

# 自転する初代星の元素合成計算

高橋 こう<sup>1</sup>, 梅田秀之<sup>1</sup>, 吉田敬<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Astronomy, The University of Tokyo

<sup>2</sup>Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University

# 内容

## 背景の説明

- ・ 何をしたか／何をするか、何のために  
恒星進化計算をした 低金属星組成を説明したい…
- ・ 先行研究の紹介  
説明できない元素が存在（たとえばNに注目）
- ・ 回転星進化コードについて  
新しい効果。

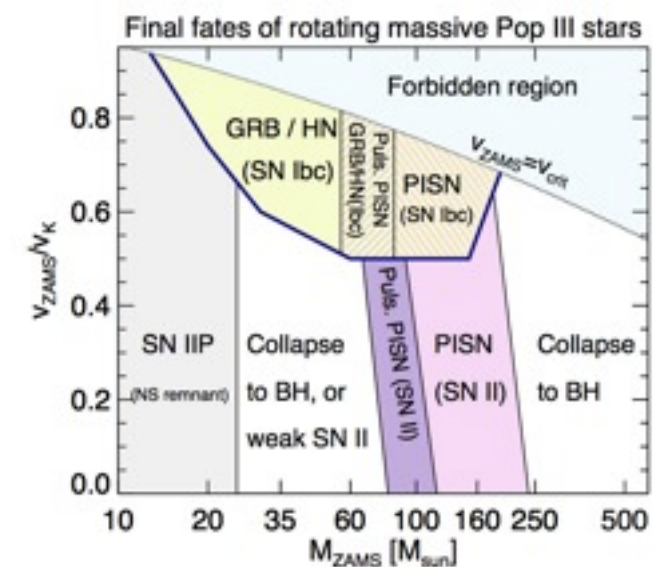
## 初代星進化計算

- ・ 無回転モデルの進化
- ・ 回転混合でなにが変わるか
- ・ 議論

# 恒星進化になにができるか

初代星の進化理論は  
いろんな分野と関係します。

- 初期宇宙の環境 Ekstroem+ 2008  
→ 光子量, SN, BH形成
- 大質量星進化計算  
→ SN/GRB progenitor



Yoon+ 2012

- 金属欠乏星の豊富な組成データ  
→ abundance profilingによる理論検証

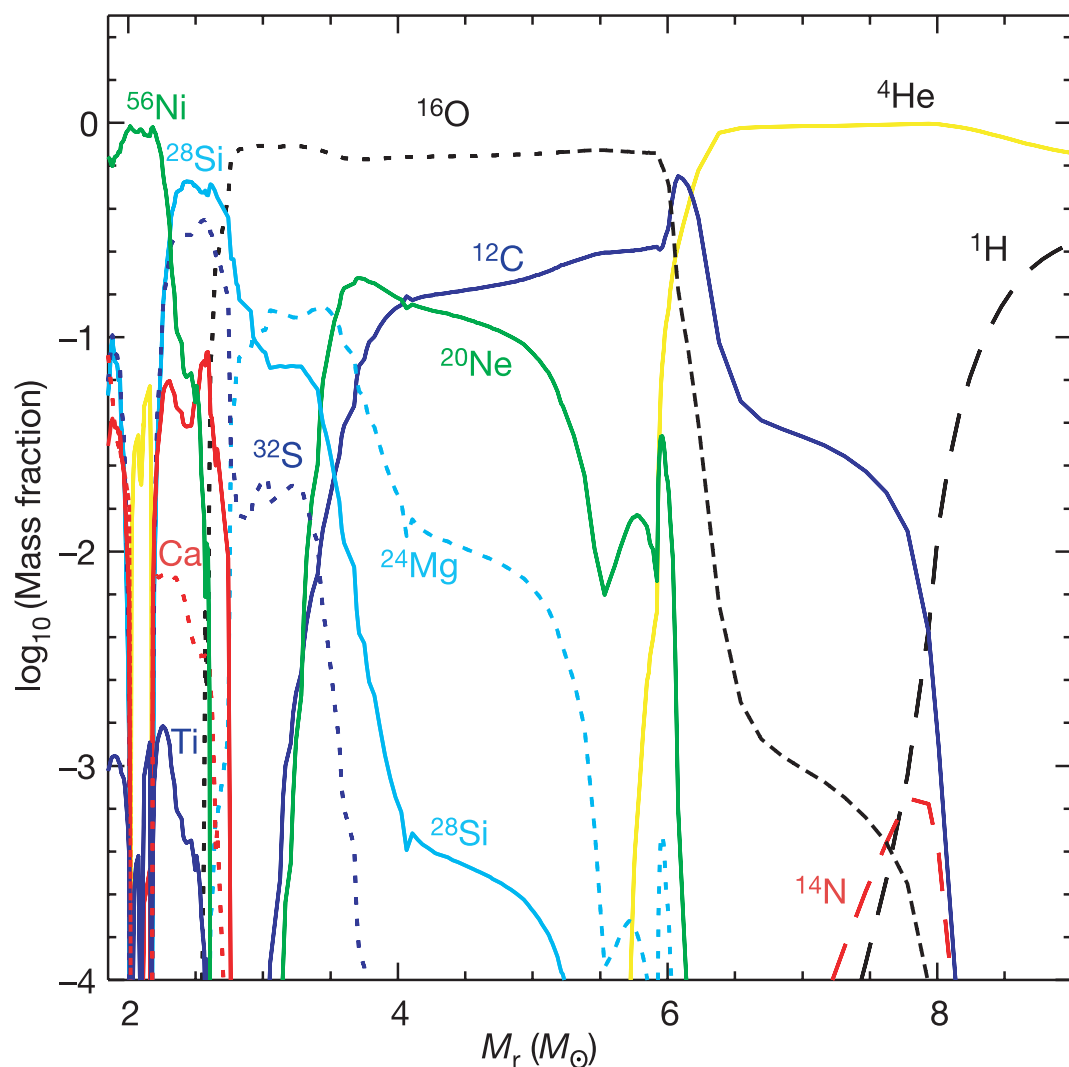
Umeda&Nomoto 02, 05  
Limongi&Chieffi 03  
Heger&Woosley 10

(cf. 須田、富永talk)

