



1

アングライトについて

- エコンドライト隕石の一種で、現在67個の標本が確認されており、近年急速に標本数が増加している (Meteoritical Bulletin Database)
- 玄武岩質であり、一般に衝撃変成を受けておらず角礫化していない
- 揮発性元素に乏しく、難揮発性元素に富むバルク組成 (e.g., Keil, 2012)
- Angrite Fractionation Line (AFL) と呼ばれる固有の酸素同位体組成トレンドを持つ (Greenwood et al., 2005, 2017; Rider-Stokes et al., 2023)
- 古地磁気の痕跡などから、コア-マントル分離を経験した原始惑星由来と考えられている (e.g., Greenwood et al., 2005, 2017; Weiss et al., 2008; Kleine et al., 2012)



D'Orbigny



Meteoritical Bulletin Database改

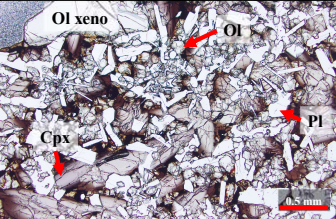
2

アングライトのサブグループ

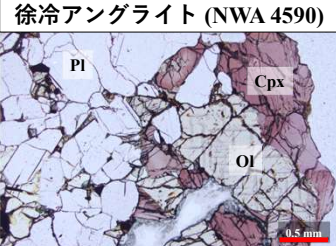
- 岩石組織に基づいて主に2種類に分けられる (e.g., Keil, 2012)
- **急冷アングライト**
 - ✓ 急冷組織
 - ✓ オリビンと輝石 (Cpx) に著しい化学的ゾーニング
 - ✓ オリビンの外来結晶がよく見られる
- **徐冷アングライト**
 - ✓ 等粒状または集積岩組織
 - ✓ 構成鉱物組成が比較的均質
 - ✓ オリビンにしばしば離溶組織

*この他に急冷および徐冷アングライトの特徴を併せ持つ **Intermediate (NWA 10463)** と構成鉱物のほとんどがオリビンの **Dunitic (NWA 8535)** がある (Meteoritical Bulletin Database)

急冷アングライト (NWA 13363)



徐冷アングライト (NWA 4590)

