

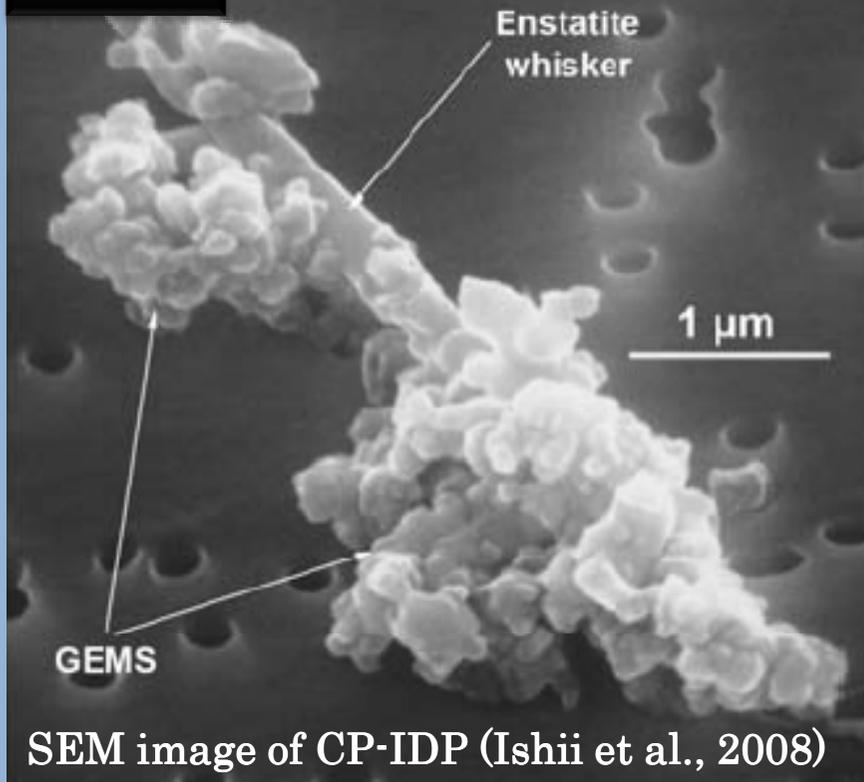
熱プラズマ装置を用いた GEMS模擬粒子合成実験

松野淳也¹, 八木下将史², 渡辺隆行², 土山明¹

¹大阪大学 大学院理学研究科,

²東京工業大学 大学院総合理工学研究科

CP-IDP



SEM image of CP-IDP (Ishii et al., 2008)

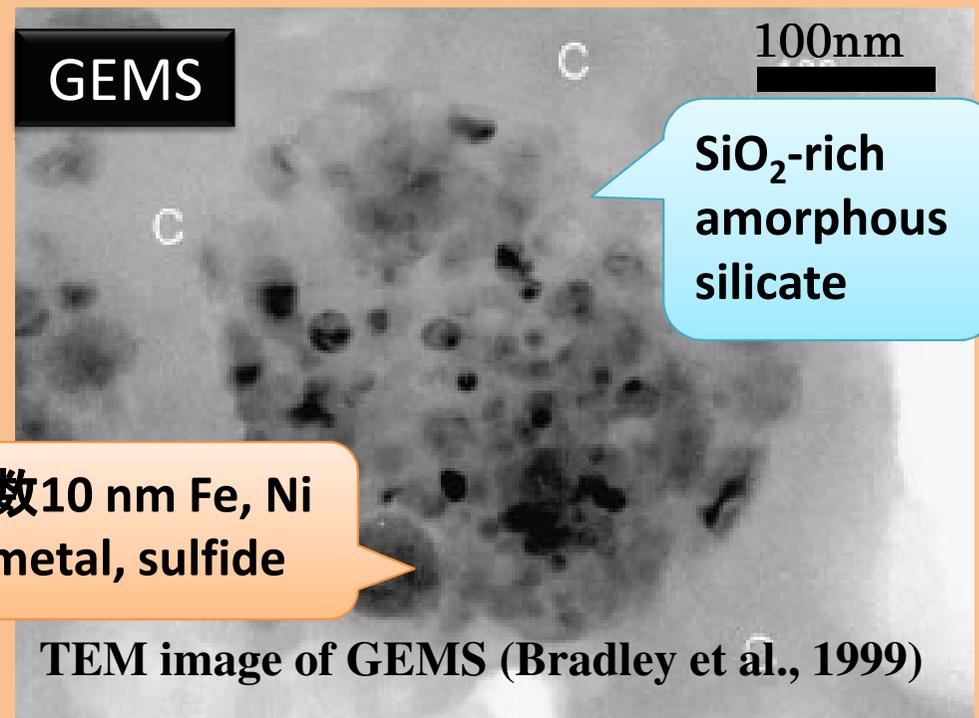
GEMS; Glass with Embedded Metal and Sulfide

- CP-IDPに一般的に見られる
- 隕石中には見られない
- 100-500 nm程度の丸い粒子
- 非晶質珪酸塩中に複数のFe, Niの metal, sulfideが埋め込まれた組織