# 初代星のYield計算(1)

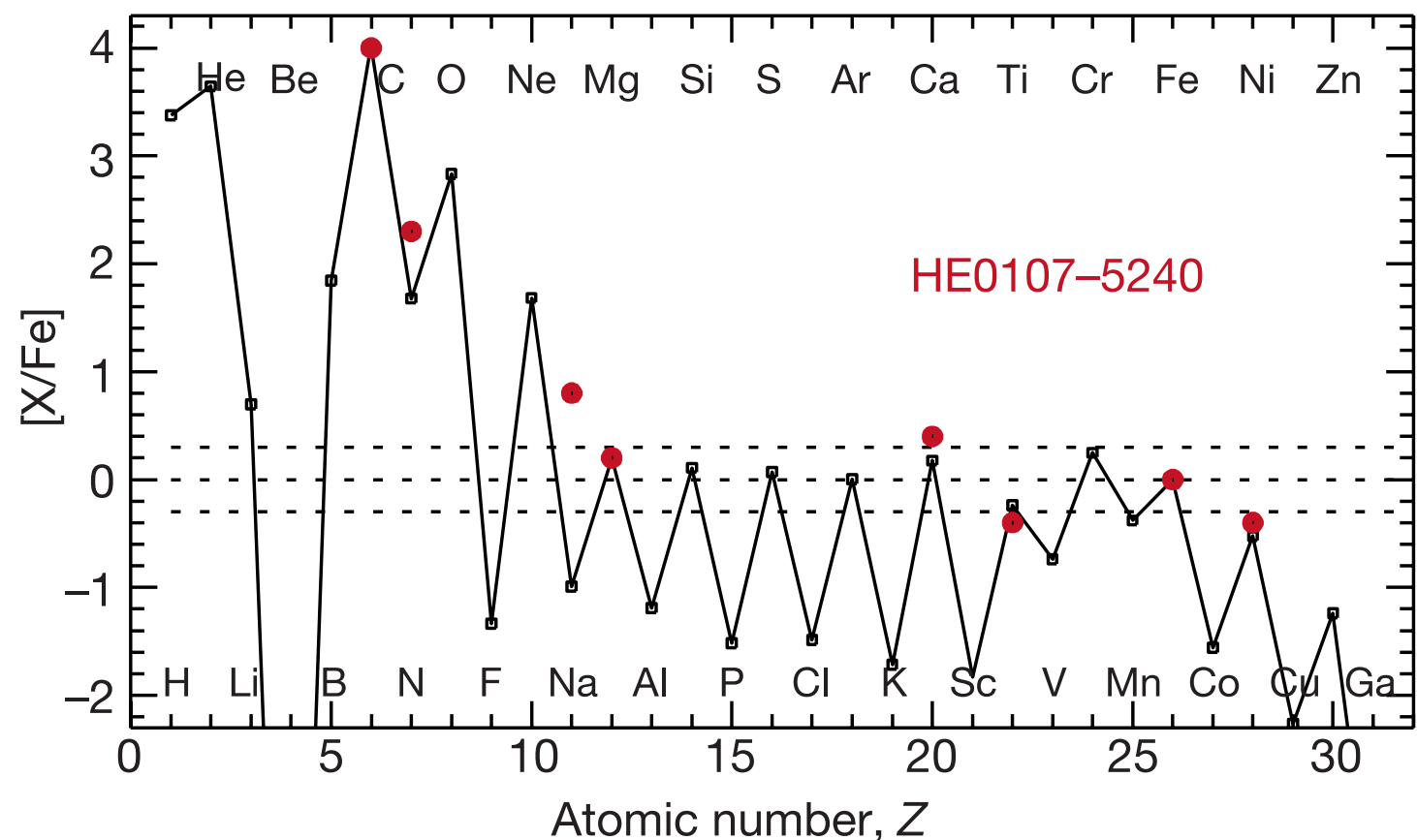
- Umeda & Nomoto (03)

恒星進化計算の結果から...



0.3 foeなど

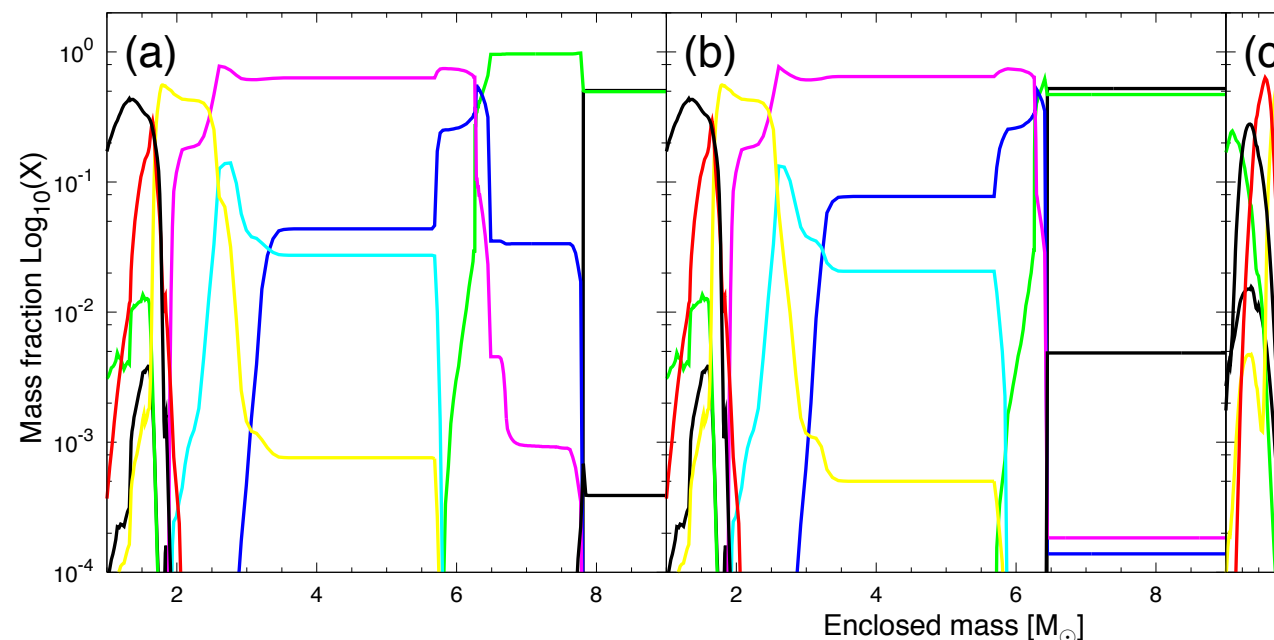
適当な爆発を仮定すると、  
観測を再現できる



**Figure 2** The post-explosion abundance distributions for the population III  $25 M_{\odot}$  mode with explosion energy  $E_{51} = 0.3$ . Explosive nucleosynthesis takes place behind the shock wave that is generated at  $M_r = 1.8 M_{\odot}$  and propagates outwards. The hydrogen-rich envelope at  $M_r > 9 M_{\odot}$  is not shown.

