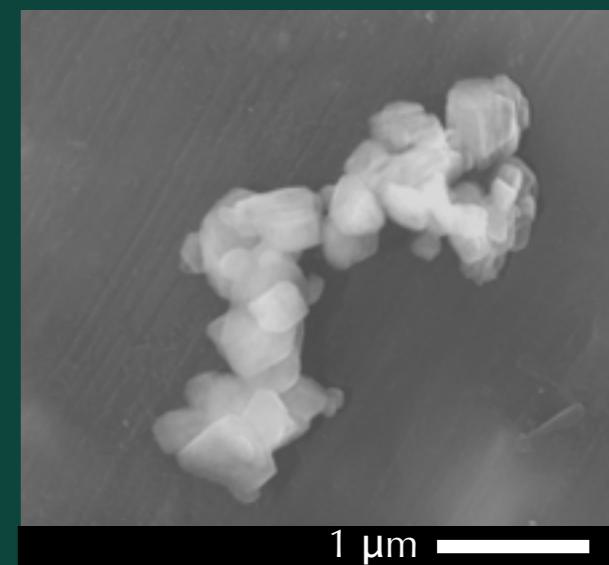
γ アルミナ



θ アルミナ



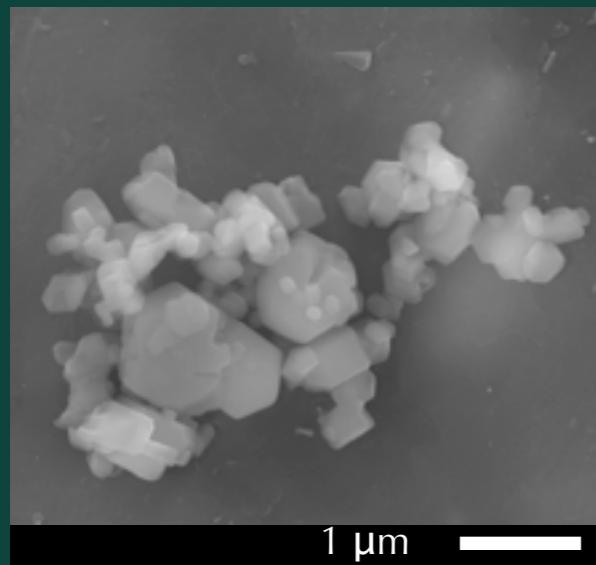
X アルミナ



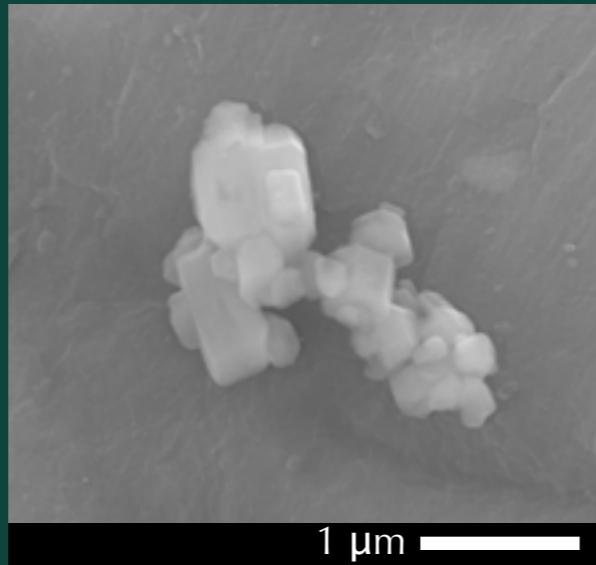
κ アルミナ

合成遷移Al₂O₃の酸溶解実験

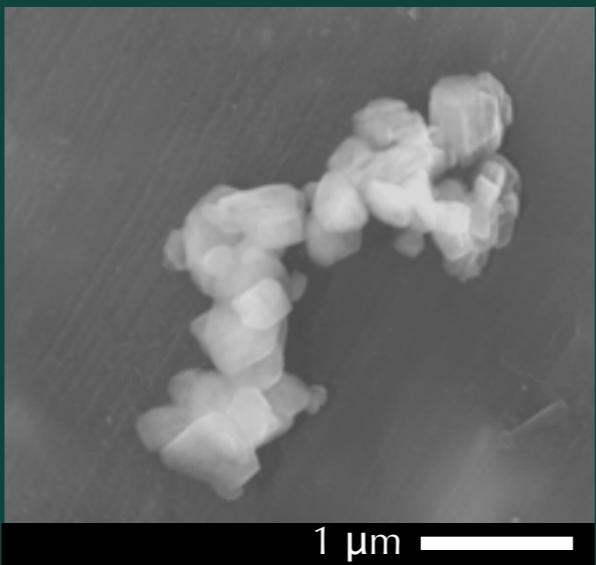
III XRD, FT-IRで生成物を確認



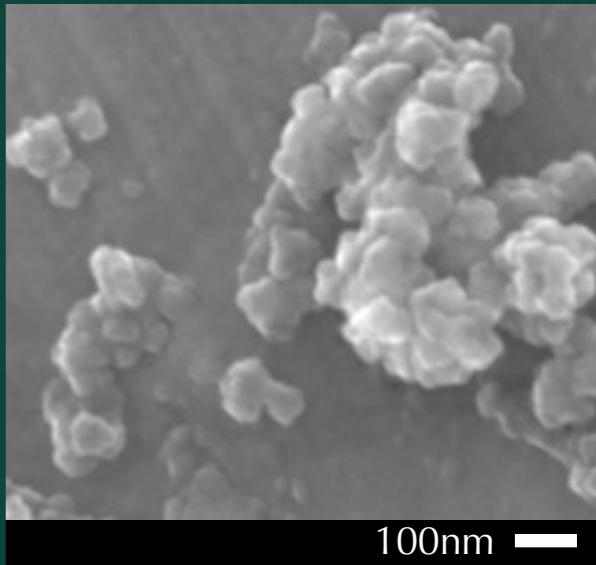
gibsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$)



