

大質量星における中質量元素元素合成の 後期進化における対流混合による影響

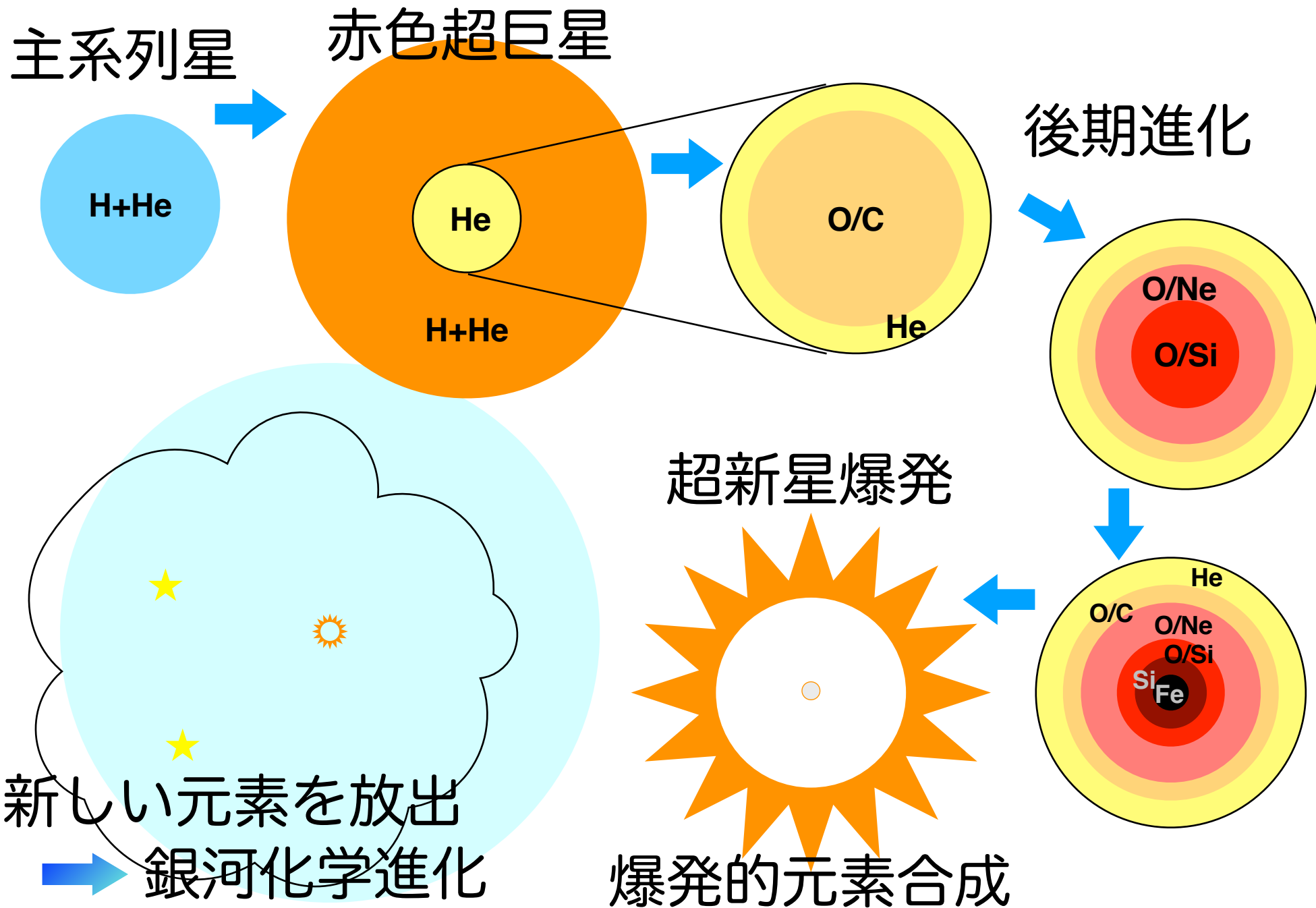
吉田 敬

東京大学大学院理学系研究科天文学専攻

超新星ニュートリノ研究会

2021年1月8日

大質量星の進化と超新星での元素合成

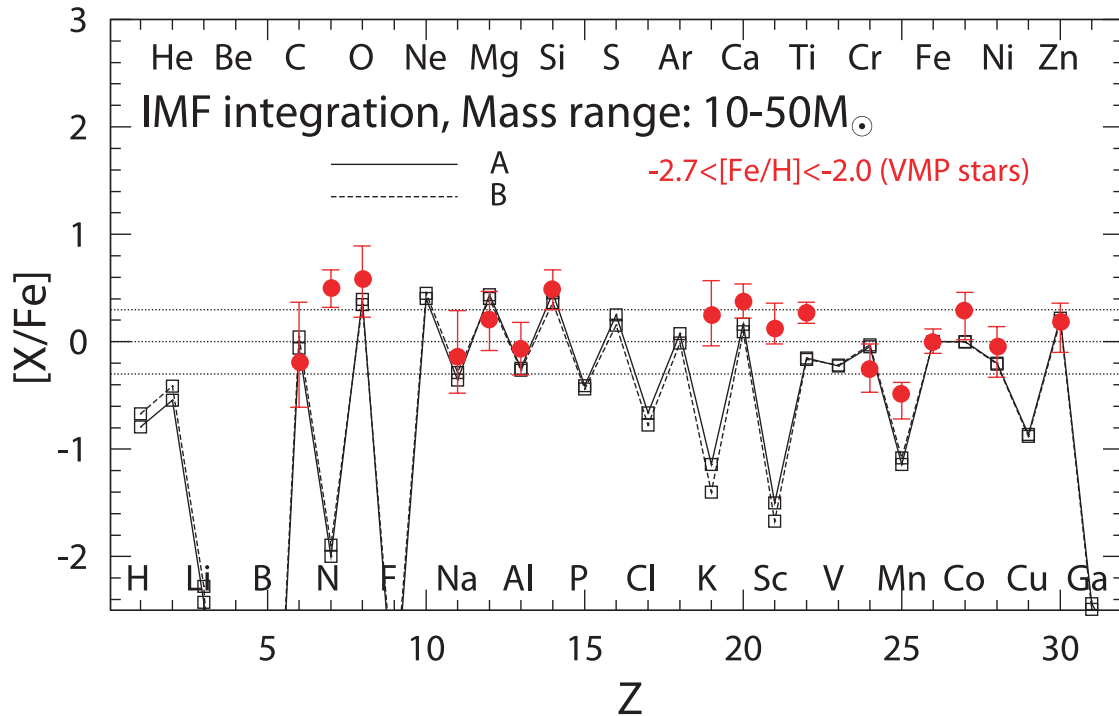


Kの生成問題

大質量星でのK合成

→ 超新星爆発時の爆発的酸素燃焼
炭素燃焼, ネオン燃焼 (Woosley et al. 2002)

金属欠乏星におけるK存在度と生成問題



$$[X/Fe] = \log(N_X/N_{Fe}) - \log(N_X/N_{Fe})_{\odot}$$

A: $[O/Fe] = 0.5$ for HN models

B: $[Mg/Fe] = 0.2$ for $>30 M_{\odot}$ HN models

● Very Metal-Poor Stars の平均存在度

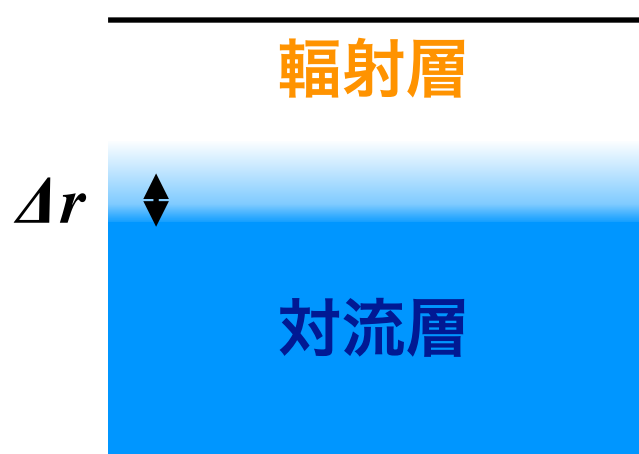
$$-2.7 < [Fe/H] < -2.0$$

(Tominaga et al. 2007)