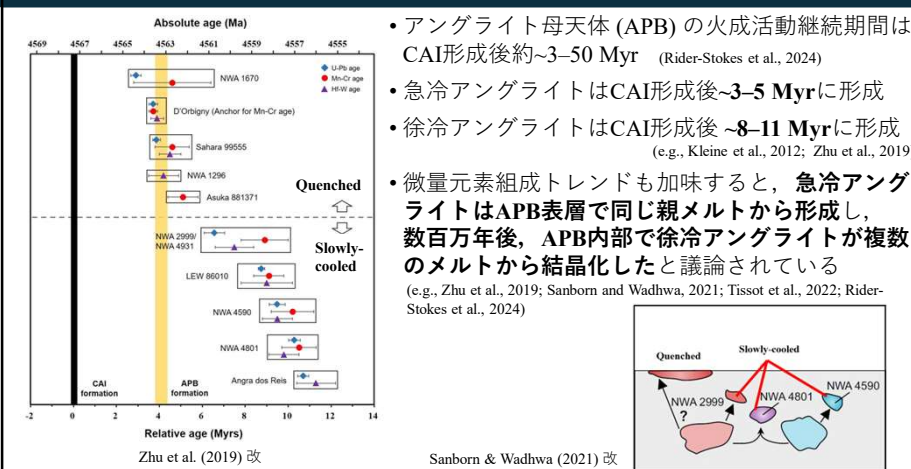


Ol xeno, Ol, Cpx, Pl

Pl, Cpx, Ol

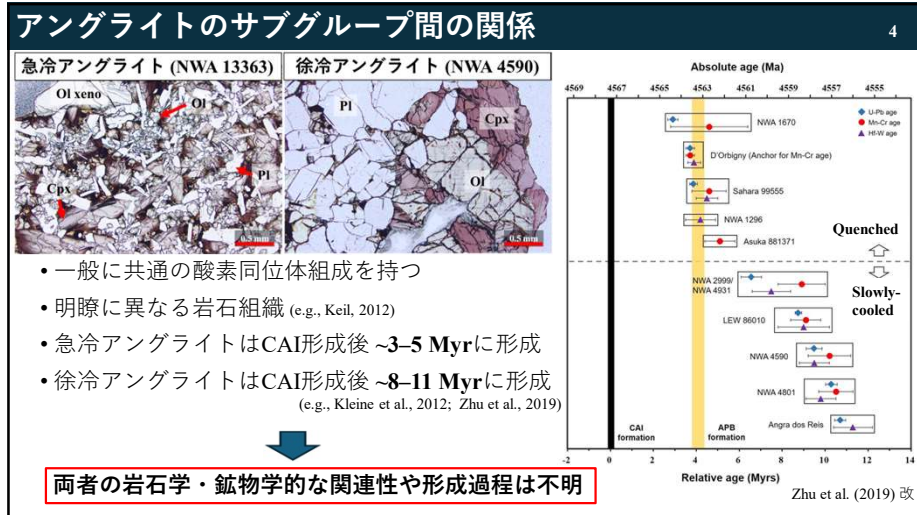
3

アングライトの形成年代

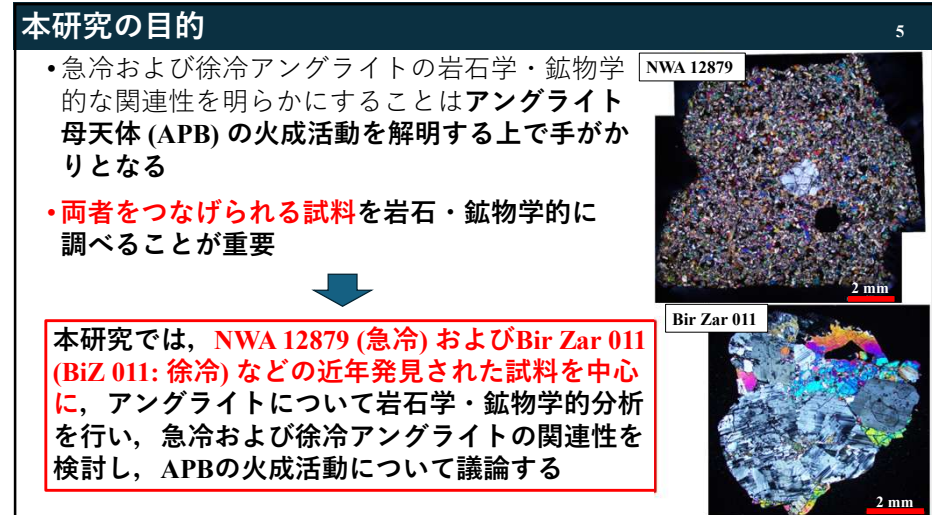


- アングライト母天体 (APB) の火成活動継続期間は CAI形成後約~3-5 Myr (Rider-Stokes et al., 2024)
- 急冷アングライトはCAI形成後~3-5 Myrに形成
- 徐冷アングライトはCAI形成後 ~8-11 Myrに形成 (e.g., Kleine et al., 2012; Zhu et al., 2019)
- 微量元素組成トレンドも加味すると、**急冷アングライト**はAPB表層で同じ親メルトから形成し、数百万年後、APB内部で徐冷アングライトが複数のメルトから結晶化したと議論されている (e.g., Zhu et al., 2019; Sanborn and Wadhwa, 2021; Tissot et al., 2022; Rider-Stokes et al., 2024)