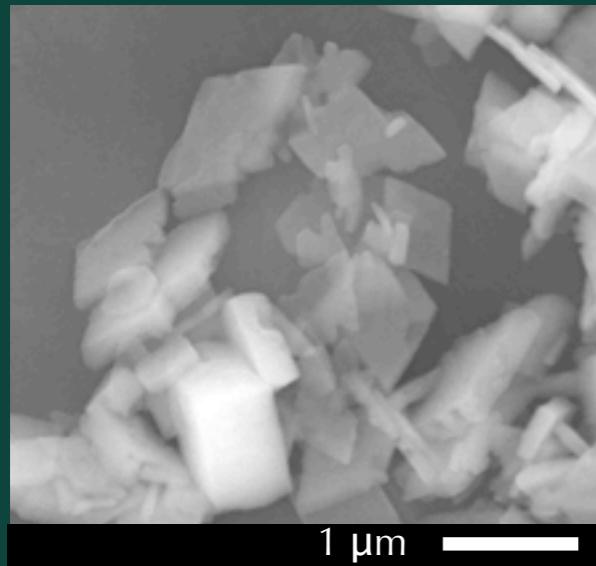
α アルミナ



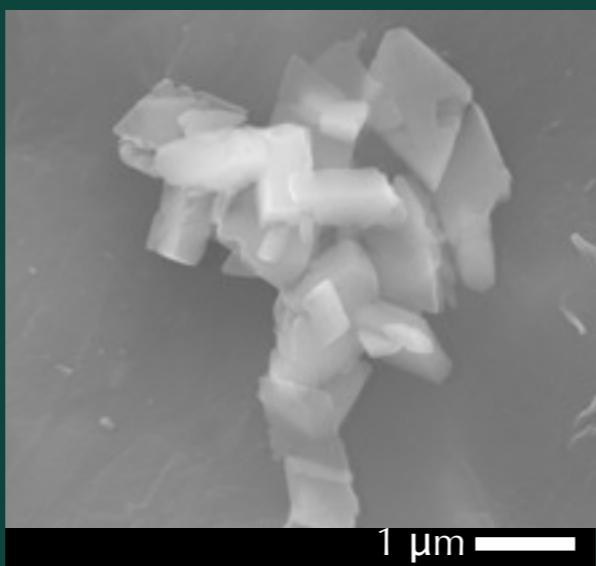
κ アルミナ



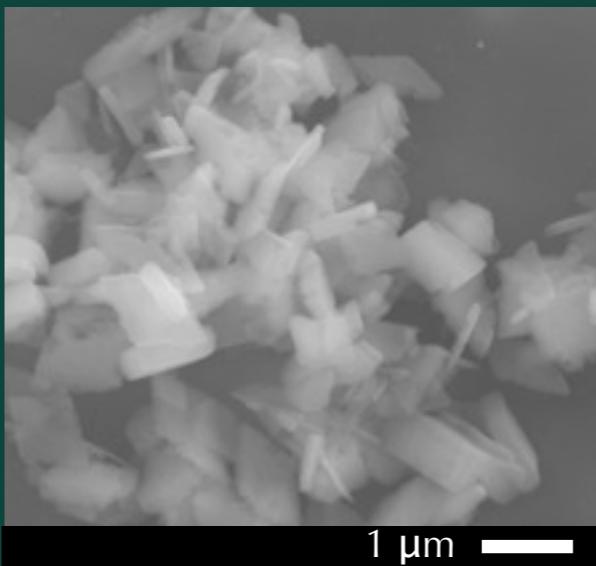
非晶質



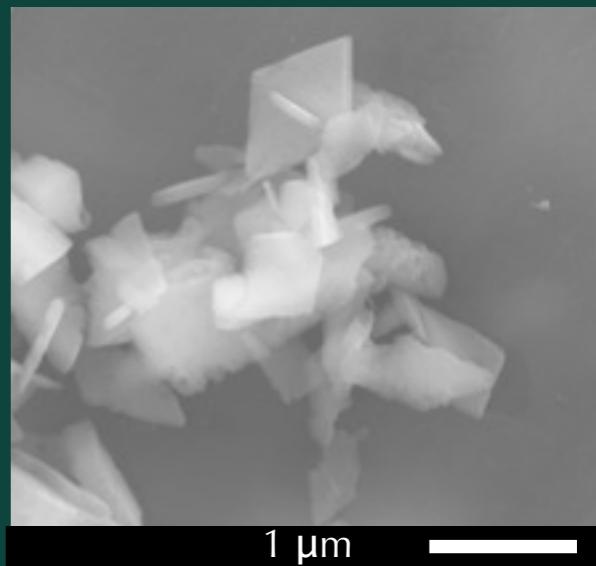
böhmite(AlOOH)