→ 爆発モデルを工夫してもK存在度を再現するのが困難

対流層の物質混合と大質量星の最終進化

星の対流層における物質混合



- 物質混合 → 拡散近似

$$D_{cv} = \frac{1}{3} v_{MLT} \alpha_{MLT} H_P$$

α_{MLT} : mixing length parameter

H_P : pressure scale height

- overshoot

→ 対流領域の境界の少し外まで混合

$$D_{cv}^{ov} = D_{cv,0} \exp\left(-2 \frac{\Delta r}{f_{ov} H_{P0}}\right)$$

f_{ov} : overshoot parameter

- 観測を再現するように α_{MLT} , f_{ov} を決定

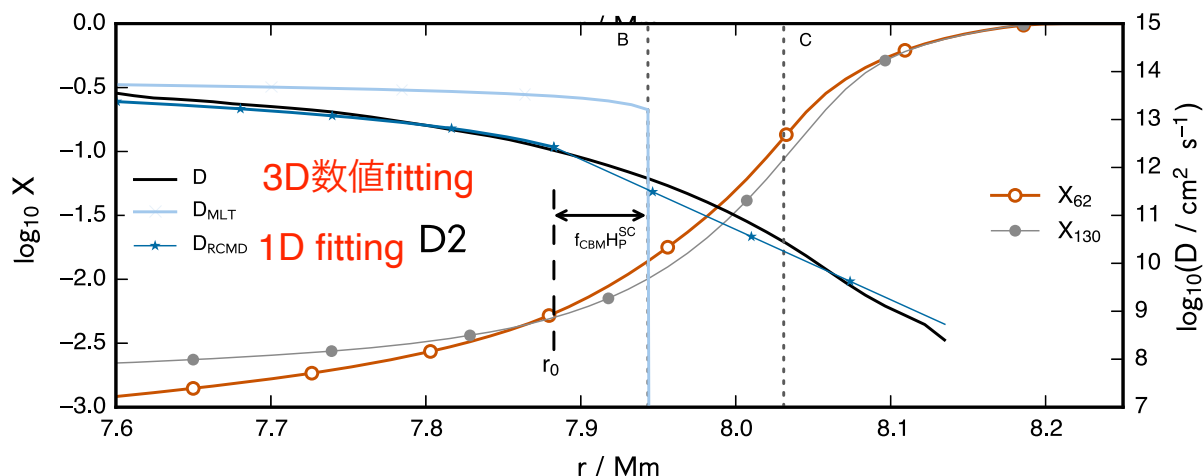
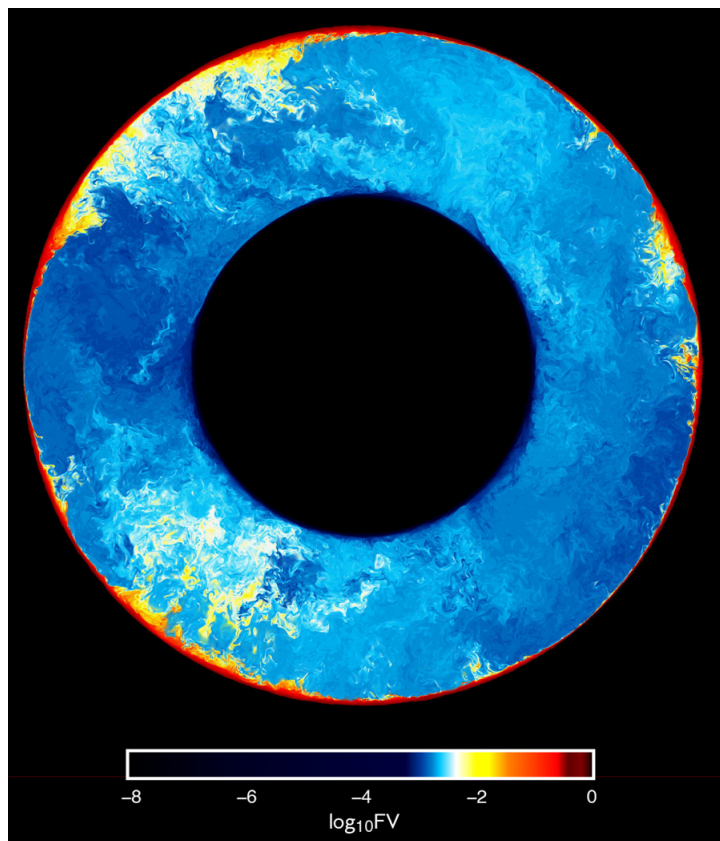
…主に主系列星と赤色超巨星の性質

$\alpha_{MLT} = 1.8$, $f_{ov} = 0.03 / (0 \text{ or } 0.002)$ until/after He burning

→ 後期進化の燃焼まで適用可能かはわからない

多次元進化における対流混合

酸素shell燃焼層を想定した3D流体計算 (Jones et al. 2017)



3D流体計算の結果から適用した拡散係数

➡ $f_{ov} = 0.03$

対流層境界から流入した物質の比体積

➡ 対流層境界の外の物質を取り込みやすい？

今回の研究発表

大質量星の後期進化における対流層境界での物質混合に影響するovershootの効果に対する中質量元素(Kを含む)の生成量の依存性を調べる

- 大質量星の進化計算 (HOSHI code)