CP-IDP; Chondritic Porous Interplanetary Dust Particles

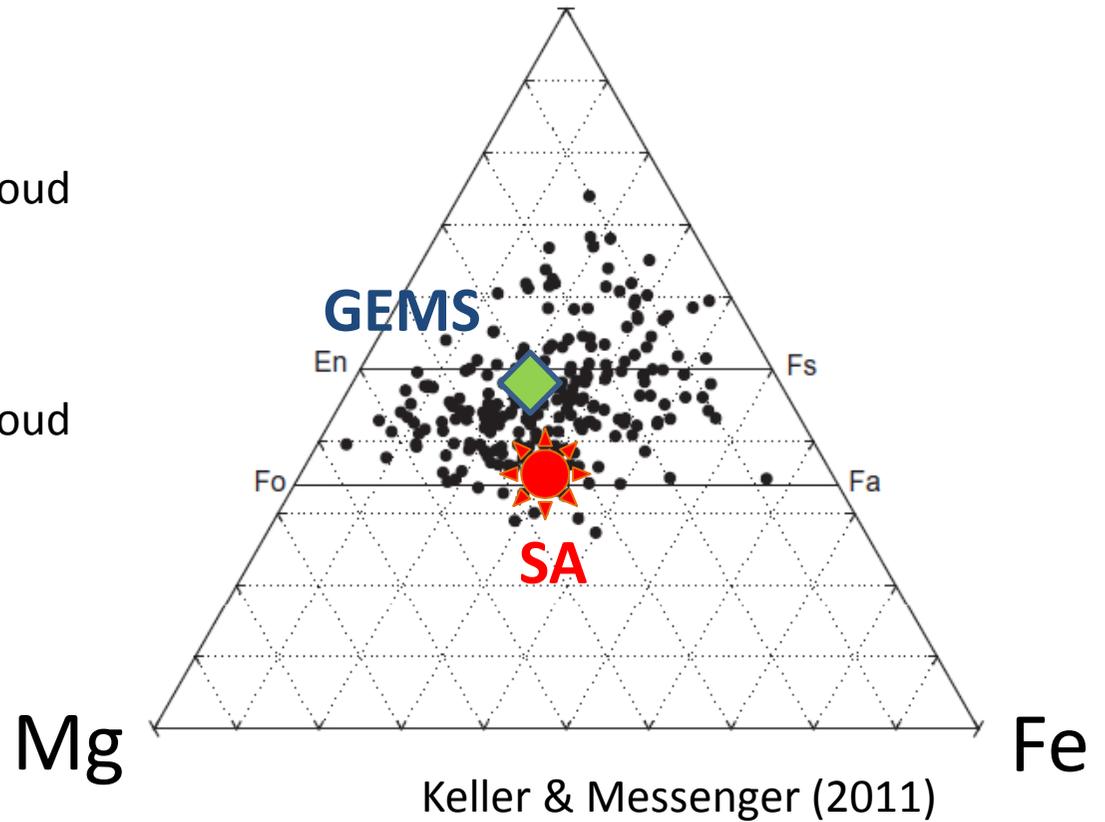
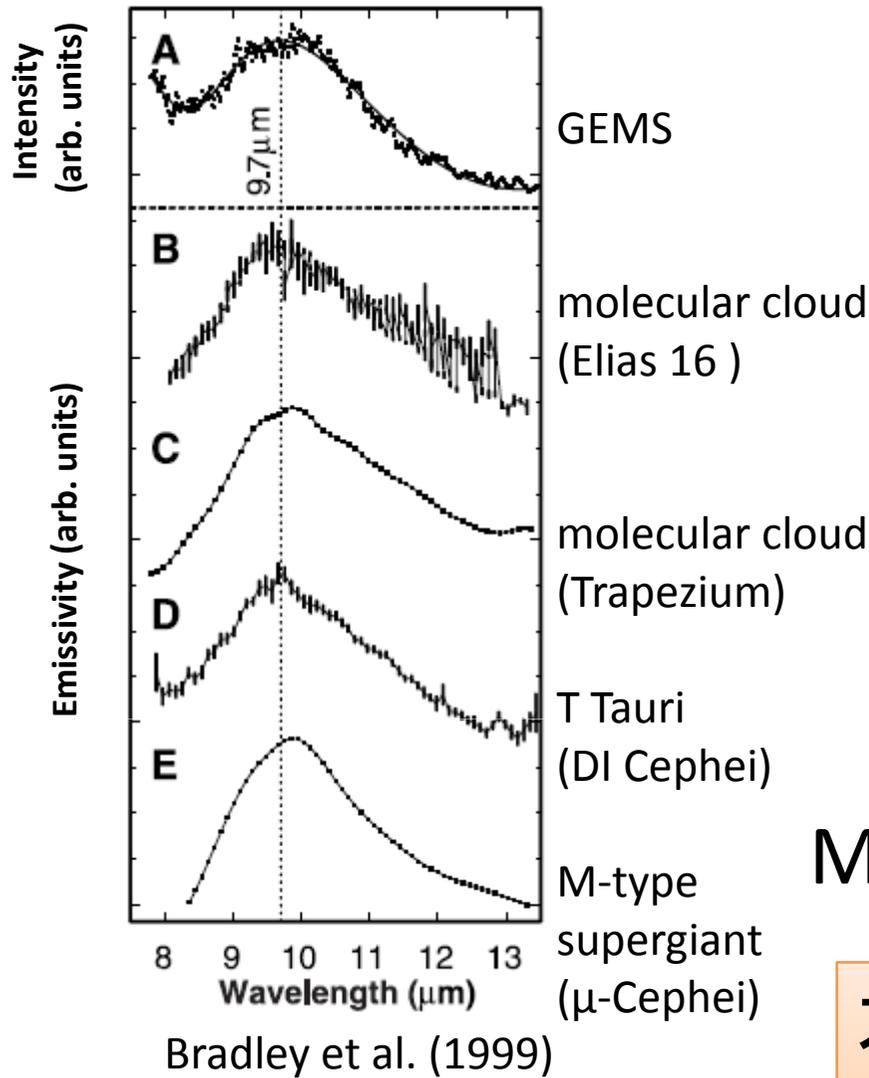
- 彗星起源と考えられる惑星間塵
- 平均組成はおよそ太陽組成
- 無水珪酸塩 (GEMS, enstatite, forsterite) + 有機物で構成

enstatite, forsterite: 高温凝縮物



TEM image of GEMS (Bradley et al., 1999)

GEMSの起源



太陽系外起源

- IRスペクトルが、星間塵のものと類似

太陽系内起源

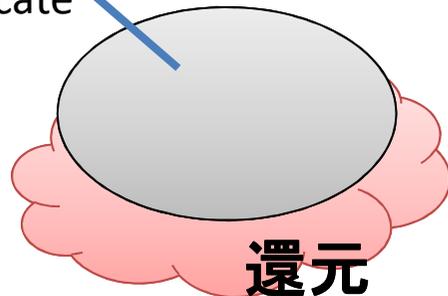
- 同位体比異常をもつ粒子が少なく、元素組成は不均一

GEMSのFe

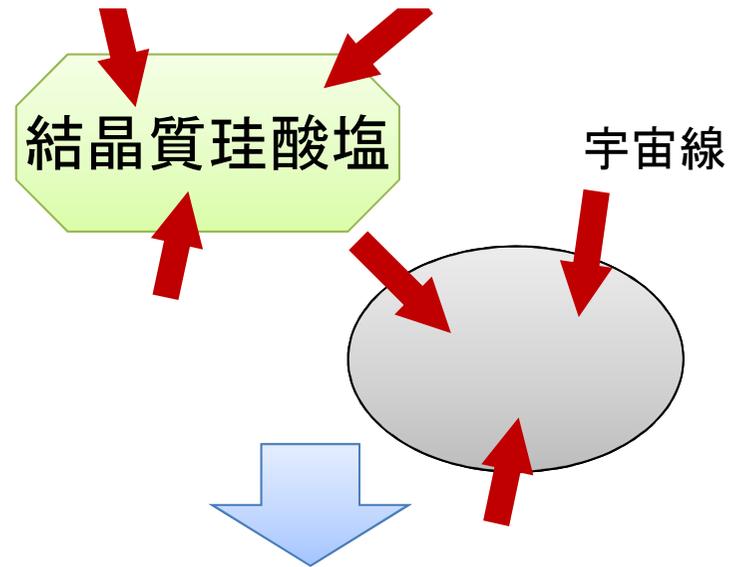


silicateと同時凝縮
(Keller & Messenger, 2011)