γ アルミナ



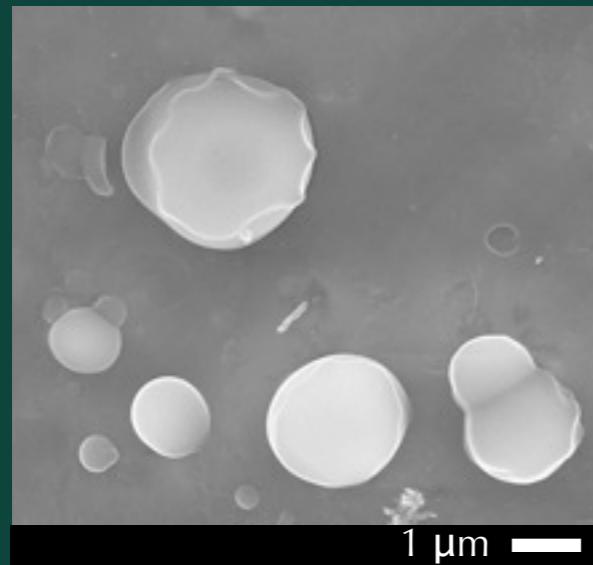
δ アルミナ



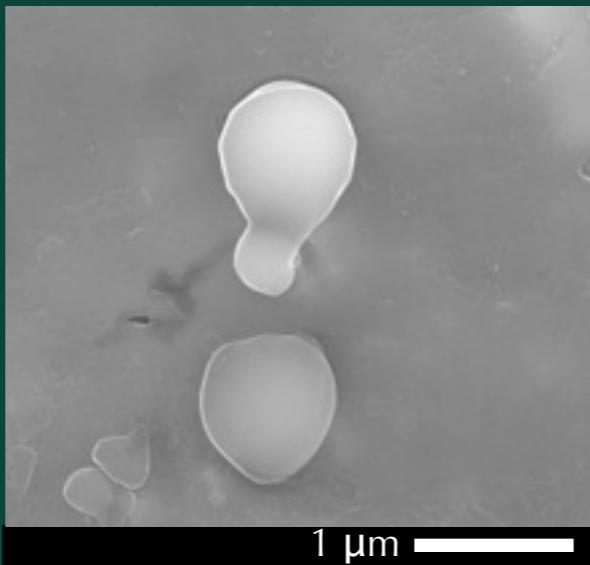
θ アルミナ

合成遷移Al₂O₃の酸溶解実験

1') HF - HCl 25°C, 24h



gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$)