$M = 10, 12, 15, 20, 25 M_{\odot}$ stars

overshoot parameter: $f_{\text{ov}} = 0, 0.002, 0.005, 0.010, 0.030$

- 超新星爆発計算

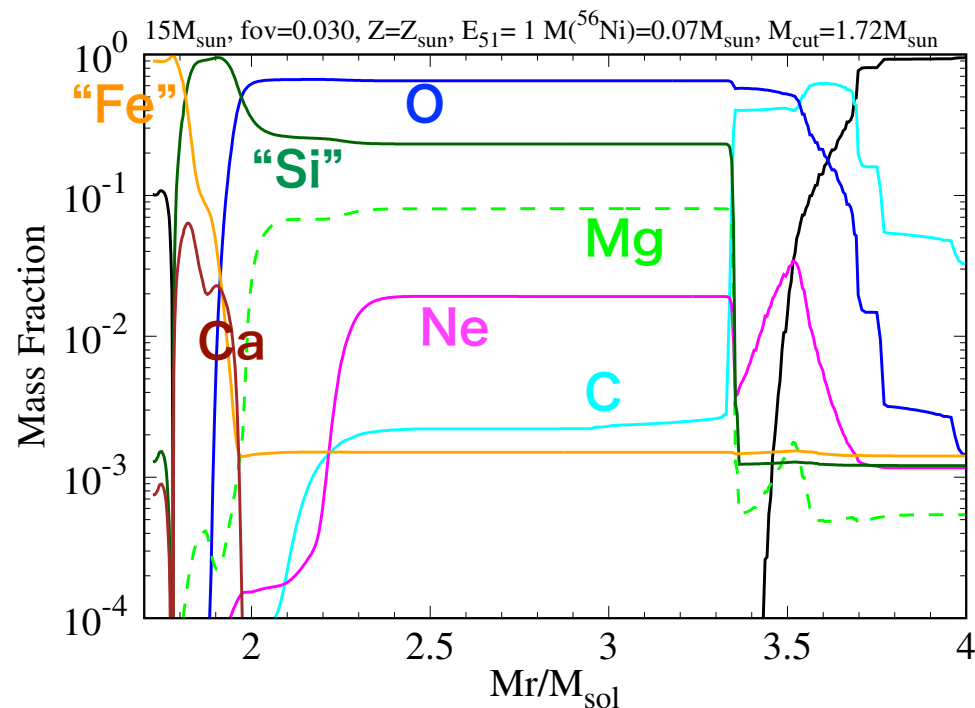
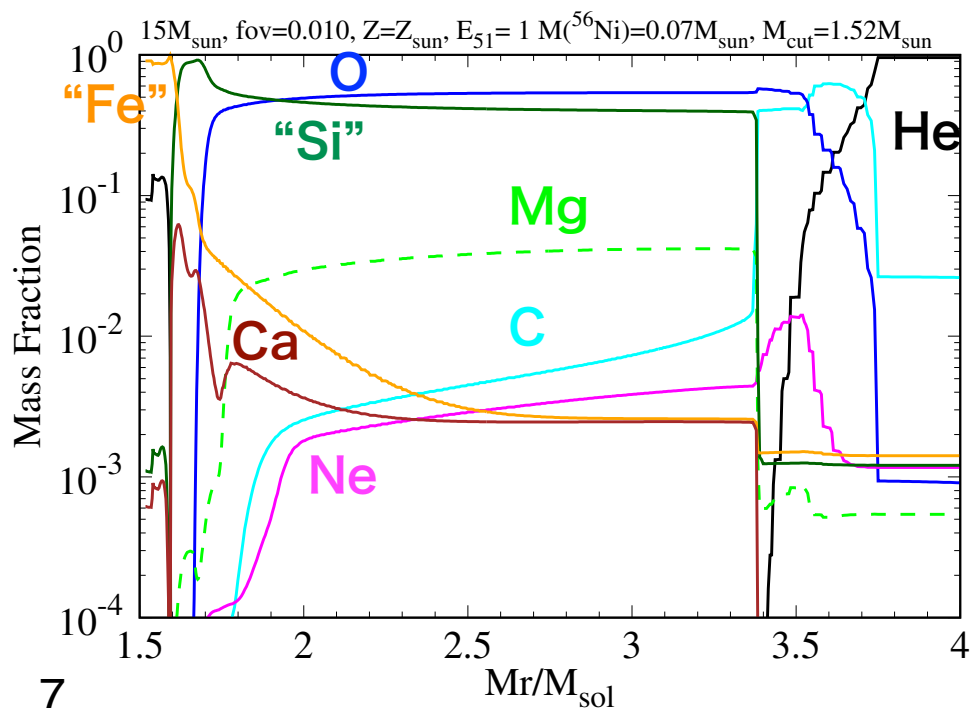
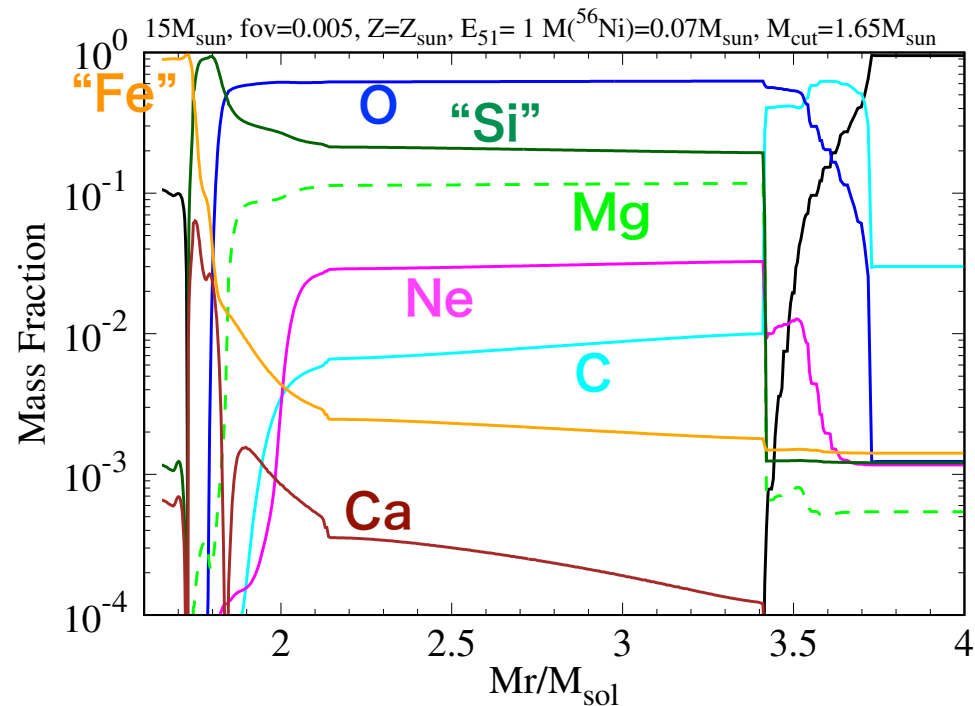
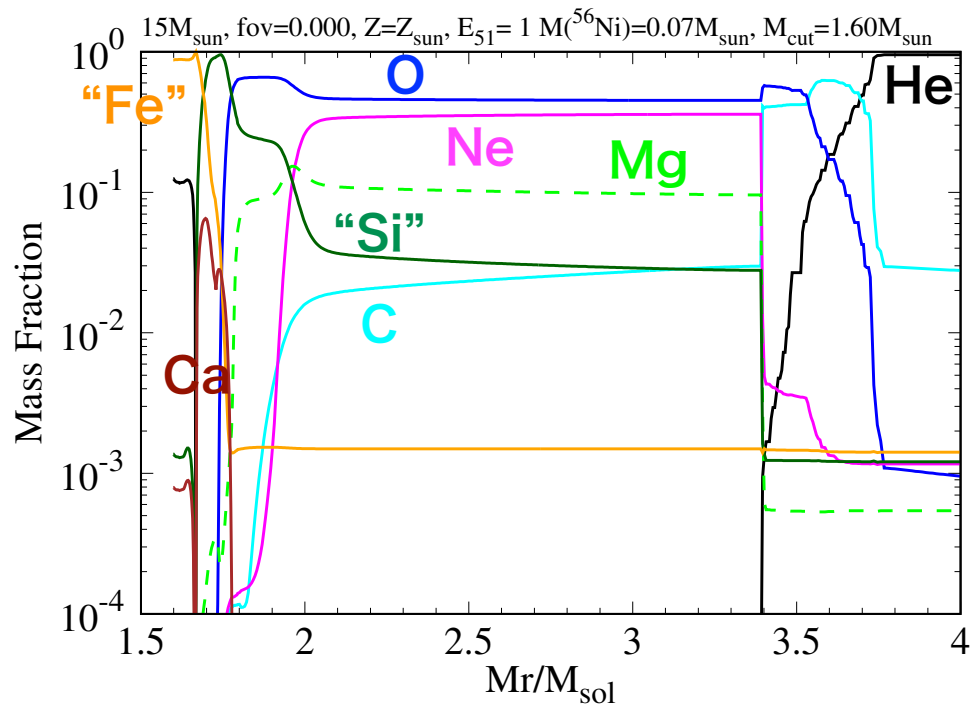
熱爆発モデルによる流体計算