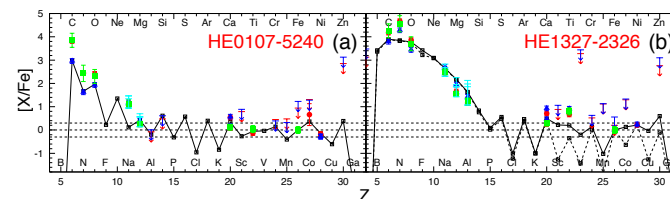
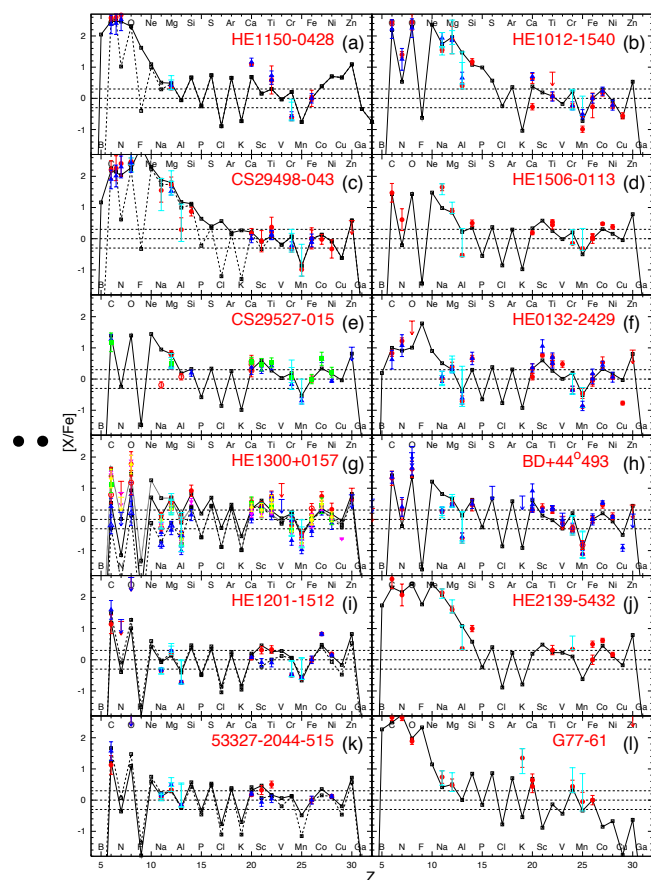
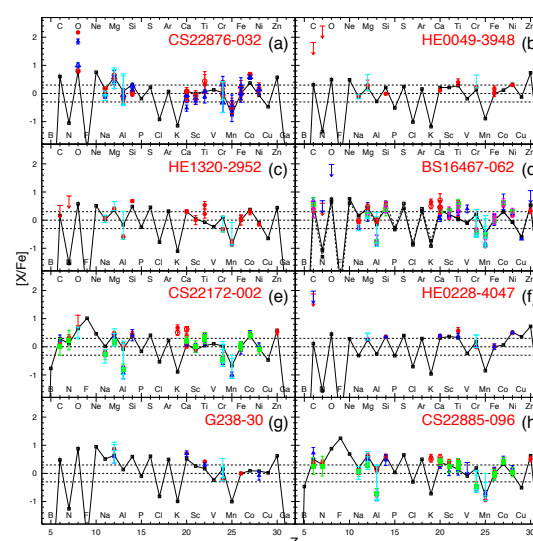
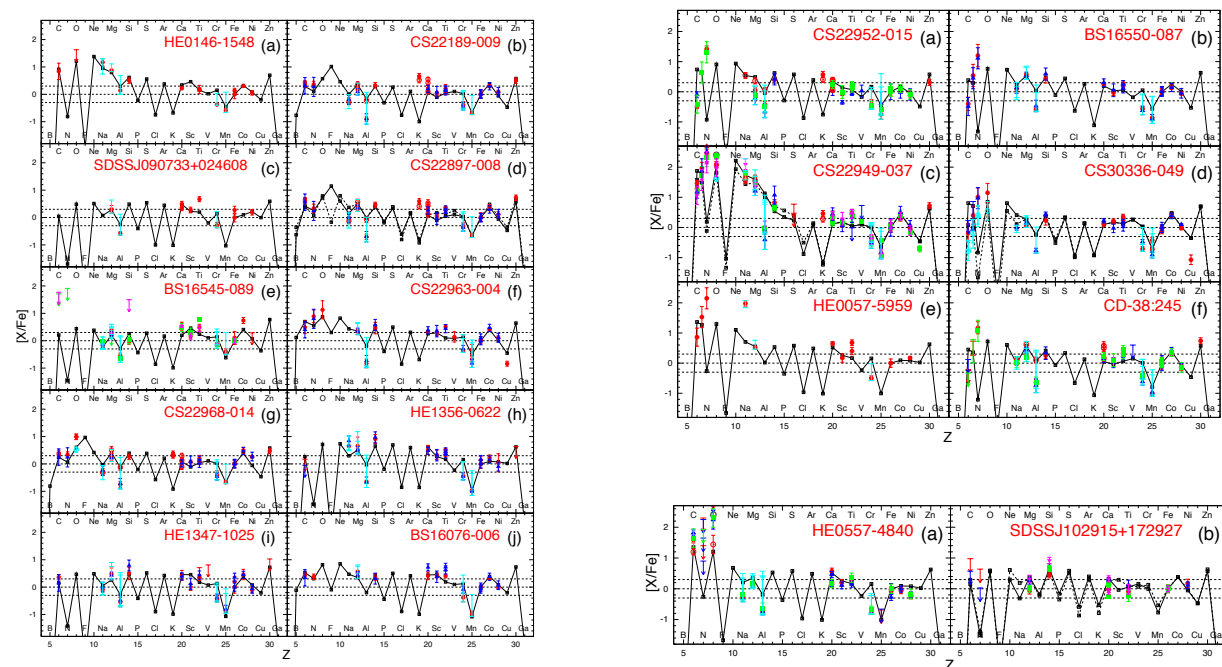
# 初代星のYield計算(2)

- Tominaga et al. (13)