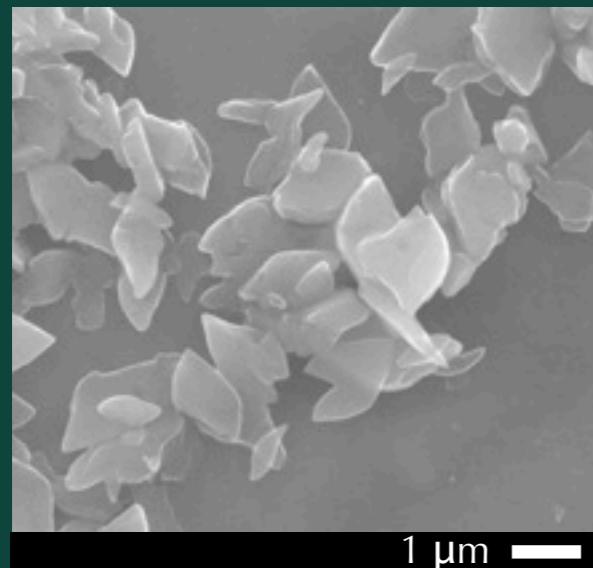
Xアルミナ



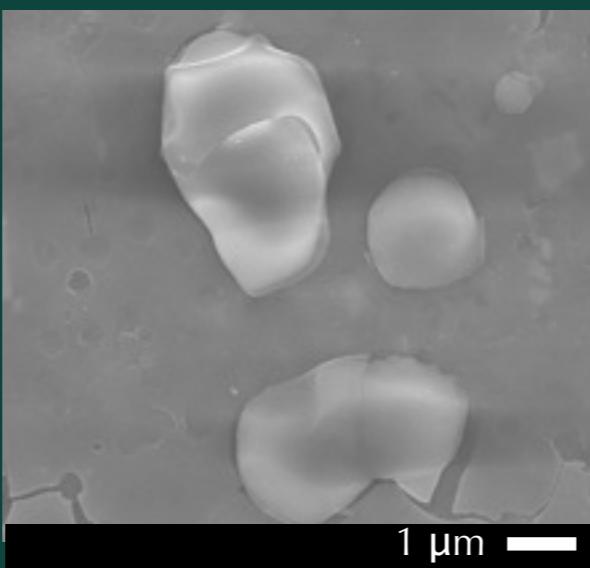
κアルミナ



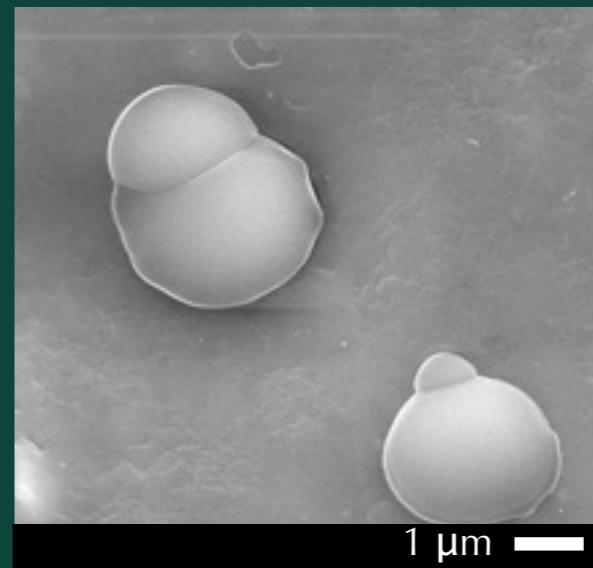
全部溶解