FeO-bearing amorphous silicate



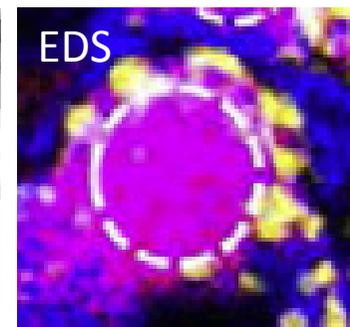
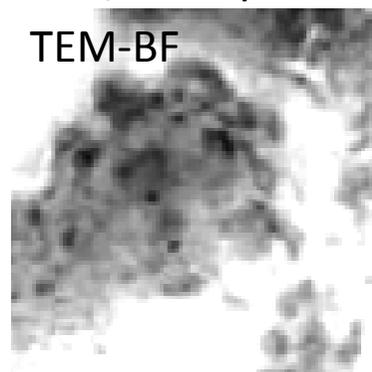
FeO-bearing amorphous silicateの還元
(Davoisne et al., 2006)



silicate への
sputter & deposited
(Bradley & Dai, 2004)

GEMSのS

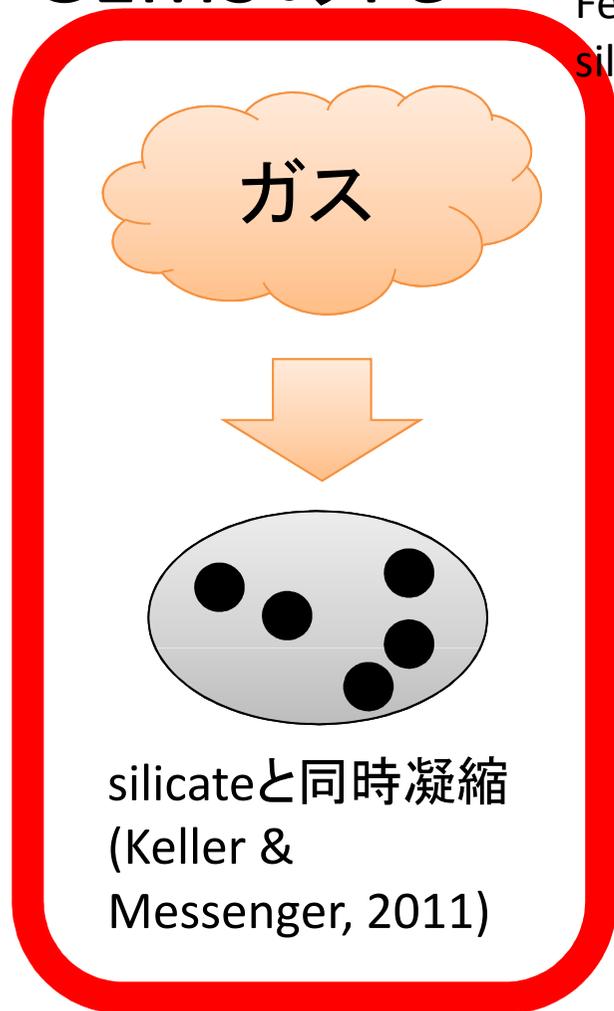
- GEMS粒子表面に存在
⇒ Sは最後にできた
(Keller & Messenger, 2011)