various  
parameters

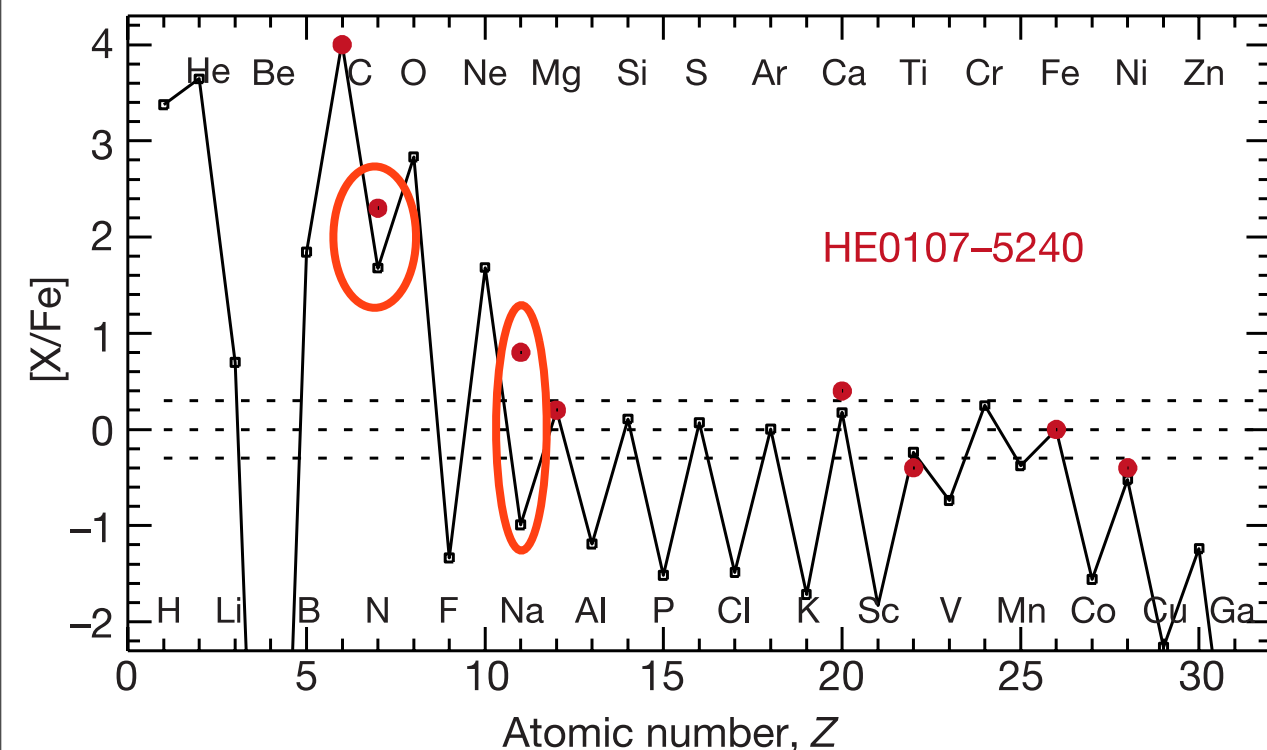
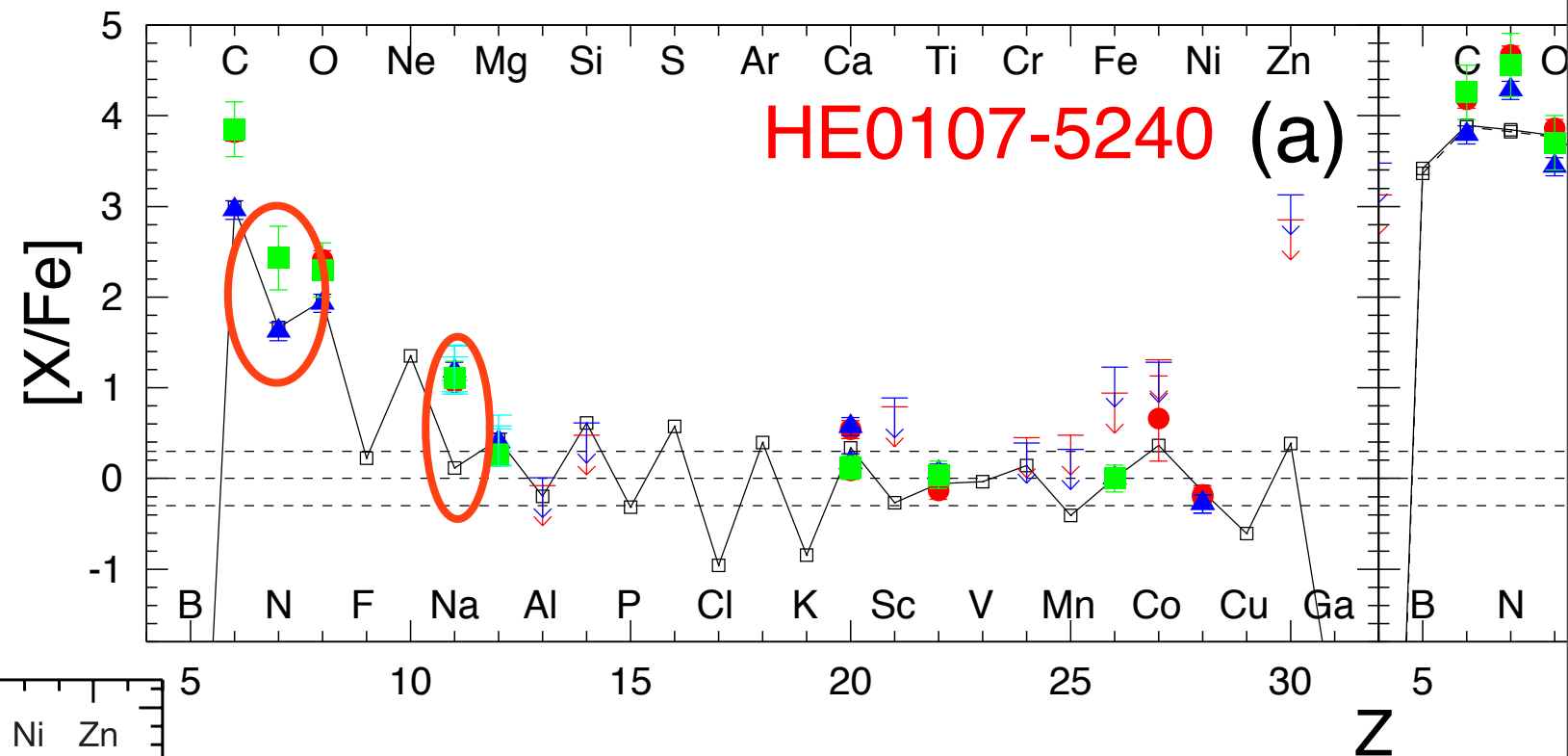
25 Msunの爆発で組成を説明。よさそうだけど...



# 初代星のYield計算(3)

いくつかの元素は説明が難しい。

例えば窒素。  
同じ星(HE0107-5240)の  
ちがう説明なのだが、  
どちらも足りていない。  
(この場合はNaも)



→ 恒星進化理論の問題？  
自転由来の混合で窒素をつくれるかも  
(Chiappini+ 04)

# 回転星コードの開発

1次元恒星進化コード (Takahashi+13, Umeda+12, Yoshida+11)

+ 自転運動の考慮

- ・ 遠心力の考慮 (Endal & Sofia 76)
- ・ 流体不安定由来の混合・角運動量輸送 (Pinsonneault+ 89)

不安定性には以下を考慮

- ・ meridional circulation (温度の不均一)
- ・ dynamical & secular shear inst. (シェア)
- ・ Solberg-Hoiland inst. (遠心力勾配)
- ・ Goldreich-Schubert-Fricke inst. (筒状回転からのずれ)
- ・ Spruit-Tayler dynamo (磁場のkink不安定)

# 回転星コードの開発

1次元恒星進化コード (Takahashi+13, Umeda+12, Yoshida+11)

+ 自転運動の考慮

- ・ 遠心力の考慮 (Endal & Sofia 76)
- ・ 流体不安定由来の混合・角運動量輸送 (Pinsonneault+ 89)

不安定性には以下を考慮

- ・ meridional circulation (温度の不均一)
- ・ dynamical & secular shear inst. (シェア)
- ・ Solberg-Hoiland inst. (遠心力勾配)
- ・ Goldreich-Schubert-Fricke inst. (筒状回転からのずれ)
- ・ Spruit-Tayler dynamo (磁場のkink不安定)

回転星の進化理論、  
不定性が非常に大きい！

# なぜ回転星進化？

## main motivations

”古典的”進化計算では扱えなかった問題

- ①NSの回転速度
- ②SN mechanismとproto-NSの自転運動
- ③Collapsar model for LGRB

など

## necessity

多くの大質量星は高速回転星( $\sim 0.35V_{\text{kep}}$ )