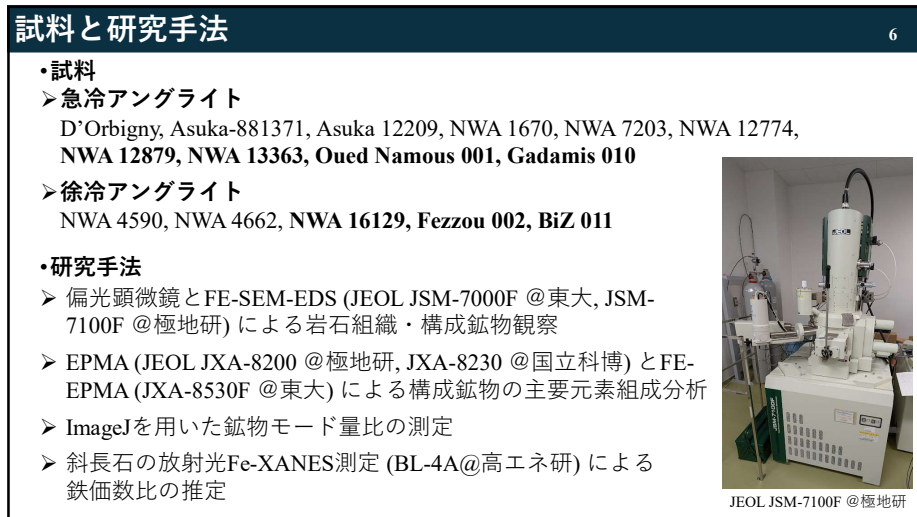
4



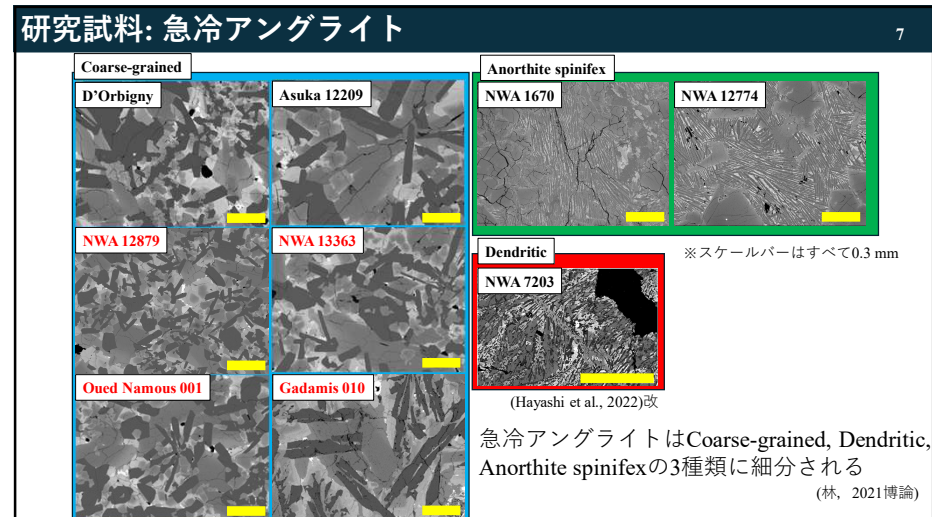
5



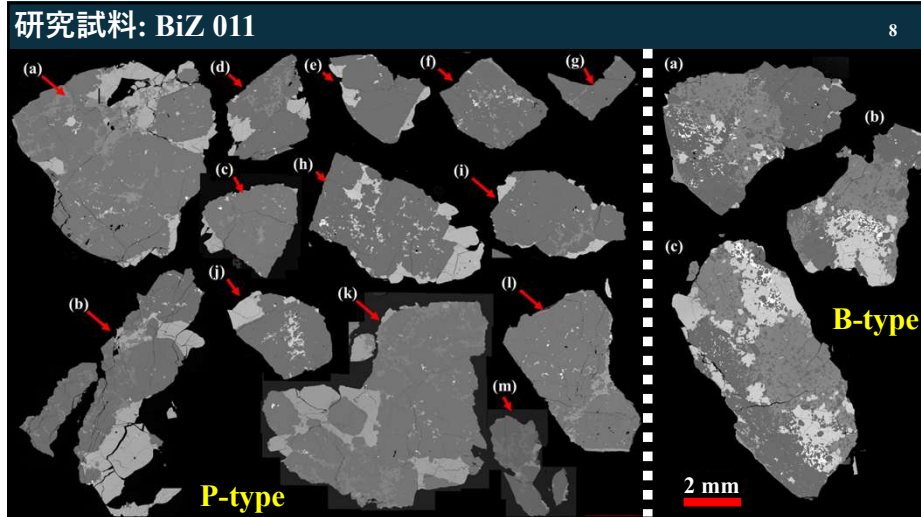
6



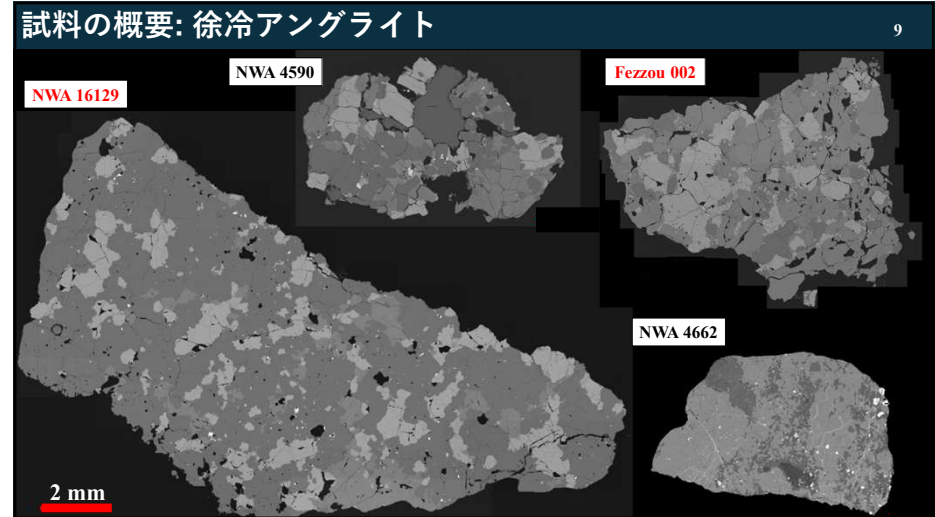
7



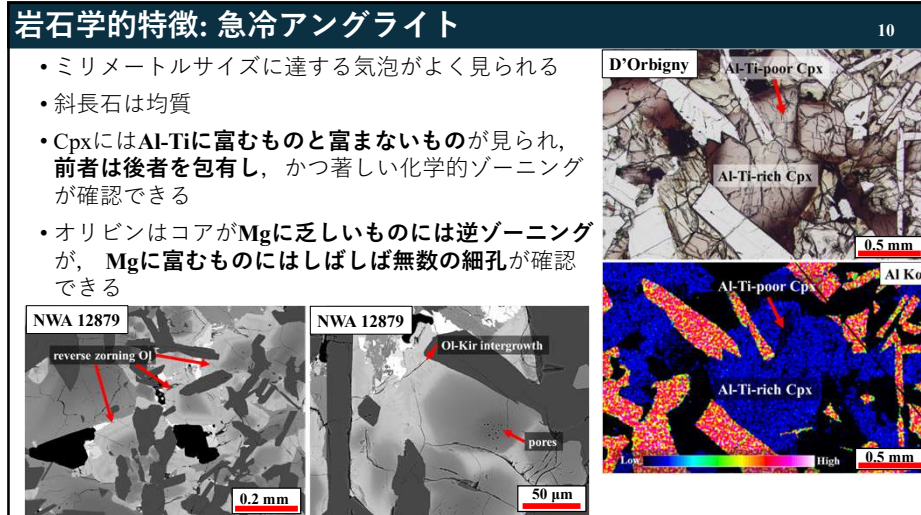
8



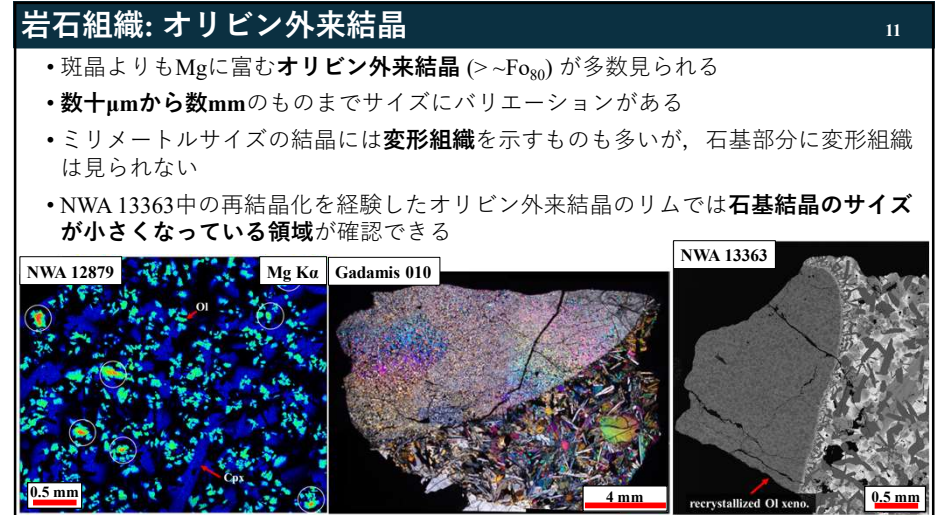