→ 爆発エネルギー: $E = 10^{51}$ ergs

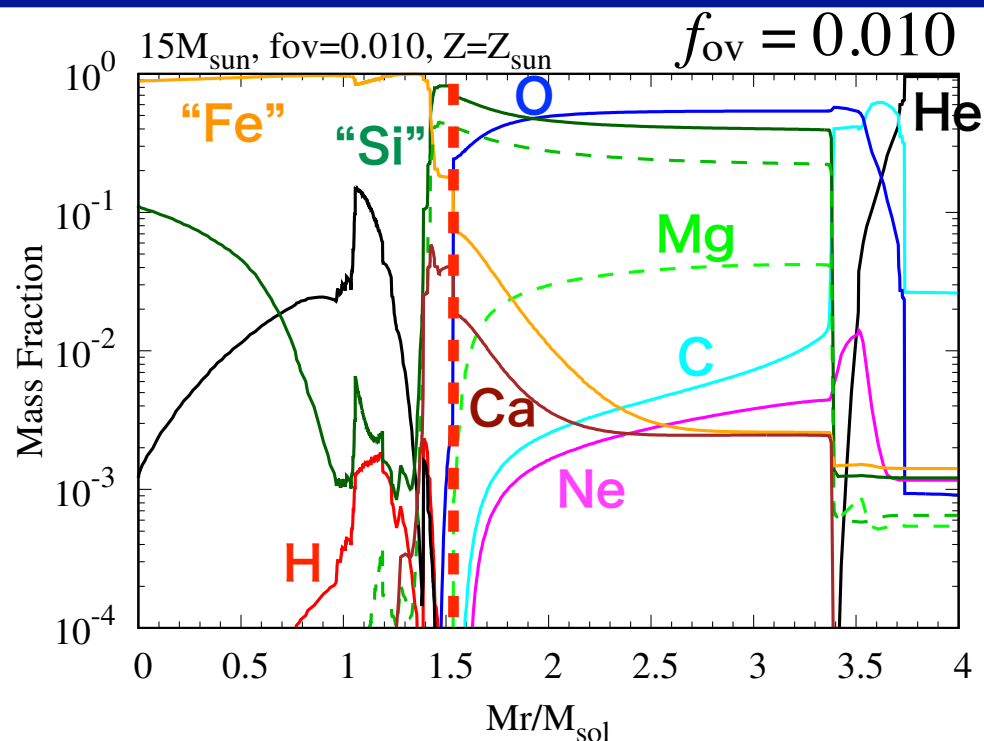
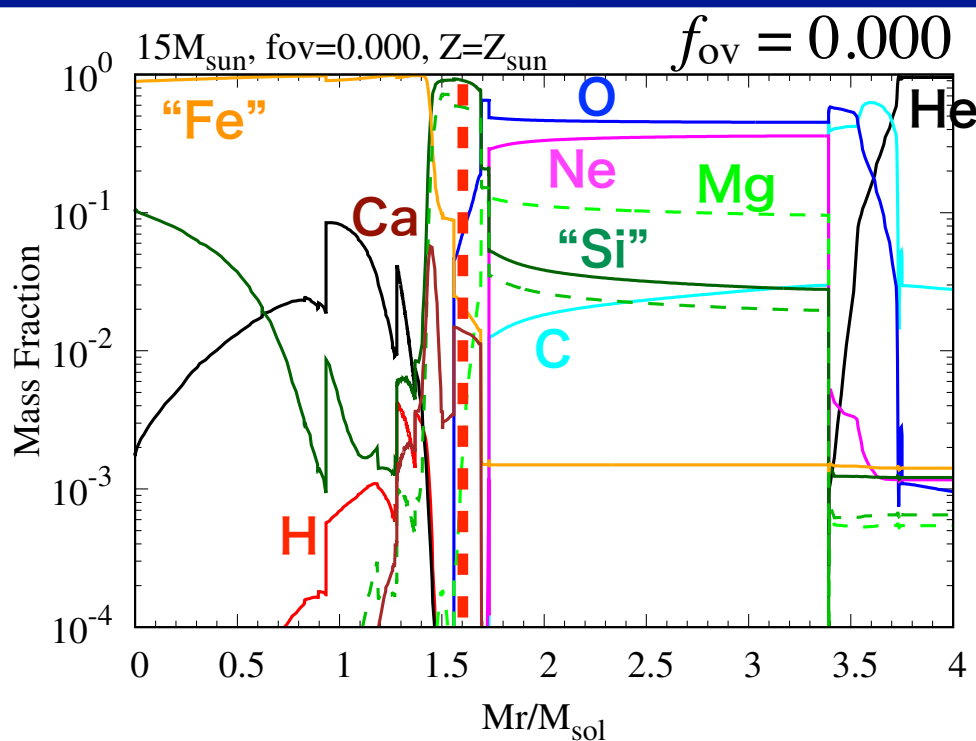
^{56}Ni 放出量: $M(^{56}\text{Ni}) = 0.07 M_{\odot}$