回転は恒星進化に影響するはず

- ①遠心力による構造変化
- ②回転由来の不安定性による核種混合
- ③質量放出率の増加

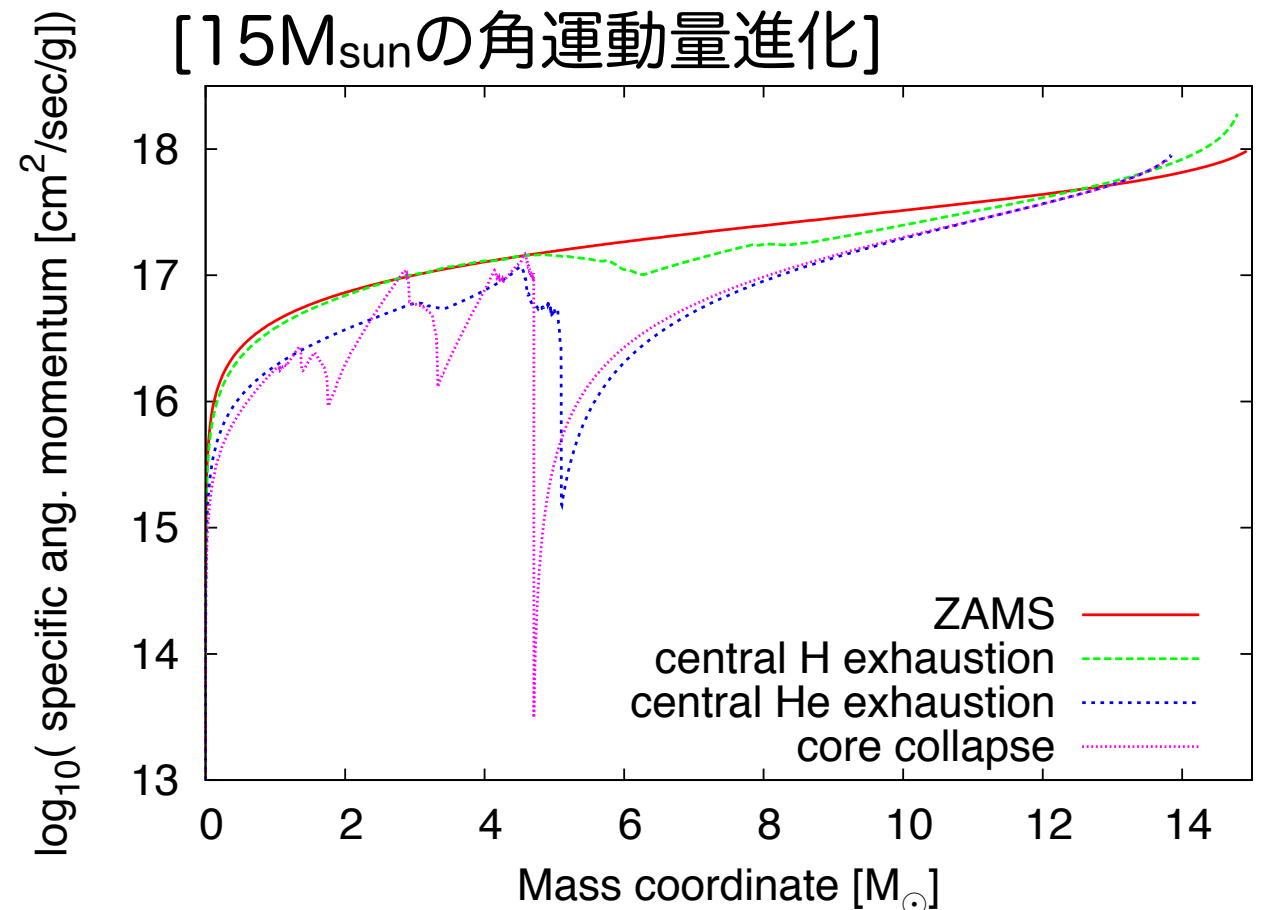
# 現状

太陽組成の大質量星( $10- >100M_{\text{sun}}$ )について

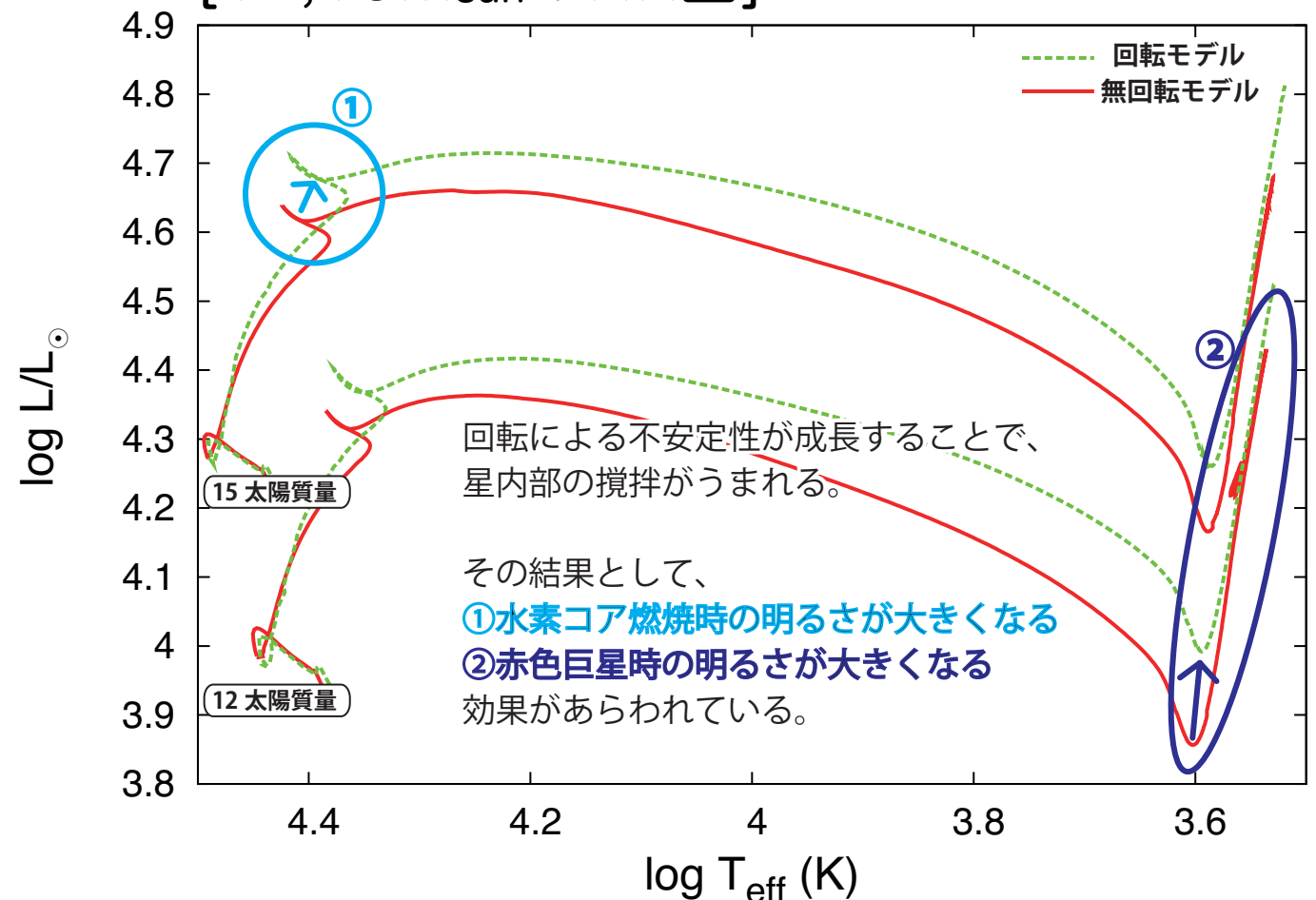
鉄コアの崩壊まで  
計算が可能

先行研究を再現できた  
...あたらしいことしなきゃ。

[ $15M_{\text{sun}}$ の角運動量進化]



[ $12, 15M_{\text{sun}}$ のHR図]