9



10



11

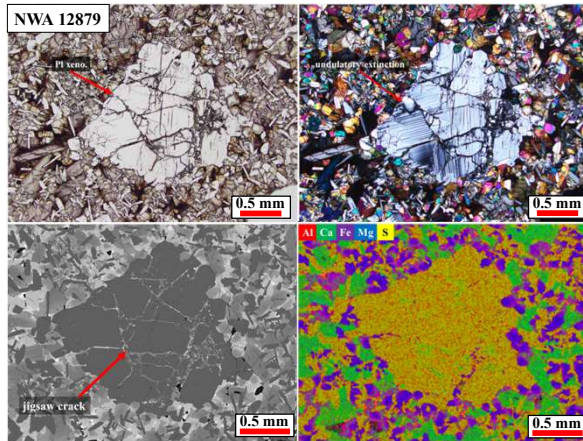


12

岩石組織: 斜長石外来結晶

12

- NWA 12879には粗粒な斜長石外来結晶 (~1.8 mm) が確認できる
- 他の斜長石と同様に化学的ゾーニングを示さず均質
- 部分的に波状消光を示すものの、全体的に衝撃変成組織は見られない
- 内部にジグソークラック状の組織が確認できる
- クラック内には脈状のオリビンとCpxおよび細粒な斜長石が見られる

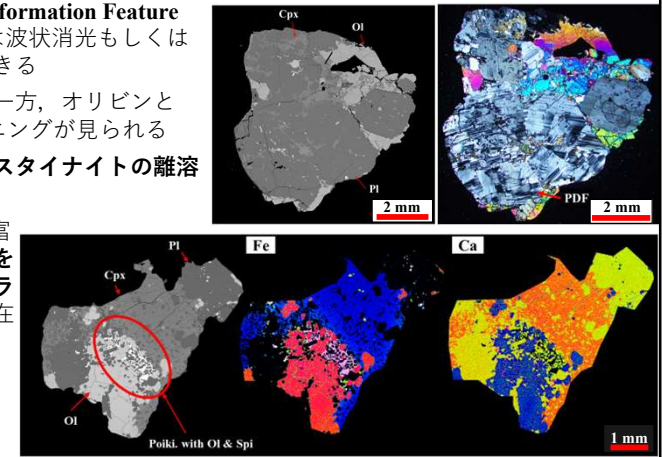