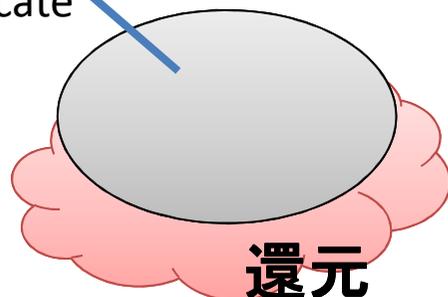
Si: 青
Mg: 赤
S: 黄

100 nm

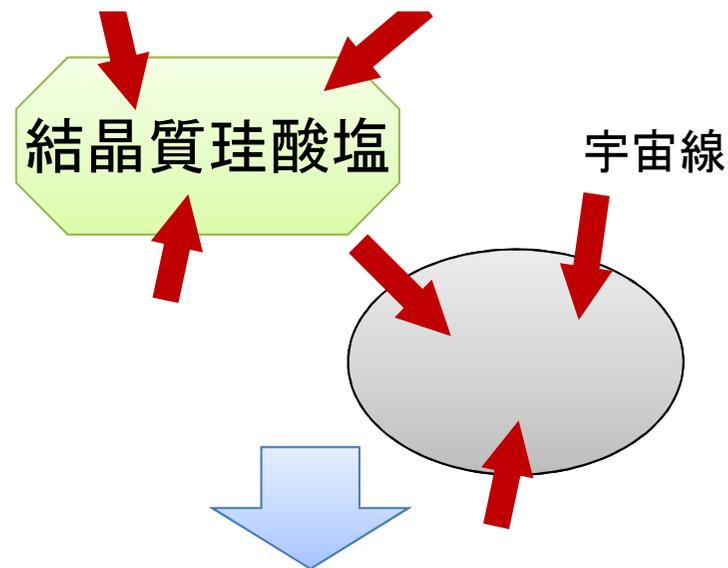
GEMSのFe



FeO-bearing amorphous silicate

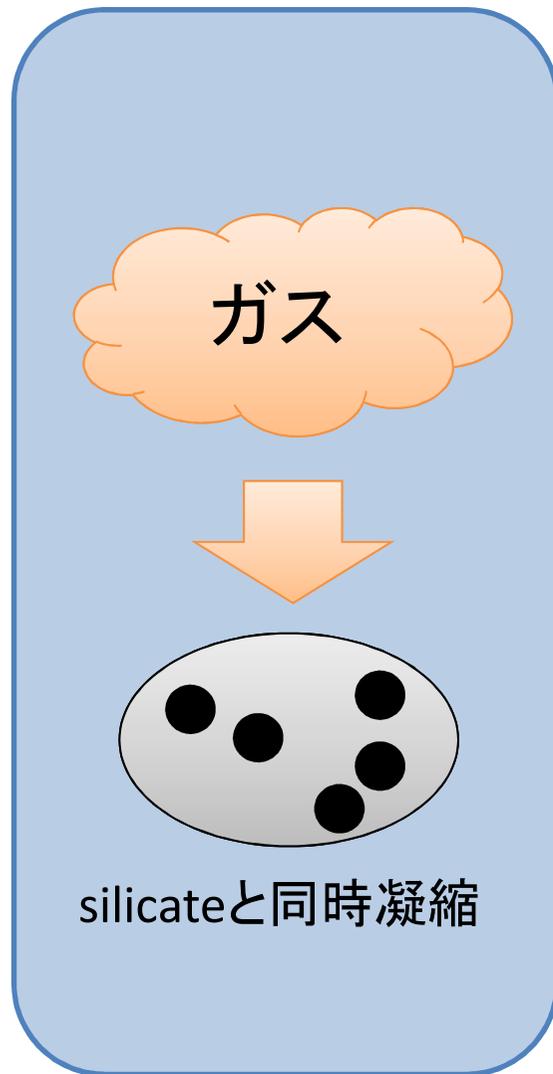


FeO-bearing amorphous silicateの還元
(Davoisne et al., 2006)



silicate への
sputter & deposited
(Bradley & Dai, 2004)

- FeO-bearing amorphous silicateを還元ガス(H₂)中で加熱すると、Fe (metal)は表面にできる (Matsuno et al., 2011, LPSC)