# 恒星進化計算

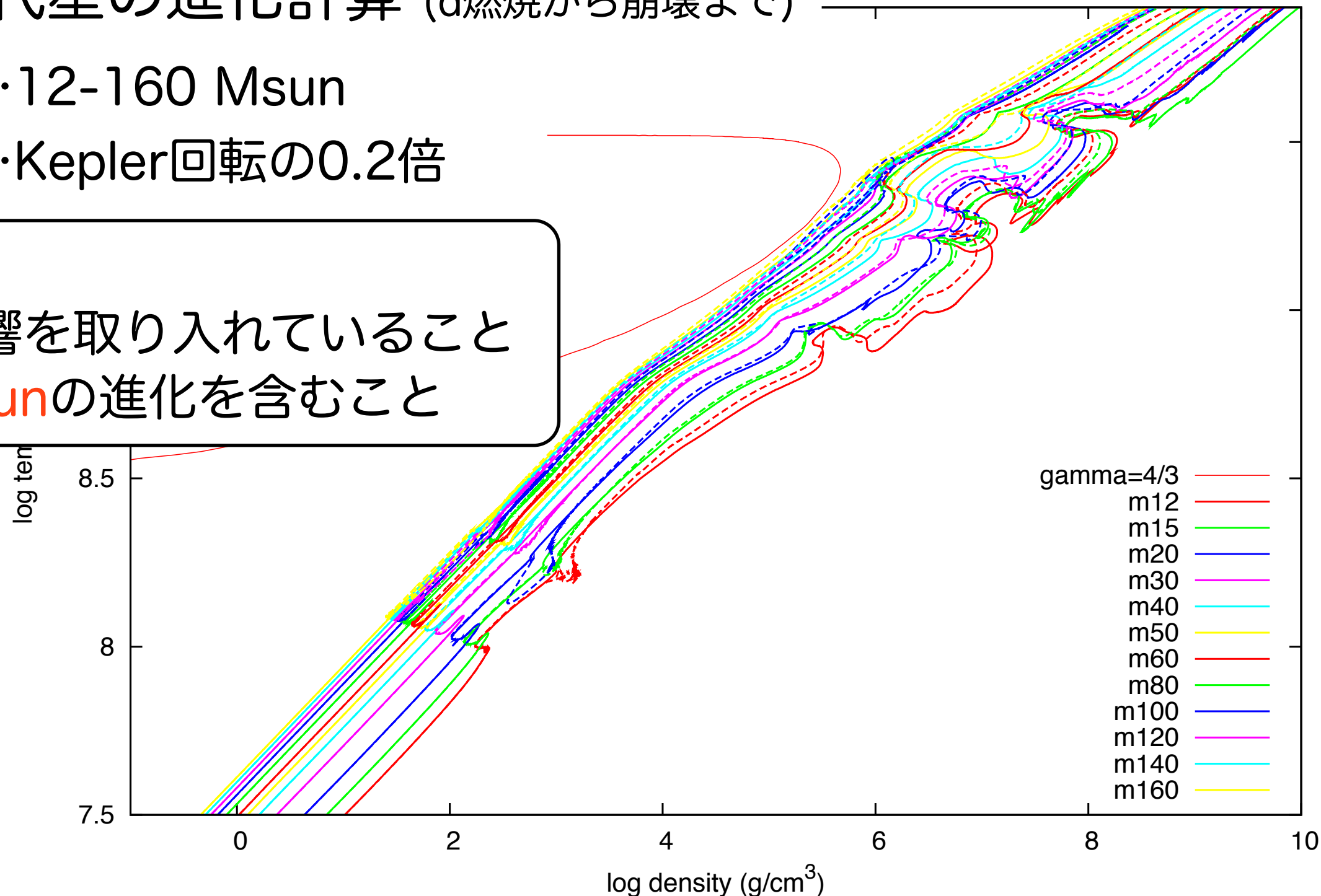
- 大質量初代星の進化計算 (d燃烧から崩壊まで)