→ Postprocess元素合成

超新星ejectaの質量比分布: $15 M_{\odot}$



Progenitorの質量比分布: $15 M_{\odot}$



● 大きなovershootの効果

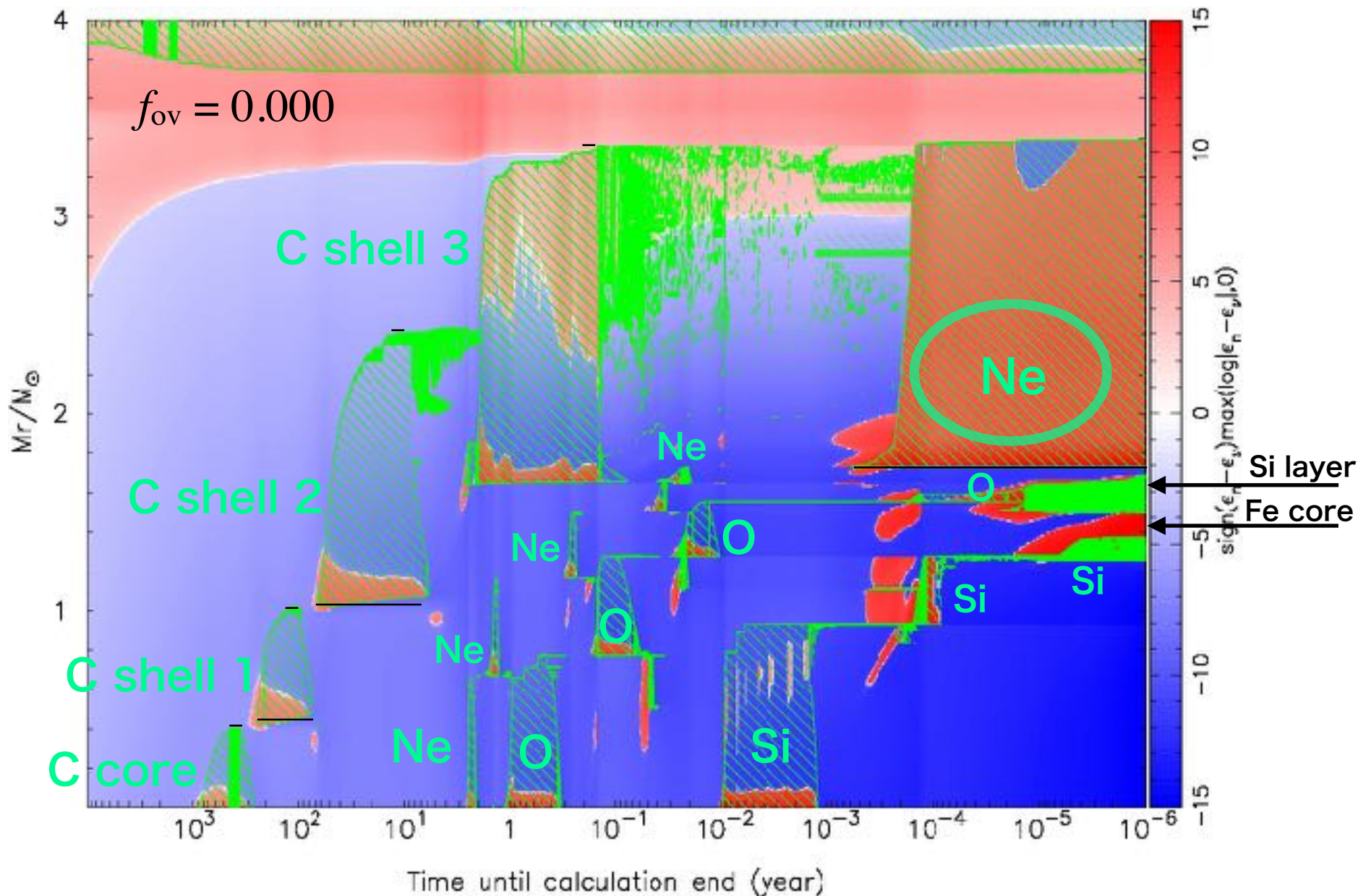
- Si層が薄くなる

- O-rich層の組成

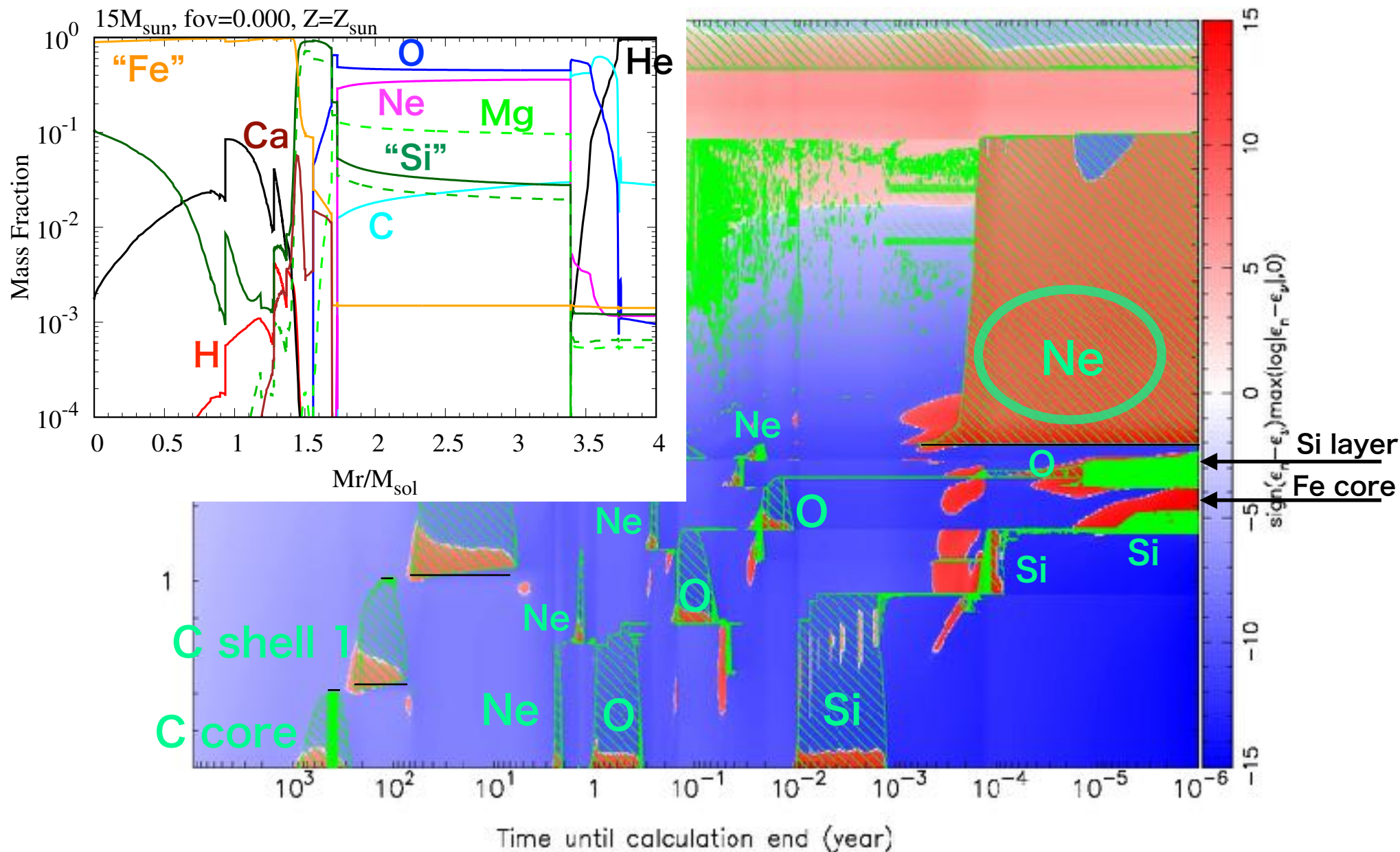
- ➡ C, Ne, Mgの減少とSi, Sなどの増加

O-shell燃焼の生成物がO-rich層に流入

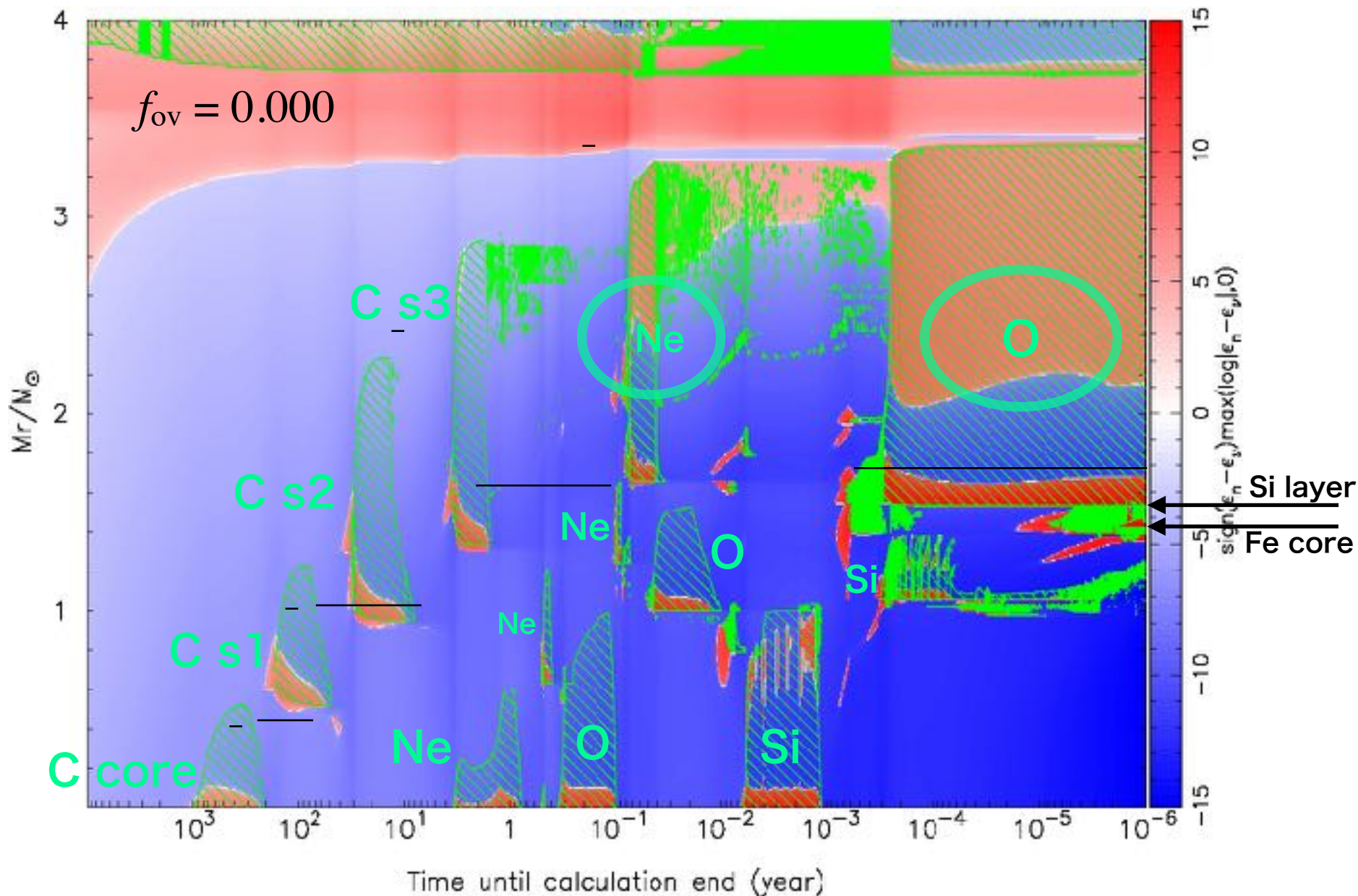