- GEMSが凝縮物である場合、非平衡凝縮したと考えられる
- 非平衡凝縮を模擬できる実験装置

⇒ RFプラズマ装置

- GEMS模擬粒子の合成を試みる
- GEMSの起源を考えたい

RFプラズマ装置を用いた微小粒子合成

原材料粉末
with Carrier gas

Ar Plasma

RF
power
supply

4 MHz
30 kW

1 atm

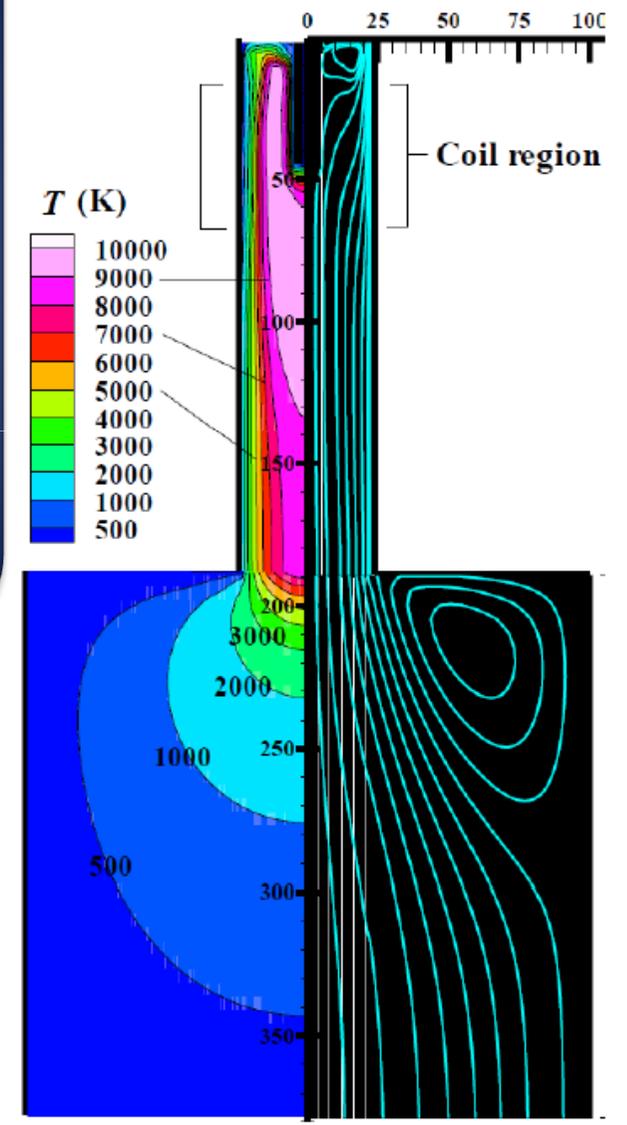
Nanoparticles

Inner chamber

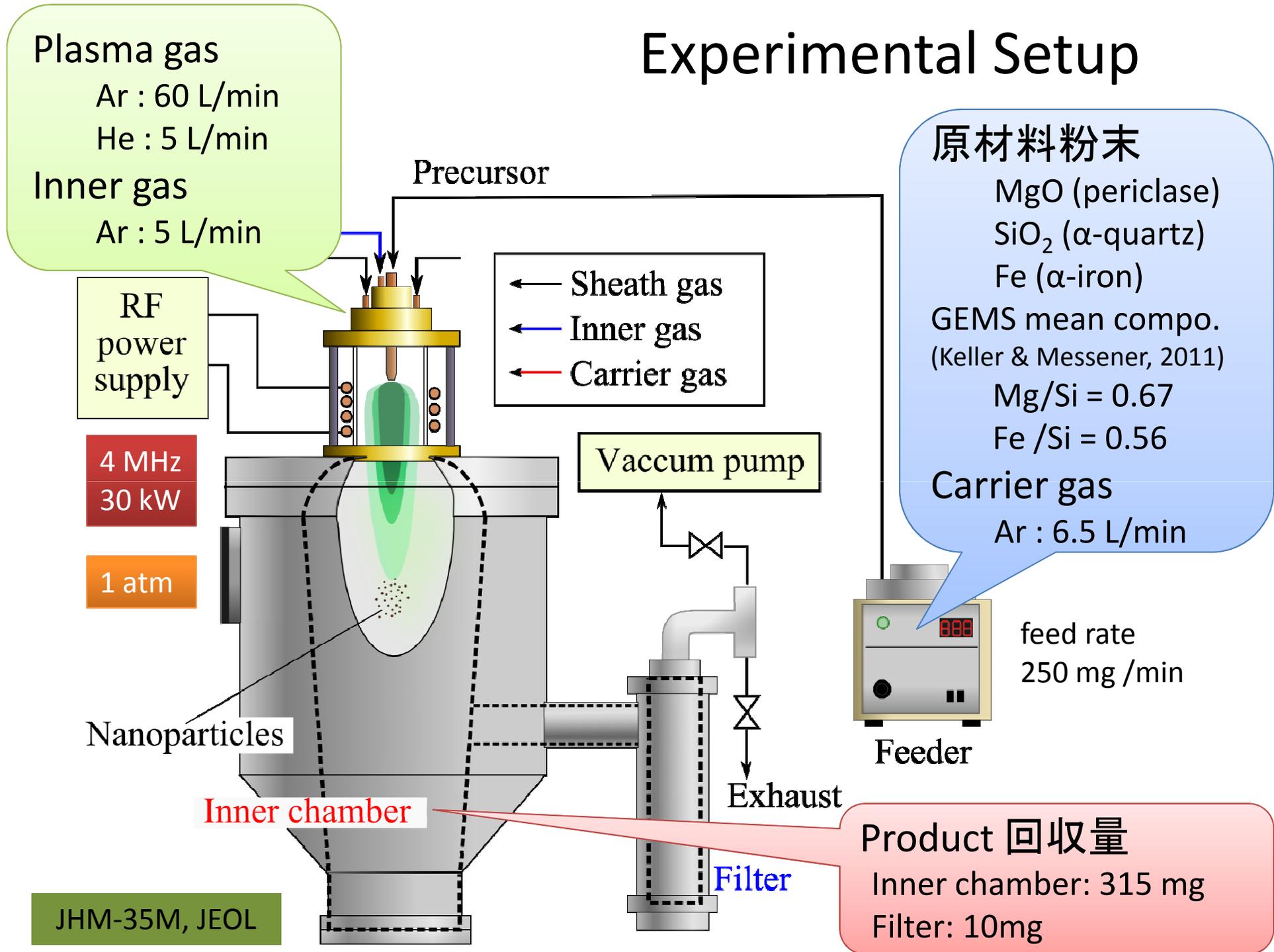
JHM-35M, JEOL

高温場 (~10000 K) と
急冷場 (10^4 - 10^5 K/s) の
作成が可能な大気圧
プラズマ
投入原材料はガス化
↓
非平衡凝縮した微小
粒子の作成が可能