13

岩石組織: BiZ 011

13

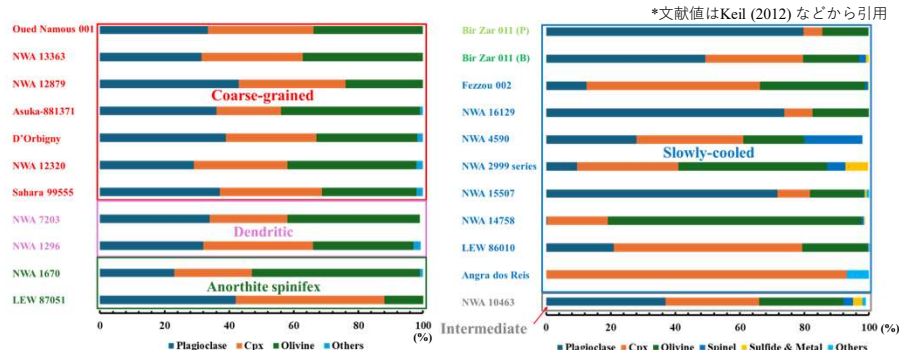
- 斜長石にはPlanar Deformation Feature (PDF), オリビンには波状消光もしくはモザイク化が確認できる
- 斜長石は均質である一方, オリビンとCpxには化学的ゾーニングが見られる
- オリビンとキルシュスタイナイトの離溶組織が見られる
- BタイプにはFe-Tiに富むスピネルが斜長石を包有するポイキロプラスティック組織が存在