後期の対流進化: $15 M_{\odot}, f_{ov} = 0.000$



後期の対流進化: $15 M_{\odot}, f_{ov} = 0.000$

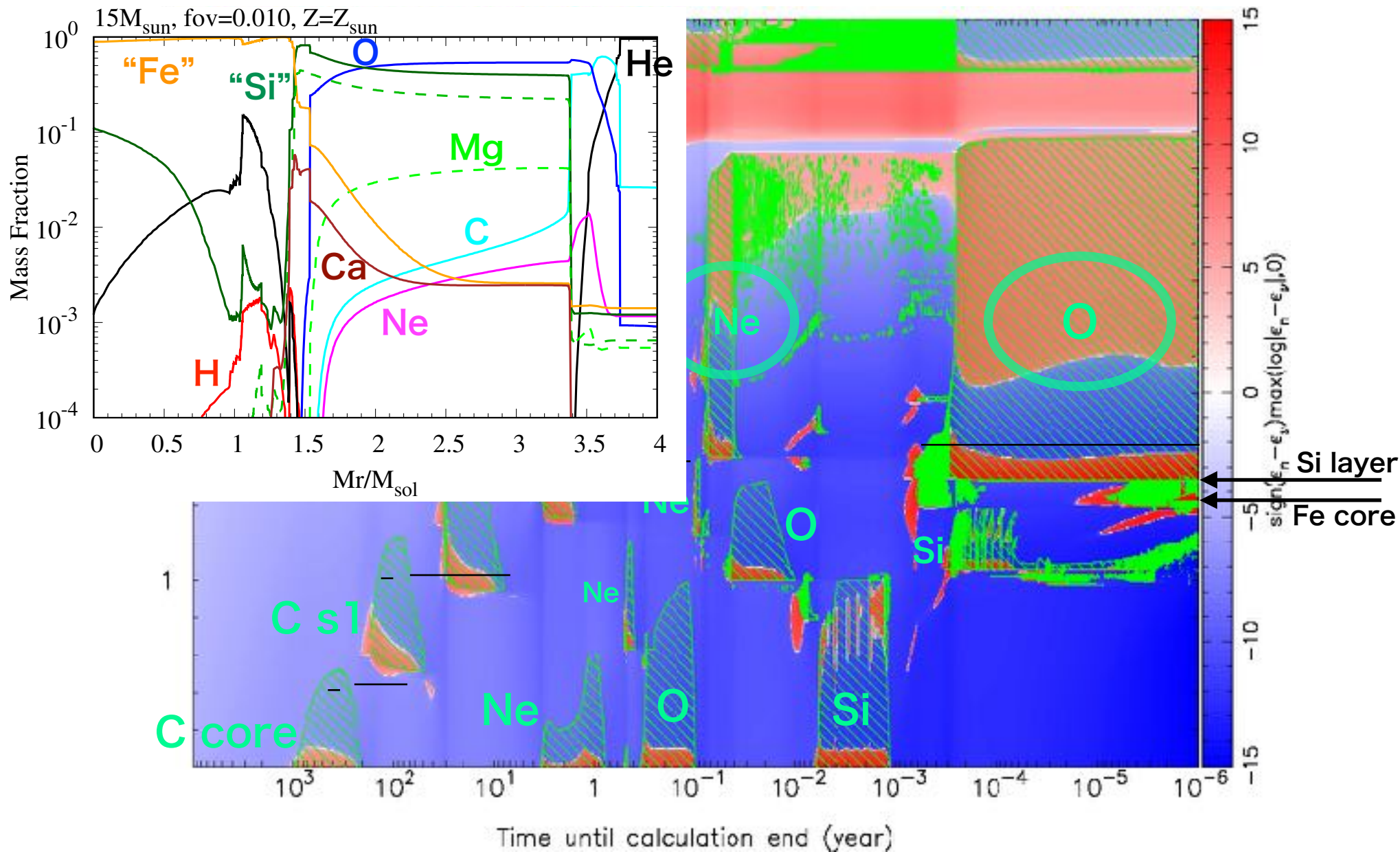


後期の対流進化: $15 M_{\odot}, f_{ov} = 0.010$



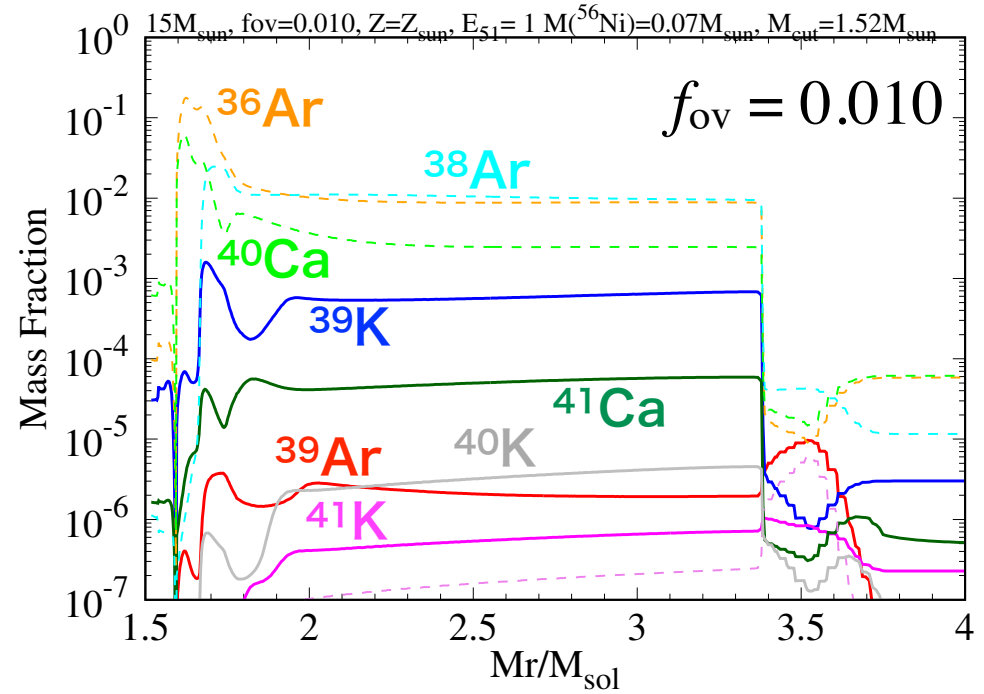
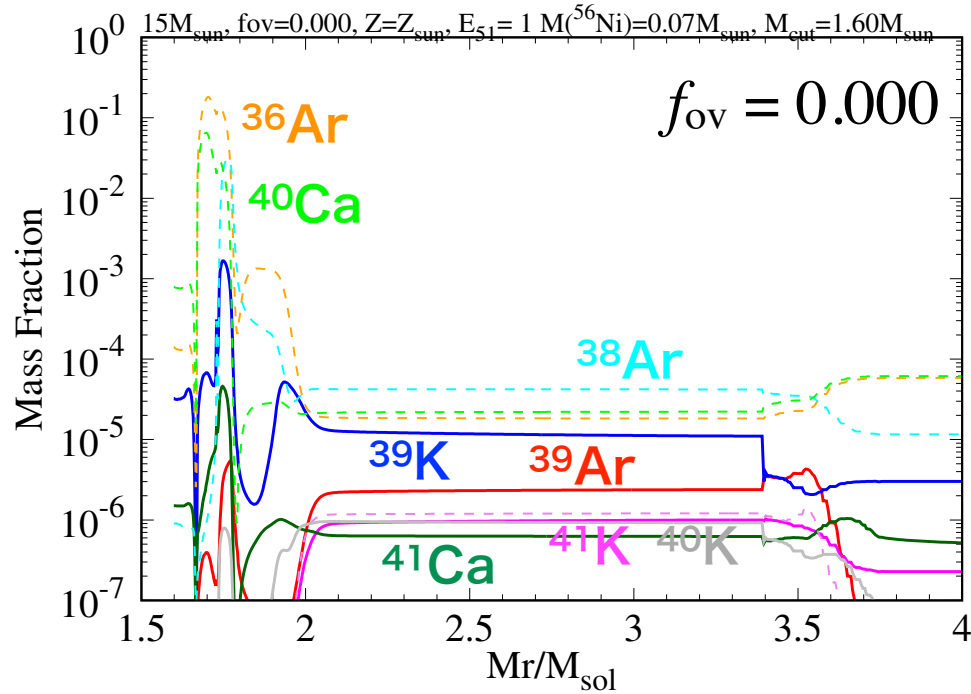
- Ne-, O-shell燃焼が広い領域で起こる → 中質量元素合成