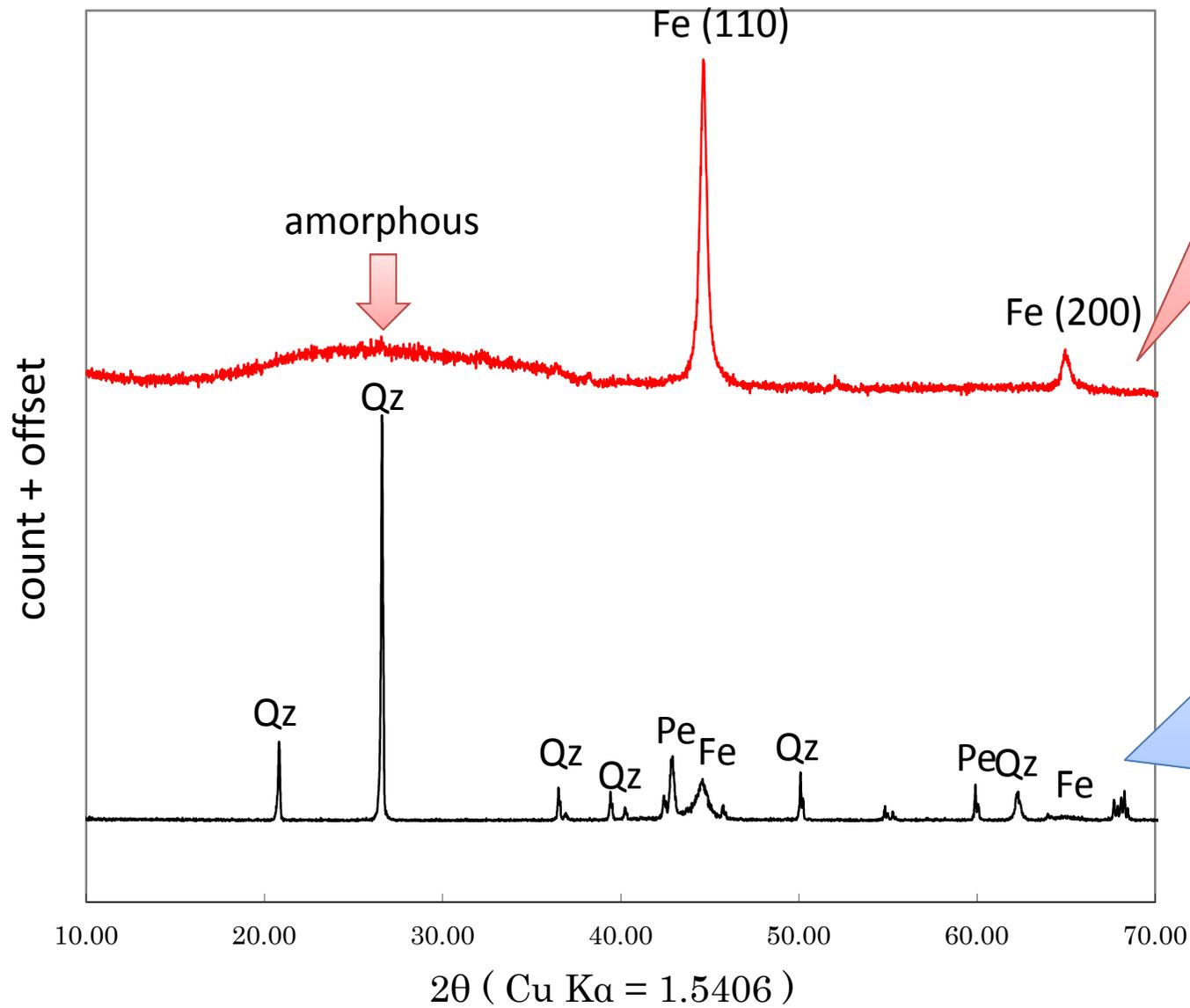
Product 回収



Experimental Setup



XRD



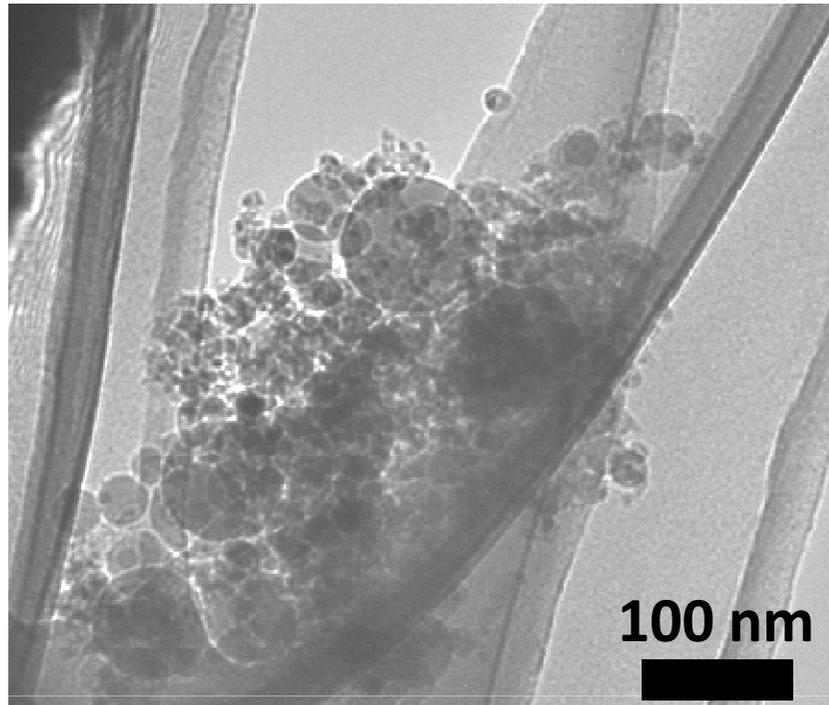
Product
amorphous
+ Fe (α -Iron)

原材料粉末
Pe: MgO (periclase)
Qz: SiO₂ (α -quartz)
Fe: Fe (α -iron)

- RINT, Rigaku
- 40kV, 40mA,

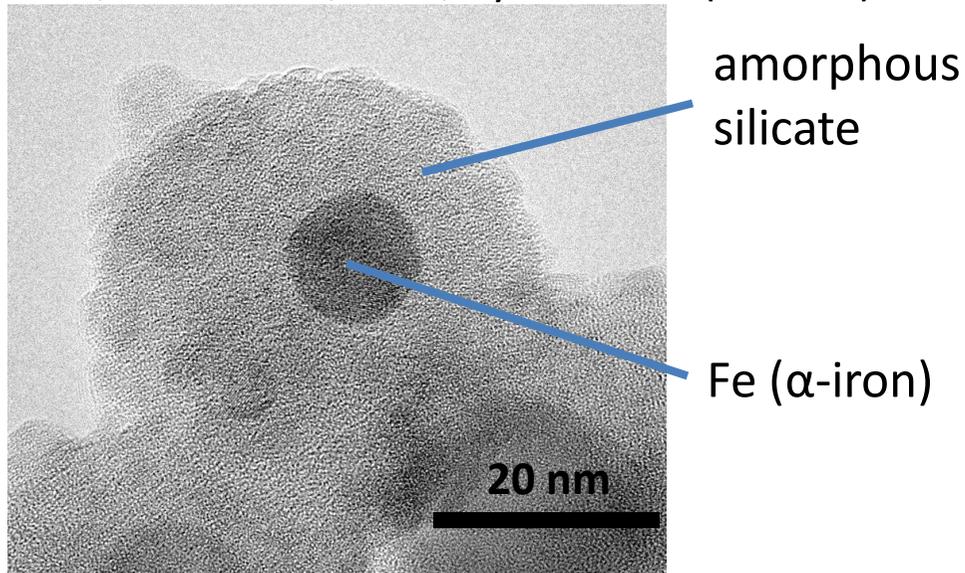
TEM observation

- 微粒子は直径100 nm以下
- Feは直径10 nm程度
- 1個のFeの周りに
amorphous silicateが纏う
(鉄は珪酸塩の中)



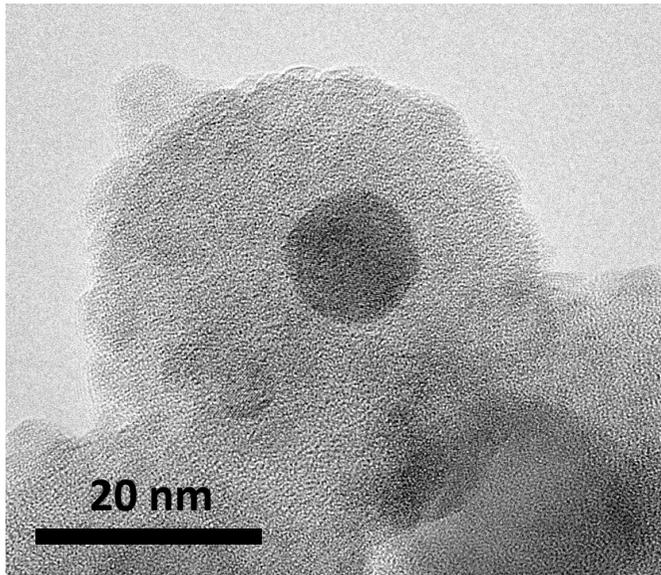
tilt: $-60^{\circ} \sim 60^{\circ}$ / step: 2°

STEM, JEM-2100F, JEOL, by 畠山さん(東工大)