初期質量...12-160 Msun

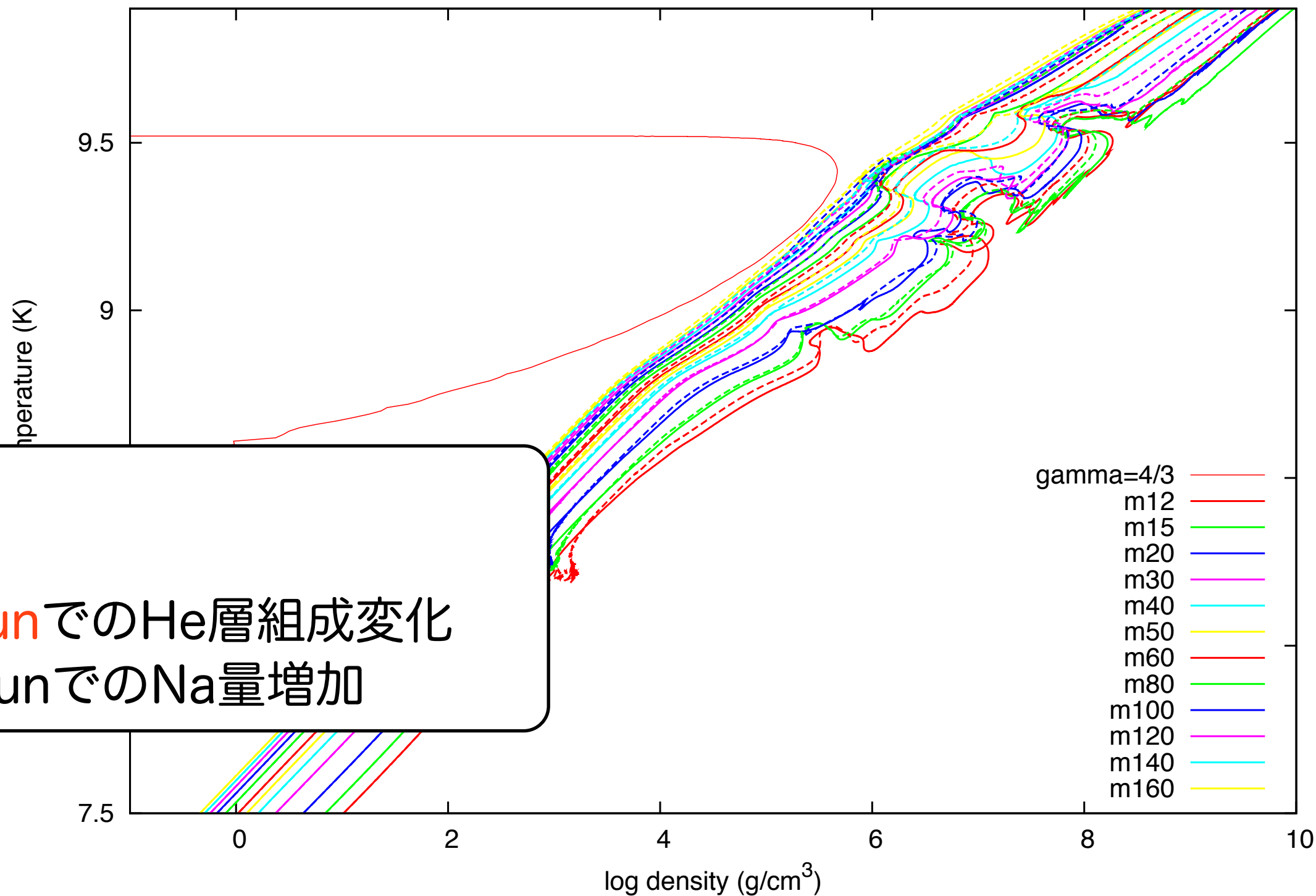
初期回転...Kepler回転の0.2倍

ポイントは

- 回転の影響を取り入れていること
- >100 Msunの進化を含むこと

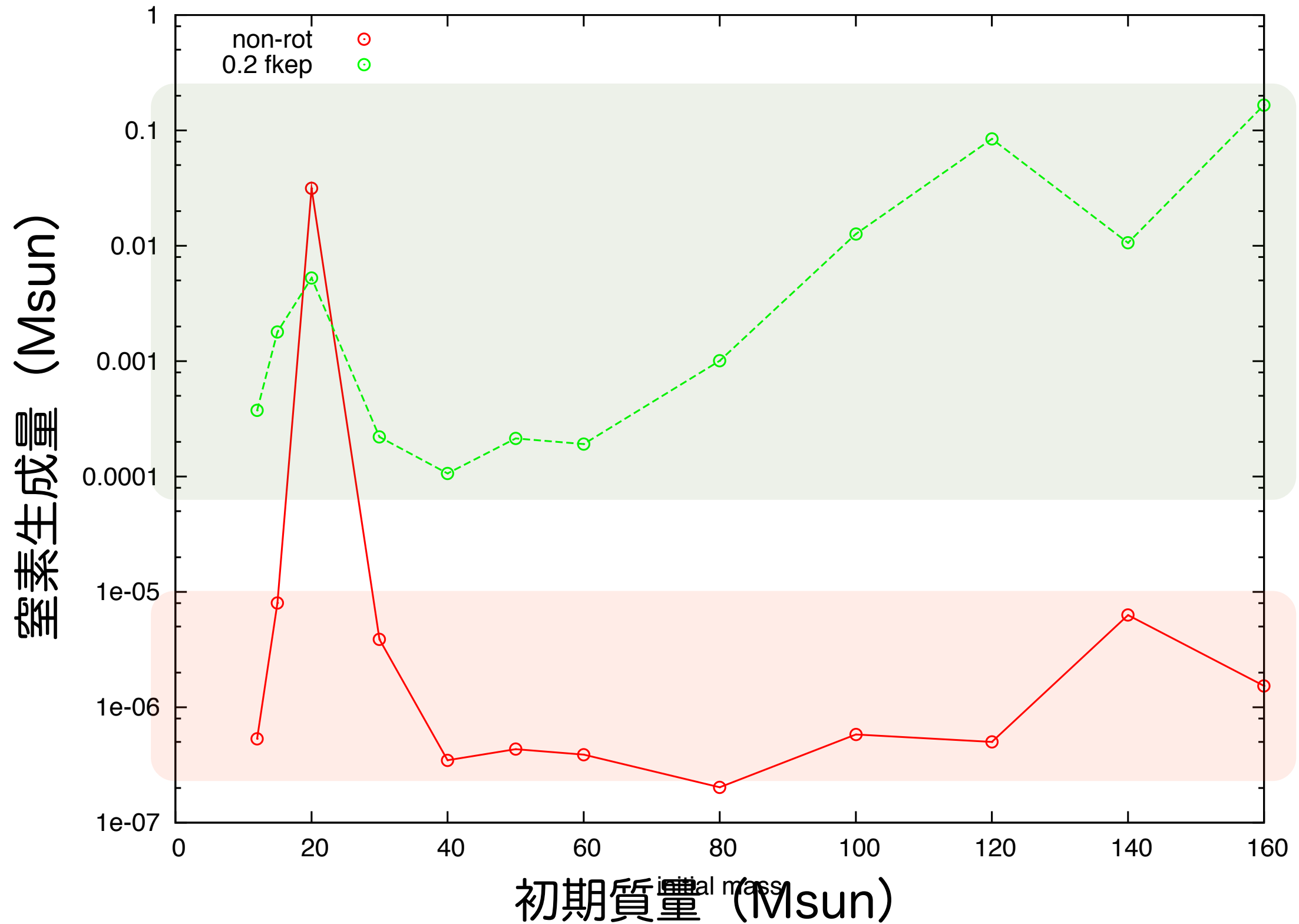


# 恒星進化計算



# 窒素生成(1)

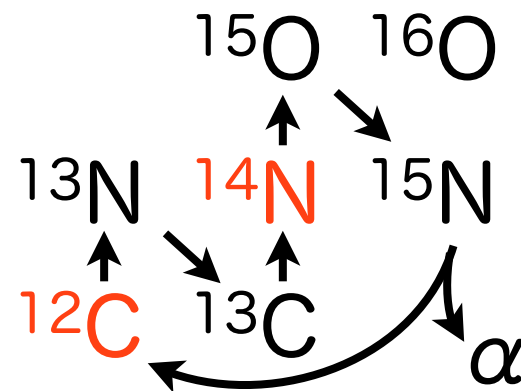
回転モデルは無回転モデルより  
多くの窒素を生成した



# 窒素生成(2)

無回転モデルは多量の窒素を作れない。  
なぜなのか。

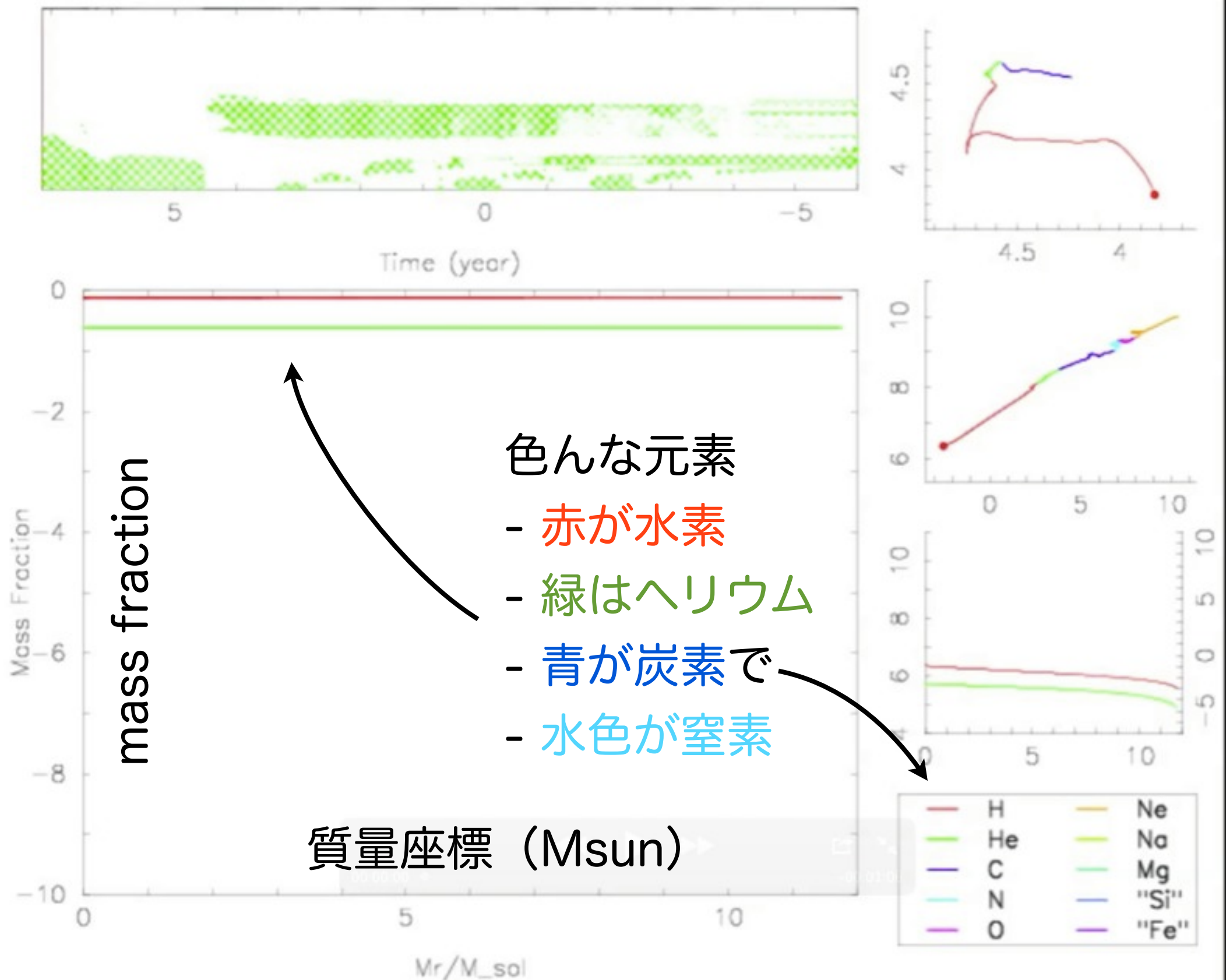
窒素はCNOサイクル（水素燃焼）で合成する  
( $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ が起こりづらいので窒素がたまる)