14

鉱物モード量比

14



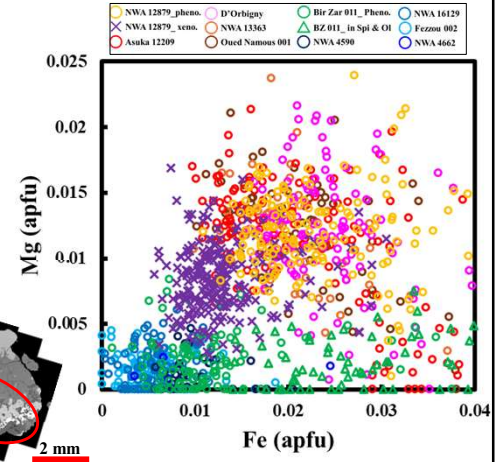
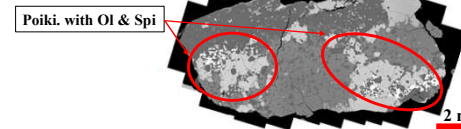
- 急冷アングライトはAnorthite spinifexを除いて類似した鉱物モード量比を示す
- 徐冷アングライトは組織に依らず多様な鉱物モード量比を持つ
- BiZ 011はタイプ間で異なる鉱物モード量比を示す

15

構成鉱物組成: 斜長石

15

- すべての試料と斜長石外来結晶でアノサイトの端成分組成を示す (An# = ~99-100)
- FeとMgの組成領域はグループ間で異なる
- 斜長石外来結晶は急冷および徐冷アングライトの中間的な組成を示す
- BiZ 011はオリビンおよびスピネルとのポイキリティック組織の部分を除き, 他の徐冷アングライトに類似した組成を持つ

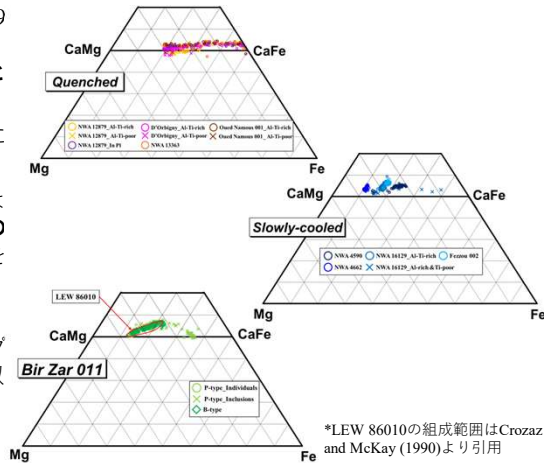


16

構成鉱物組成: Cpx

16

- 急冷アングライトはNWA 12879の斜長石外来結晶中のものも含めて他の急冷アングライトと類似した組成を示す
- 徐冷アングライトは試料ごとに固有の組成範囲を持つ
- BiZ 011のCpxは、全体としては急冷および徐冷アングライトの中間的かつ特徴的な組成範囲を示す
- Pタイプの斜長石に包有されている結晶を除いた場合、タイプ間には差はなく、LEW 86010に似た組成範囲を示す

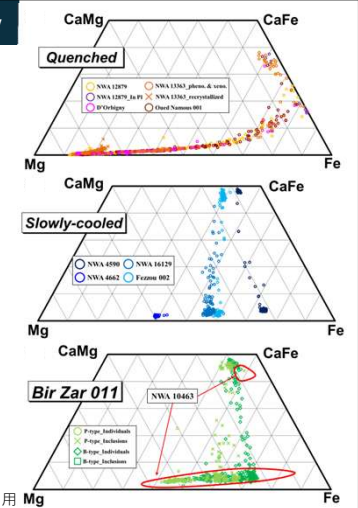


17

構成鉱物組成: オリビン

17

- 急冷アングライトは外来結晶を含めた石基部分と斜長石外来結晶中のもので同様のトレンドを示す
- NWA 13363中の再結晶化外来結晶のみ異なる組成トレンドを持つ
- 徐冷アングライトは試料ごとに組成が異なるものの、オリビンとキルシュスタイナイトの離溶はFeに富む組成領域で確認できる
- BiZ 011のオリビンは全体の組成範囲はNWA 10463と同様に、急冷および徐冷アングライトの中間的かつ特徴的な組成範囲を持つ
- タイプ間で組成範囲は類似するものの、Bタイプの方がよりFeに富んだ組成を示す