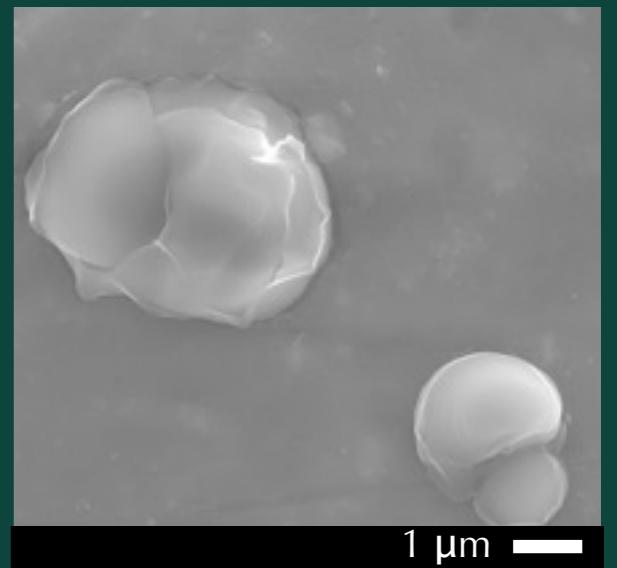
böhmite(AlOOH)



γアルミナ

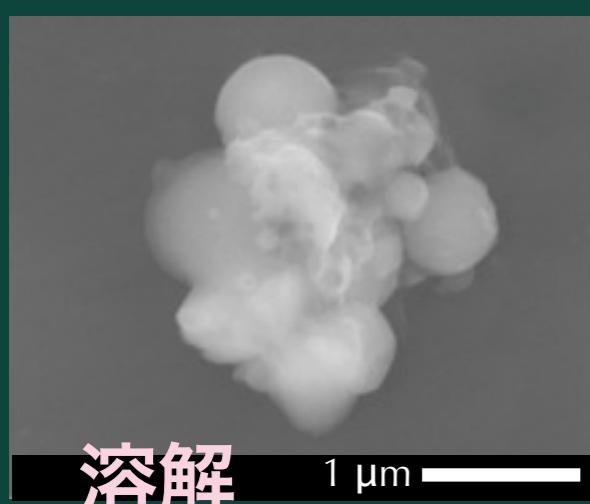
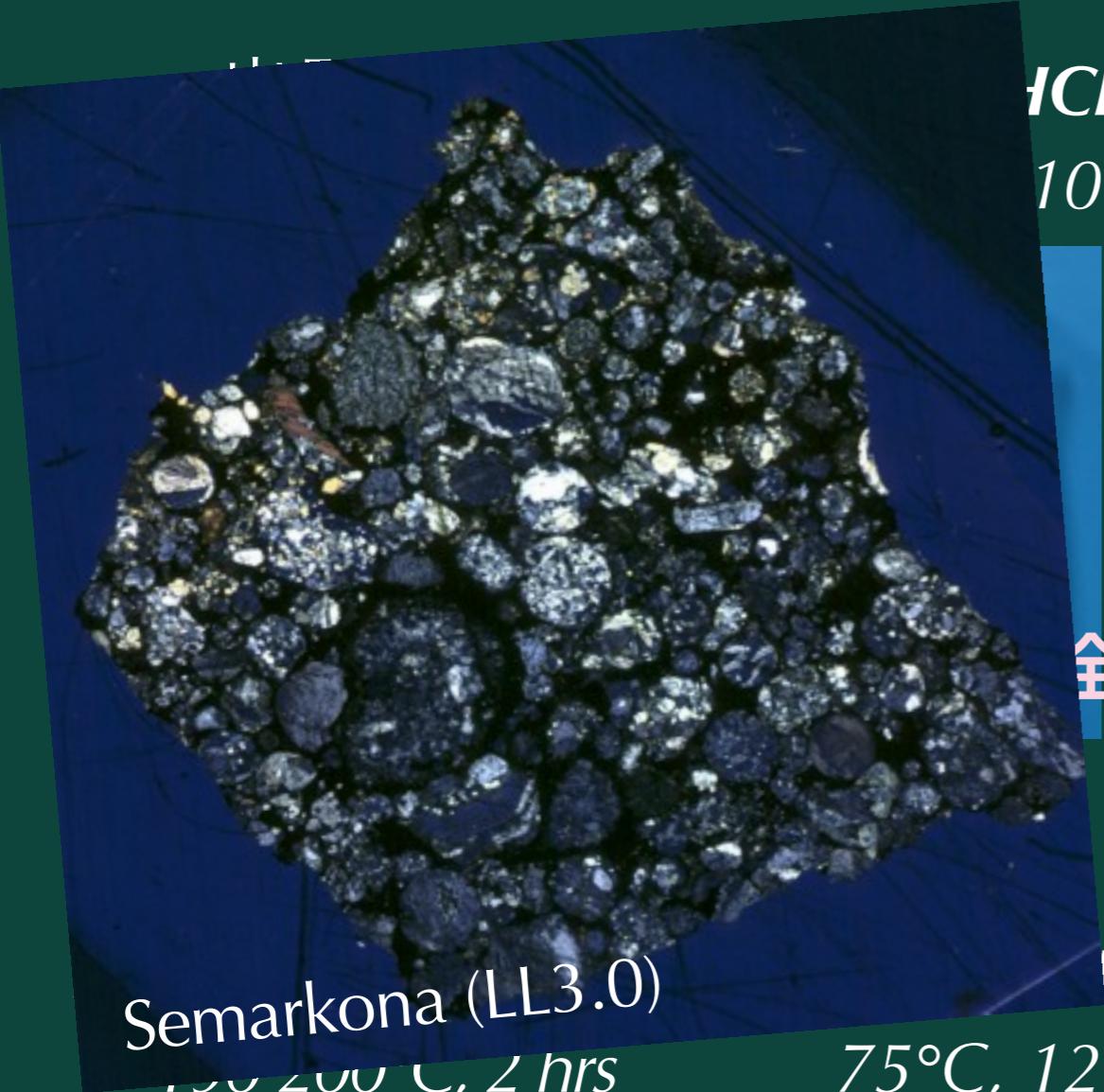