後期の対流進化: $15 M_{\odot}, f_{\text{ov}} = 0.010$



● Ne-, O-shell燃焼が広い領域で起こる → 中質量元素合成

K合成: 15 M_⊙

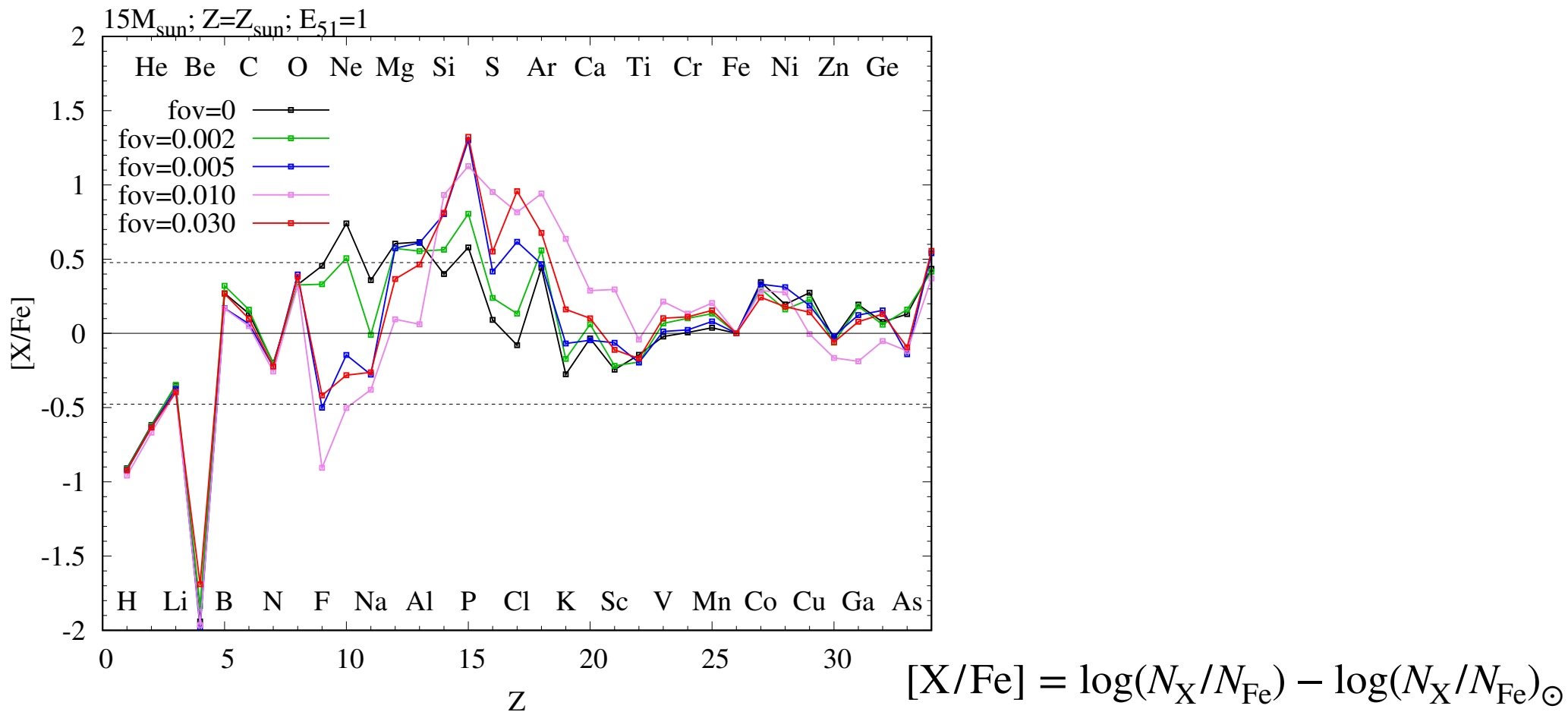


- $f_{\text{ov}} = 0.010$ case

- Kが多く合成される

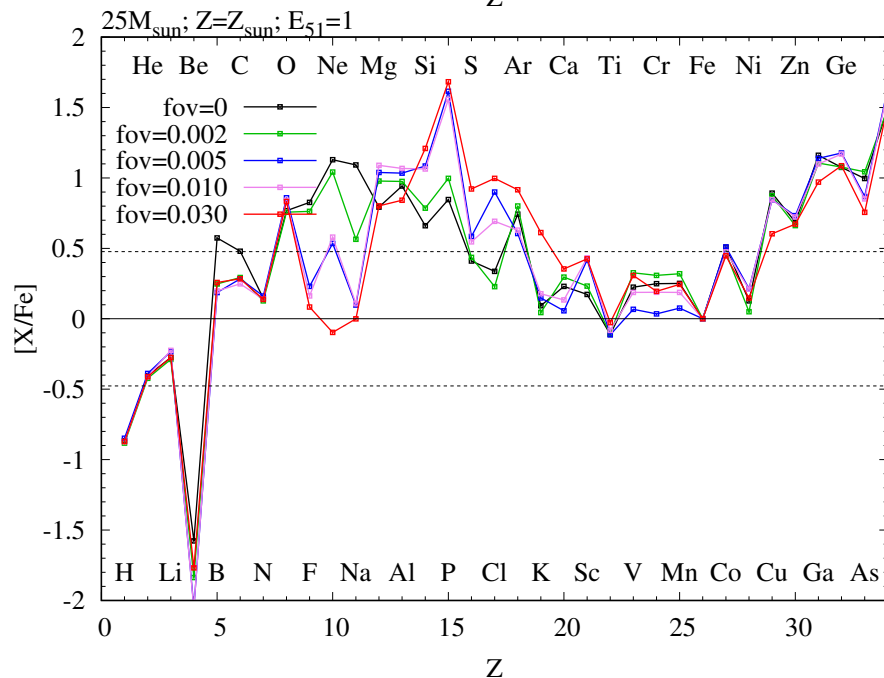
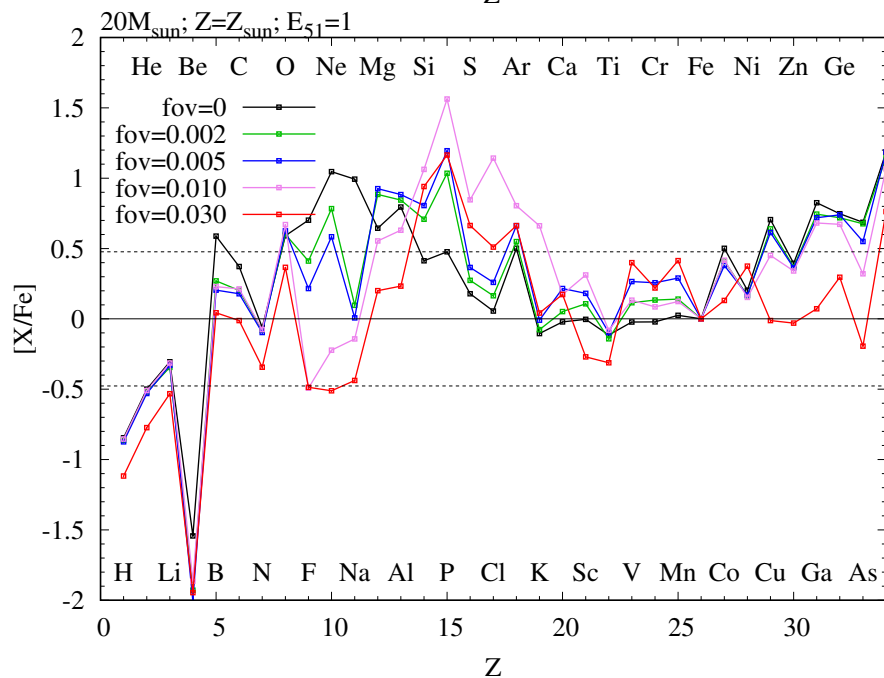
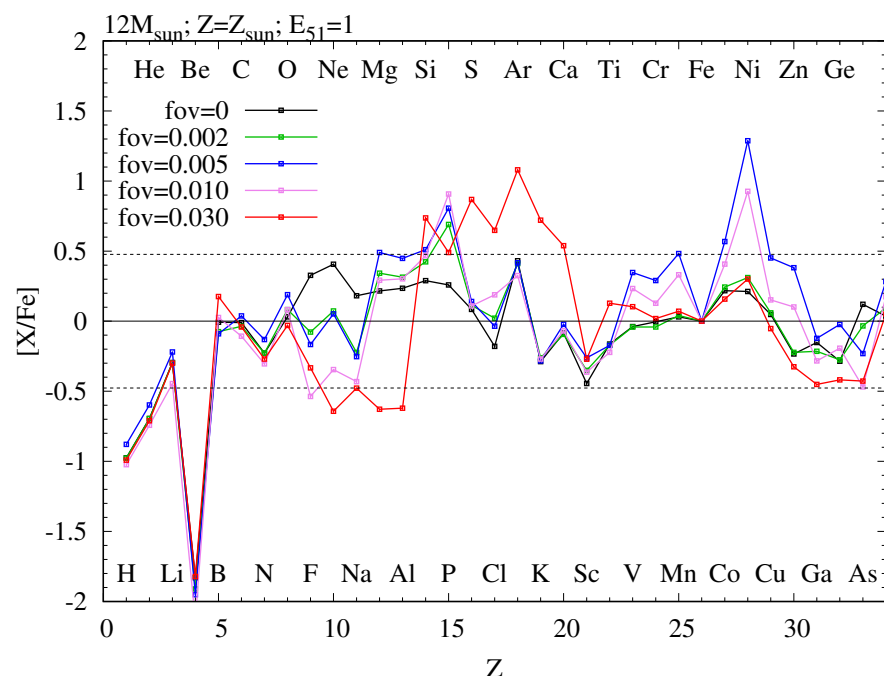
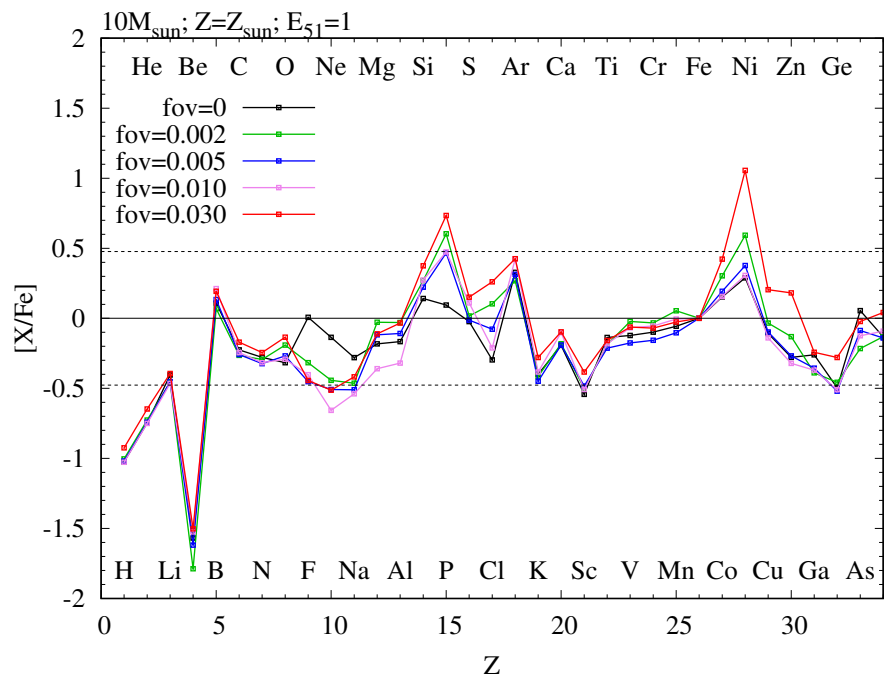
- ➡ O-shell燃焼によりSi-Kが合成される場合
Ar量との相関がありそう

超新星元素合成量分布: 15 M_☉



- overshootが強いモデルで中質量元素が作られやすい
 - ➡ Ne, O-shell燃焼生成物のO-rich層への混合
 - ➡ $f_{ov} = 0.010, 0.030$ でKが多く合成
 - ➡ Si-Arの過剰とNeの減少

超新星元素合成量分布



まとめ

大質量星の後期進化における対流層境界での物質混合に影響するovershootの効果に対する中質量元素(Kを含む)の生成量の依存性を調べる

- 大きなovershootのモデル
 - O-rich層でNe, O-shell燃焼を起こしやすい
 - 中質量元素のO-rich層への混合を起こしやすい
 - ➡ O-shell燃焼によりKの生成量は増加
 - overshootが大きいと必ずKができるわけではない
 - 他の中質量元素の過剰とNeの減少が問題

大質量星の進化モデル

HOngo Stellar Hydrodynamics Investigator (HOSHI) CODE

(Takahashi et al. 2016, 2018, 2019, Yoshida et al. 2019)