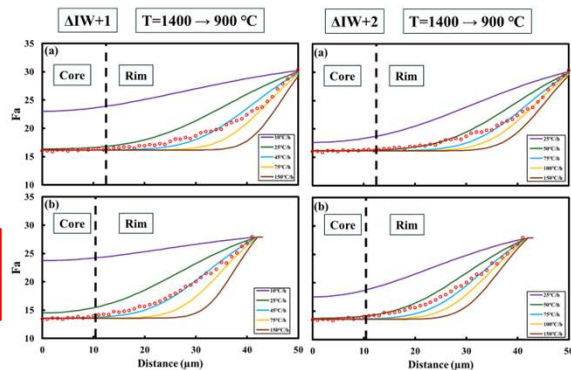
18

オリビン外来結晶から推定される冷却速度

18

- NWA 12879の冷却速度は $\Delta IW+1$ で ~ 45 °C/hr, $\Delta IW+2$ で $\sim 50-100$ °C/hr
- NWA 13363の冷却速度は $\Delta IW+2$ で $\sim 60-210$ °C/hr (Hayashi et al., 2025)
- Oued Namous 001の冷却速度は $\Delta IW+2$ で ~ 50 °C/hr (林, 私信)

*温度範囲は林 (2021博論), Coogan et al. (2005) のオリビン中のFe-Mg拡散係数はMisener (1974), 酸素フガシティはJurewicz et al. (1993) と Tissot et al. (2022) に則り推定

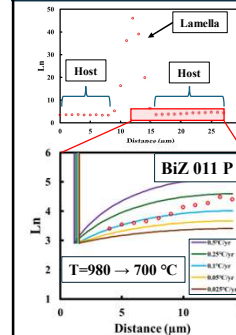


D'Orbigny やAsuka-881371と類似 ($\Delta IW+2$ で各々 ~ 100 °C/hr, ~ 50 °C/hr) (林, 2021博論)

19

オリビン離溶組織から推定される冷却速度

19



* Davidson & Mukhopadhyay (1984) のオリビン化学組成から温度範囲を決定し, Coogan et al. (2005) のオリビン中のCa拡散係数を用いて McKay et al. (1998) の方法に則り推定

sample	Interval temperature (°C)	Cooling rate (°C/yr)
NWA 4590	1015→650	$\sim 0.025-0.1$
NWA 16129	834→650	$\sim 0.01-0.05$
Fezzou 002	980→600	$\sim 0.05-0.1$
Bir Zar 011 (P)	980→700	$\sim 0.1-0.25$
Bir Zar 011 (B: a)	1020→700	$\sim 0.025-0.05$
Bir Zar 011 (B: b)	1009→650	$\sim 0.025-0.05$
Bir Zar 011 (B: c)	1009→650	$\sim 0.01-0.025$

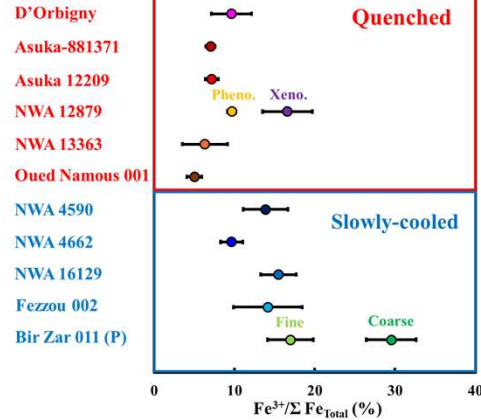
BiZ 011を含め徐冷アングライトは各々類似した冷却速度で形成

20

斜長石中の鉄価数比

20

- NWA 4662を除いて、徐冷アングライトは急冷アングライトに比べてFe³⁺に富む
- NWA 12879は石基部分は他の急冷アングライトと同様の値を示す (~9-10%)
- NWA 12879の斜長石外来結晶のFe³⁺/ΣFe_{total} (~14-20%)は徐冷試料と類似
- BiZ 011の細粒な斜長石は他の徐冷アングライトに近い値 (~14-20%)を示す
- BiZ 011の粗粒な斜長石は突出して高い値 (~27-32%)を示す