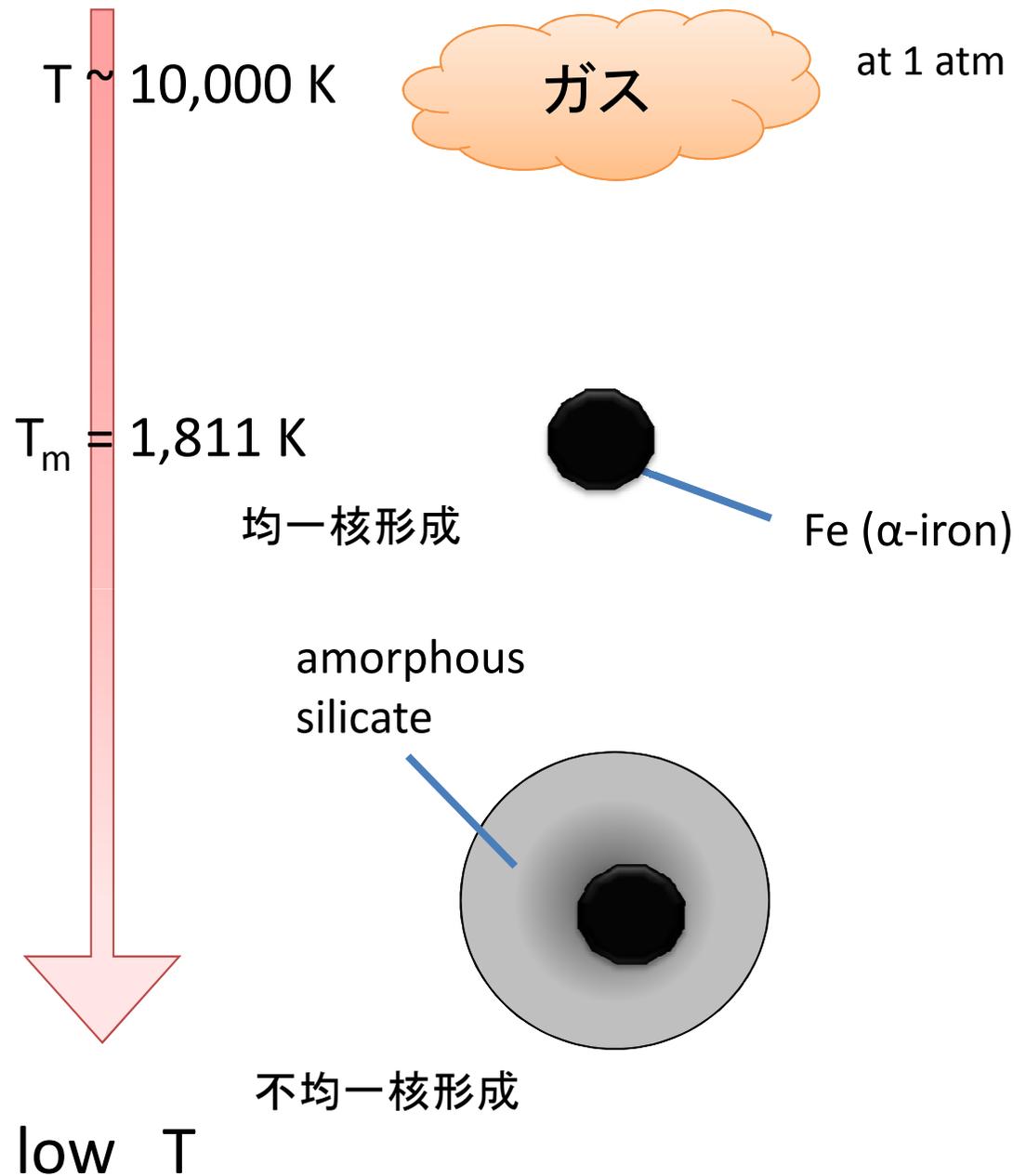
TEM-EDS	
Mg/Si	0.40
Fe/Si	0.18
O/Si	2.43
O _{sto.} /Si	2.40
Fe ²⁺ / Σ Fe [%]	13
Fe ⁰⁺ / Σ Fe [%]	87

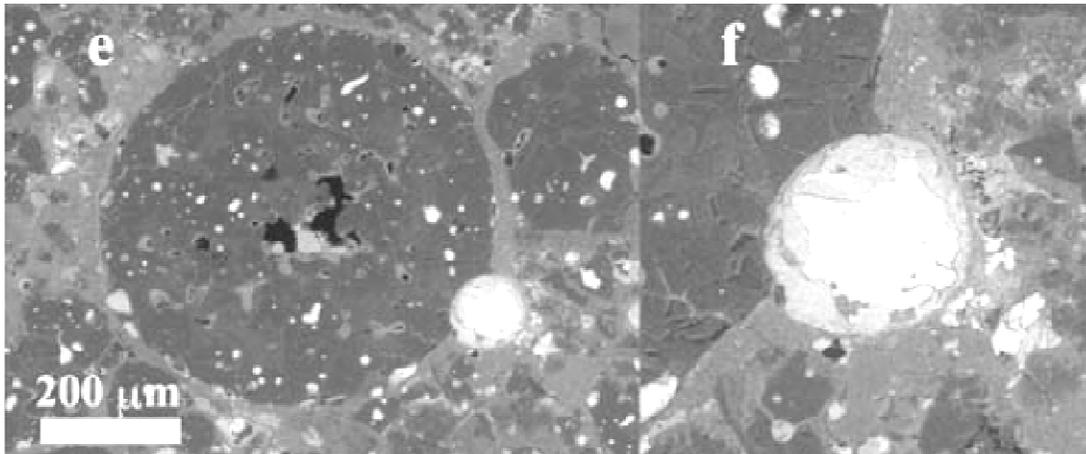
実験生成物の形成過程



実験生成物のTEM像

Feが先に凝縮し、
後からsilicateが凝縮
したように見える





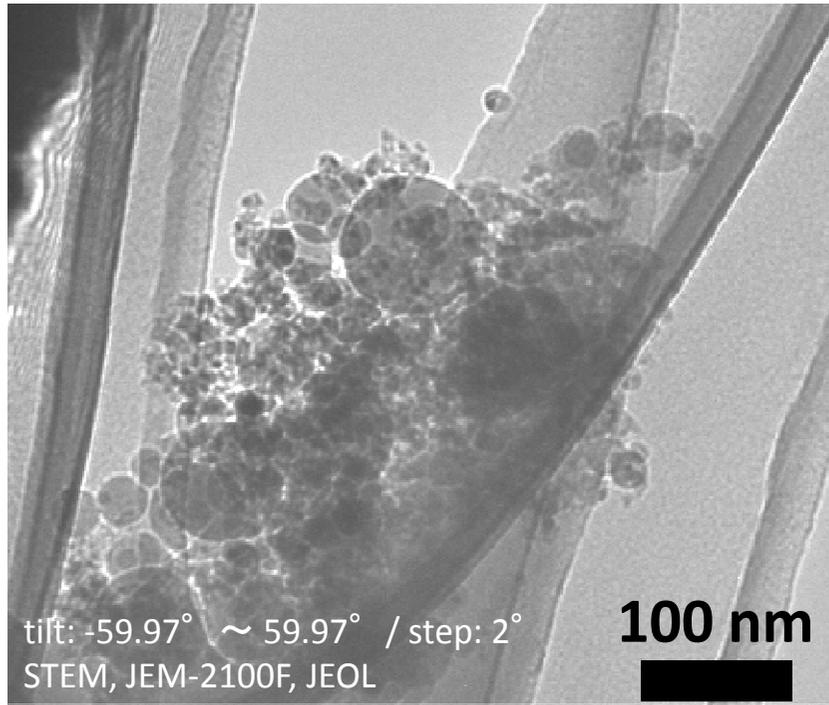
SEM images of chondrule from Y-81024 CO3 chondrite.
(Uesugi et al., 2008)