δアルミナ



θアルミナ

γ -Al₂O₃ 酸溶解実験

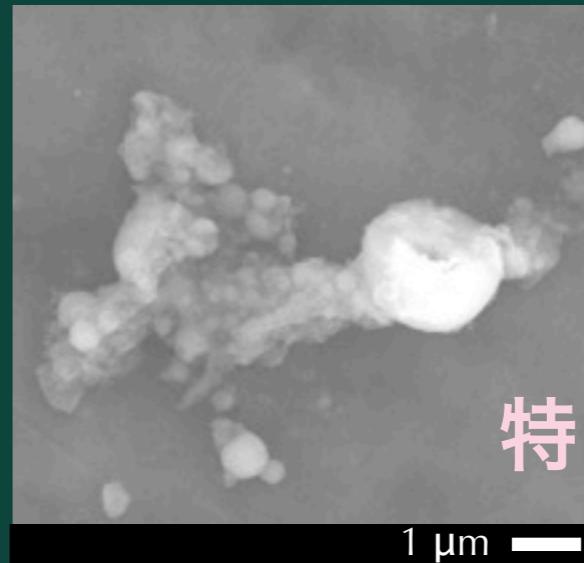


HCl
10 days

全部溶解

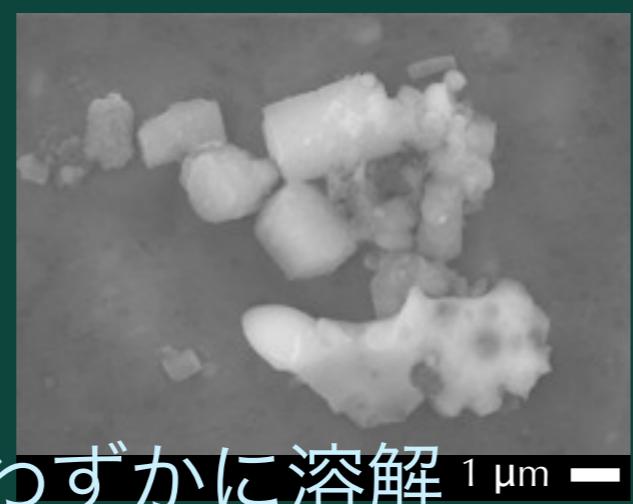
HF - HCl
25°C, 15hr

特にHFに溶解



K₂Cr₇O₄

75°C, 12 hrs



- ✓ 特にHFに容易に溶解
- ✓ 非晶質表面層があれば溶解