$$\frac{\partial P}{\partial M_r} = -\frac{GM_r}{4\pi r^4} - \frac{1}{4\pi r^2} \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} \quad \frac{\partial r}{\partial M_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$$

$$\frac{\partial \ln T}{\partial \ln P} = \min(\nabla_{\text{ad}}, \nabla_{\text{rad}}) \quad \text{対流, 輻射} \quad \frac{\partial L_r}{\partial M_r} = \epsilon_{\text{nucl}} - \epsilon_{\nu} + \epsilon_{\text{grav}}$$

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial M_r} \left[(4\pi r^2 \rho)^2 D \left(\frac{\partial X_i}{\partial M_r} \right) \right] + \left(\frac{\partial X_i}{\partial t} \right)_{\text{nucl}}$$

組成変化 対流混合 元素合成

元素合成(ここでは~Brまでの300核種)

$$\left(\frac{\partial X_i}{\partial t} \right)_{\text{nucl}} = -\lambda_i X_i + \sum_j \lambda_j X_j - \rho \sum_j \langle \sigma v \rangle_{i,j} X_i X_j + \rho \sum_{j,k} \langle \sigma v \rangle_{j,k} X_j X_k + \dots$$

$\dot{M}(T_{\text{eff}}, L, [X_{\text{H}}, X_{\text{He}}, Z])$ 質量放出率

- 自転を考慮した星の計算も可能