Feとsilicate meltの界面エネルギー

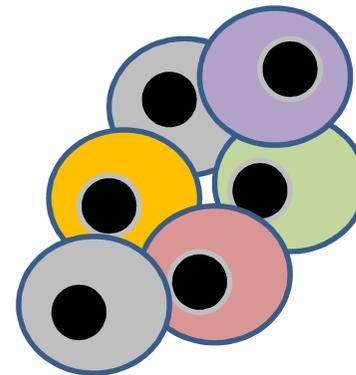
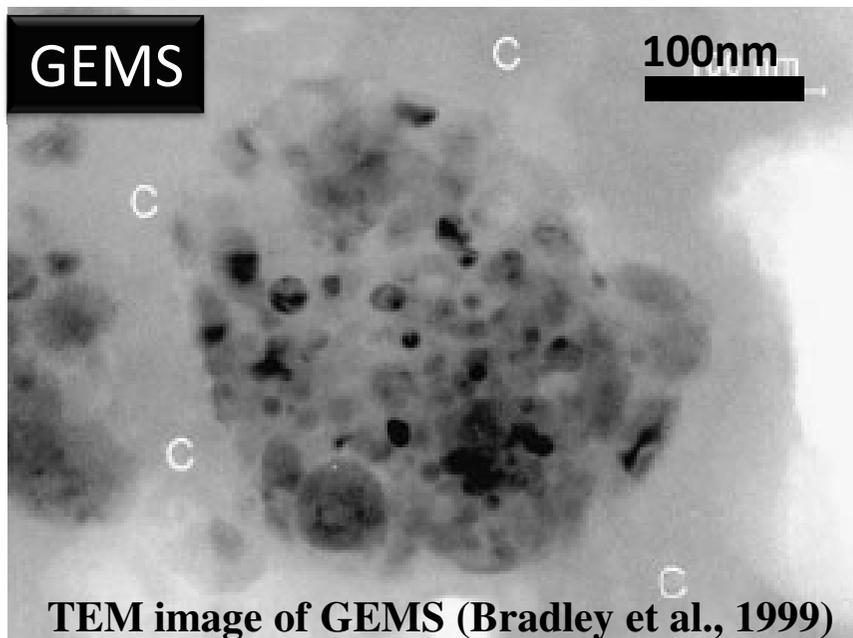
- ぬれは悪く、Feは長時間melt中に居れない
⇒急速成長した



GEMSの起源への応用



- 本実験の生成物を、silicateが結晶化しないようにannealすると、よりGEMSらしくなる
- GEMSが本実験のように一次粒子の凝集でできている
- 一次粒子の各々の起源の異なる
- 同位体比の異なるものが凝集していてもよい



実験系と宇宙の環境との対比 Yamamoto and Hasegawa (1977)

	$c_1(0)$ [cm ⁻³]	τ_T [sec]	Λ
novae	10^5	10^7	10^1
AGB stars	10^{11}	10^7	10^6
primordial solar nebula (at 0.1 AU)	10^{13}	10^8	10^9
this study (RF plasma)	10^{16}	10^{-1}	10^3

species: silicate, 分子量 $M = 100$, 付着確率 $\alpha_s = 1$, 平衡温度 $T_e = 1000$ K, 単量体の球相当半径 $a_0 = 2.3$ Å, $h/kT_e - 1 = 50$

Λ : 凝縮の環境を表す因子, μ : 粒子の物性を表す因子

$$\tau_{\text{sat}} = \frac{\tau_T}{h/kT_e - 1},$$

$$\tau_T = \left| \frac{d \ln T}{dt} \right|_{T=T_e}^{-1}.$$

$$\tau_{\text{coll}} = (\alpha_s c_1(0) 4\pi a_0^2 \langle v \rangle)^{-1}$$

$$\Lambda = \tau_{\text{sat}} / \tau_{\text{coll}}.$$

本実験系は宇宙環境より物質の濃度が高く、冷却速度が高い

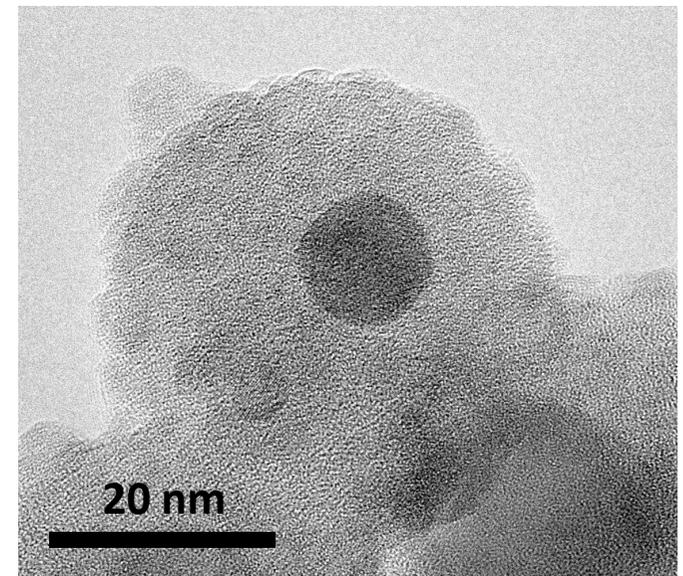
⇒ 今後、 Λ を振って実験を行う

future works

- この生成物の形成過程をつめる
 - 実験生成物のキャラクタリゼーション
 - silicate中の Fe^{2+} の割合
 - 核生成温度を変えた実験
 - Fe + SiO_2 , Fe +MgO系での実験
 - M +MgO + SiO_2 系での実験 (M:Feと融点の違う金属)
 - 界面エネルギーの検証
- GEMSの起源への応用
 - 実験系をより宇宙環境へ近づけていく(Λを振る)

summary

- RFプラズマをもちいて、 $\text{MgO}+\text{Fe}+\text{SiO}_2$ をガス化させ、凝縮実験を行った
- 実験生成物は、100 nm以下の非晶質珪酸塩中に10 nm程度の鉄が含まれる粒子であった
- GEMSの起源に迫るには、さらなる追実験が必要



実験生成物のTEM像