- ✓ 未発見のプレソーラー Al₂O₃ 相が存在する可能性

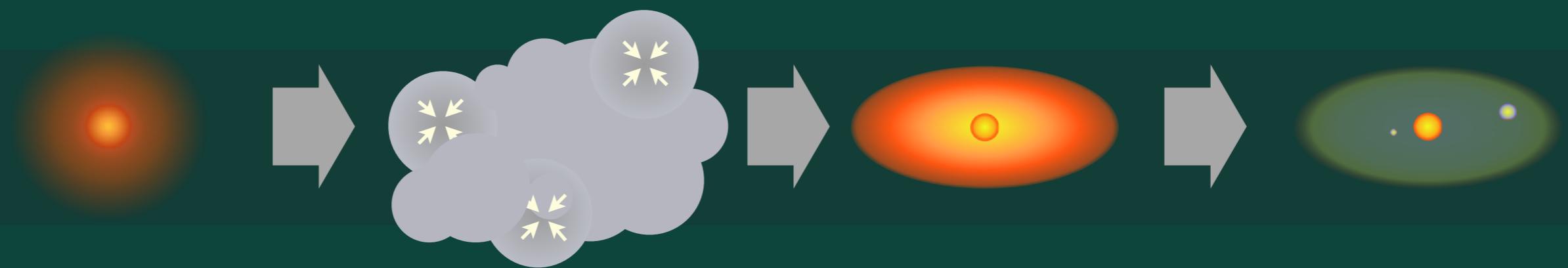
表面構造を形成した過程

晚期型星

分子雲

原始太陽系円盤

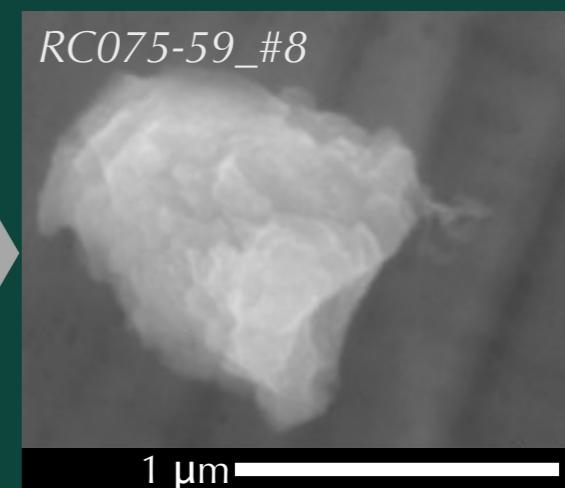
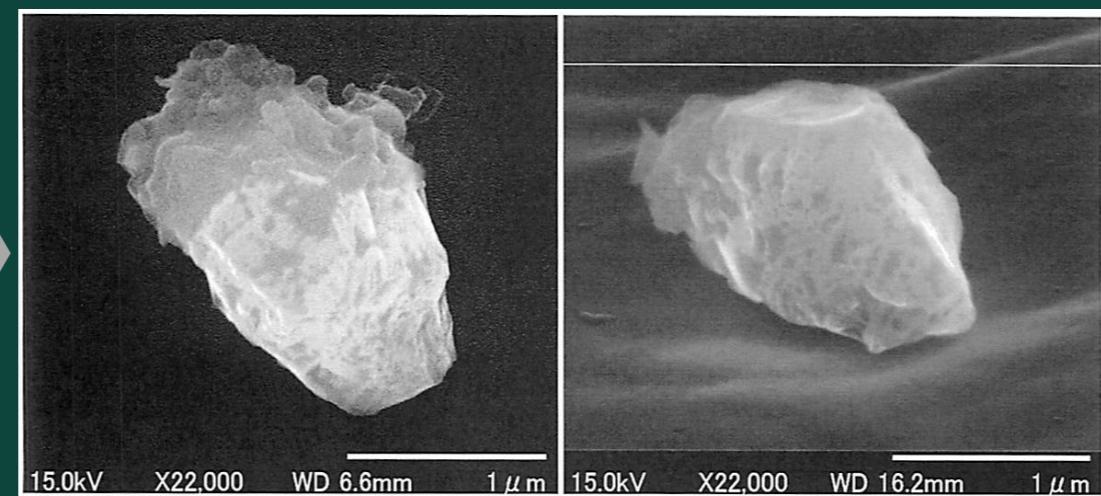
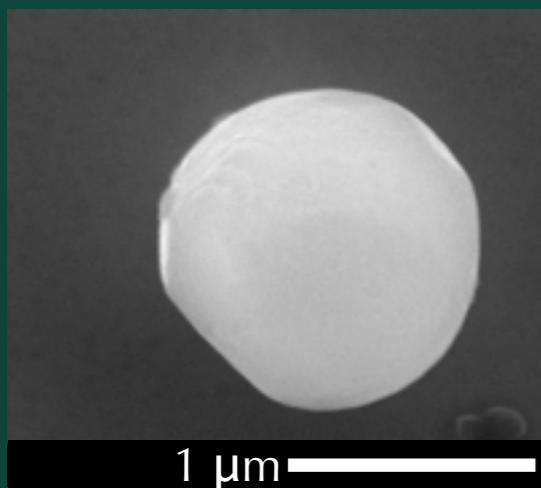
太陽系