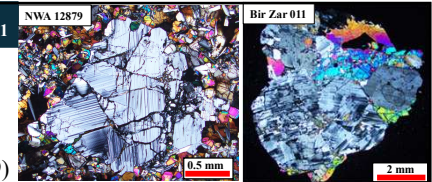
21

斜長石外来結晶

21

斜長石外来結晶の起源

- 斜長石外来結晶の組成はAn# > ~99
- 類似した特徴を持つ斜長石が徐冷アングライト中に見られる (e.g., BiZ 011, NWA 16129)
- 衝撃変成の痕跡が見られない

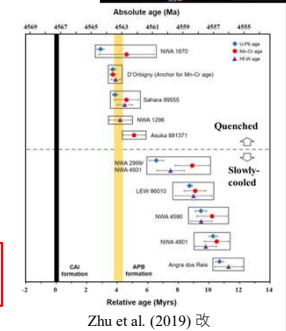


斜長石外来結晶の起源はAPB

急冷および徐冷アングライトの関係

- 急冷アングライト中に徐冷アングライト的な鉱物が存在
- NWA 12879の結晶化年代は4565.48 ± 0.33 Ma (Bizzarro, 私信)

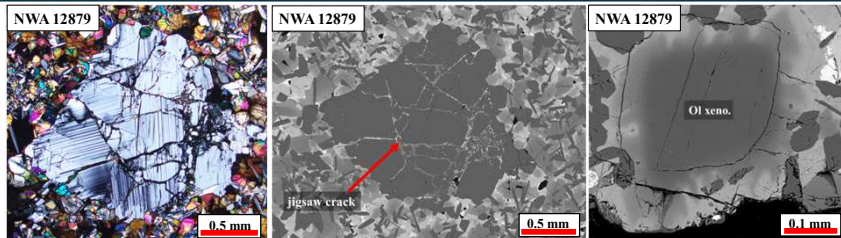
急冷アングライト形成時、徐冷アングライトがすでに形成



22

急冷アングライトの起源

22



- 斜長石外来結晶はジグソークラックを示すが、衝撃変成をほとんど受けていない
- オリビン外来結晶 (Fo# ~79-88; 融点~1700-1750 °C) は溶融を経験したことを示唆
- 斜長石外来結晶 (融点~1550 °C; Goldsmith, 1980) は溶融の痕跡が確認できない
- NWA 12879は他の急冷アングライトと共通した岩石学・鉱物学的特徴を持つ

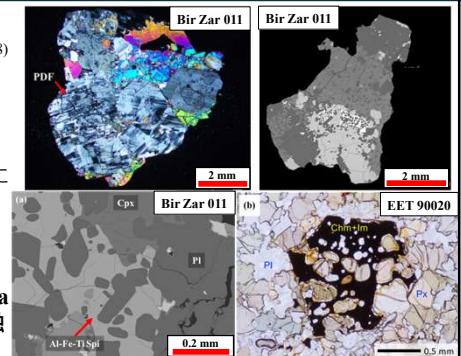
急冷アングライトはAPB内の火成活動(部分溶融)によって形成

23

徐冷アングライトの形成過程: BiZ 011のタイプ間の関係

23

- BiZ 011のショックステージは岩石組織からA-S3 (26-28 GPa)と推定 (Stöfler et al., 2018)
- BiZ 011のBタイプにはスピネルのポイキロプラスティック組織が存在するが、主要鉱物の組成範囲はPタイプと類似
- 熱変成を受けたユークライトEET 90020にも類似したスピネルのポイキロプラスティック組織が存在 (Yamaguchi et al., 2001)
- Yamaguchi et al. (2002)の衝撃実験では~860 °Cのユークライト模擬物質に23 GPaの衝撃圧を加えるとFe-Tiに富む部分溶融メルトが形成



- BiZ 011のタイプ間の違いは衝撃を受けた際に部分溶融したかに起因
- 見積もられた冷却速度は衝撃を受けた後の冷却履歴を反映

24