元素合成
ダスト凝縮

破碎・非晶質化

蒸発・凝縮・結晶化・同
位体交換・*sputtering*



アルミナ表面構造／星間空間での非晶質化

- 衝撃波によるISMでのH⁺, He⁺のケイ酸塩への打ち込み (*Jaeger et al. 2003*)
10¹⁸ /cm² H&H+, 10¹⁷ /cm² He&He+, 半径~250nm粒子
- 430km/s (4keV) の一回のShockで40nmが非晶質化 (*Demyk 2001, 2004, Jones 1996*)
- 希ガス照射では非晶質化に必要な照射量がケイ酸塩より1桁高い
(*Wang et al. 1998*)
→ ISMで部分的な非晶質化が可能
- 初期太陽系の太陽風フラックスは今の1000倍 (*Lammer et al. 2008*)
i.e., solar wind flux 7.2x10⁹ /cm²s (He²⁺)
→ 原始太陽系円盤表面で太陽風が照射されれば~5年で非晶質化

コランダム表面はスパッタリングによるもの
or 非晶質化・準安定相に覆われていた可能性

プレソーラーアルミナの形成と進化

ケースI：typeB構造がISM起源

コランダム凝縮

presolar

スパッタリング
で表面非晶質化

presolar

Oishi + 1980, 1983

同位体
交換

solar

presolar

非晶質層
の溶解



ケースII：solar aluminaのtypeB構造がPP起源

コランダム凝縮

presolar

スパッタリング
で表面非晶質化

presolar

原始太陽系円盤
で表面非晶質化

solar

presolar

非晶質層
の溶解



Demyk 2001, 2004, Jones 1996
 $4 \times 10^9 \text{ yr}, \text{He}+ 10^{18} / \text{cm}^2$

まとめ

- ✓ 非平衡普通コンドライト中のアルミナ200粒子の形状・結晶構造の詳細分析
 - *typeA*と*typeB*の表面構造をもつ粒子が1/3ずつ
 - 87%が $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ と同定
- ✓ プレソーラーアルミナを9粒子発見
 - 7粒子が*typeB*表面構造
 - プレソーラーアルミナの結晶性は低い
- ✓ Al_2O_3 酸溶解実験
 - $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ の表面構造は酸処理で変化しない
 - 遷移・非晶質 Al_2O_3 は酸処理の過程で溶解(未発見プレソーラー Al_2O_3 ?)

プレソーラーコランダムの表面構造はスパッタリング起源