→ 窒素の合成にはあらかじめ炭素が必要  
しかし初代星の水素層には炭素がない。

# 12 Msun の進化

回転なし



# 窒素生成(3)

無回転モデルは多量の窒素を作れない。  
なぜなのか。

- 無回転モデルもはじめは窒素つくる (initial triple alpha)
- COコアに取り込まれた窒素は壊される
- 水素層には炭素がなく、あたらしい窒素もつくらない
- 放出される窒素は、ヘリウム層にのこったものだけ

回転モデルでは、回転由来の混合がある。

- 無回転モデルもはじめは窒素つくる (initial triple alpha)
- COコアに取り込まれた窒素は壊される
- 水素層には炭素がなく、あたらしい窒素もつくらない
- 放出される窒素は、ヘリウム層にのこったものだけ

# 窒素生成(3)

無回転モデルは多量の窒素を作れない。  
なぜなのか。

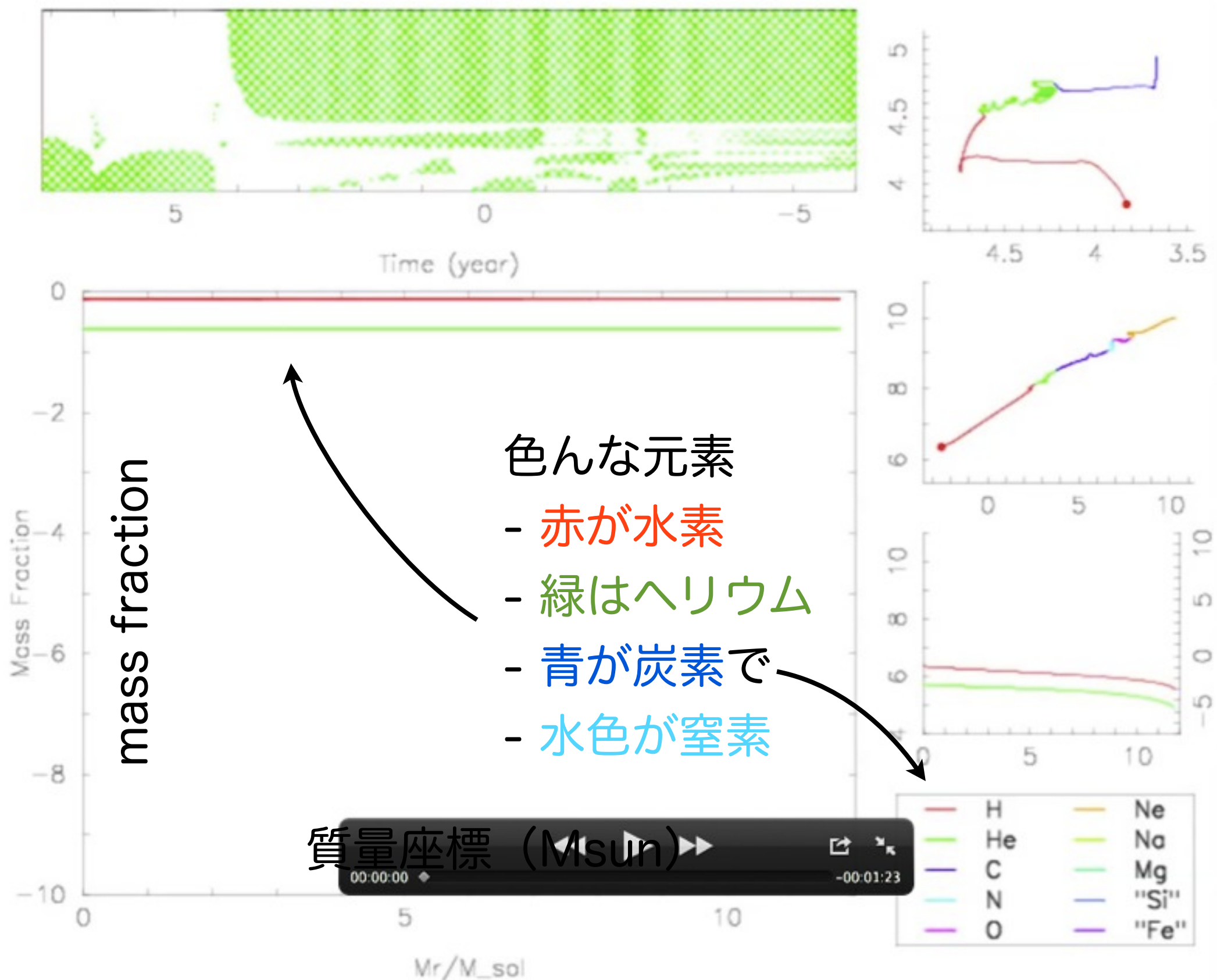
- 無回転モデルもはじめは窒素つくる (initial triple alpha)
- COコアに取り込まれた窒素は壊される
- 水素層には炭素がなく、あたらしい窒素もつくらない
- 放出される窒素は、ヘリウム層にのこったものだけ

回転モデルでは、回転由来の混合がある。

- 無回転モデルもはじめは窒素つくる (initial triple alpha)
- COコアに取り込まれた窒素は壊される
- 水素層に炭素をとりこみ、新しく窒素をつくる
- 放出される窒素は、ヘリウム層にのこったものだけ

# 12 Msun の進化

回転あり

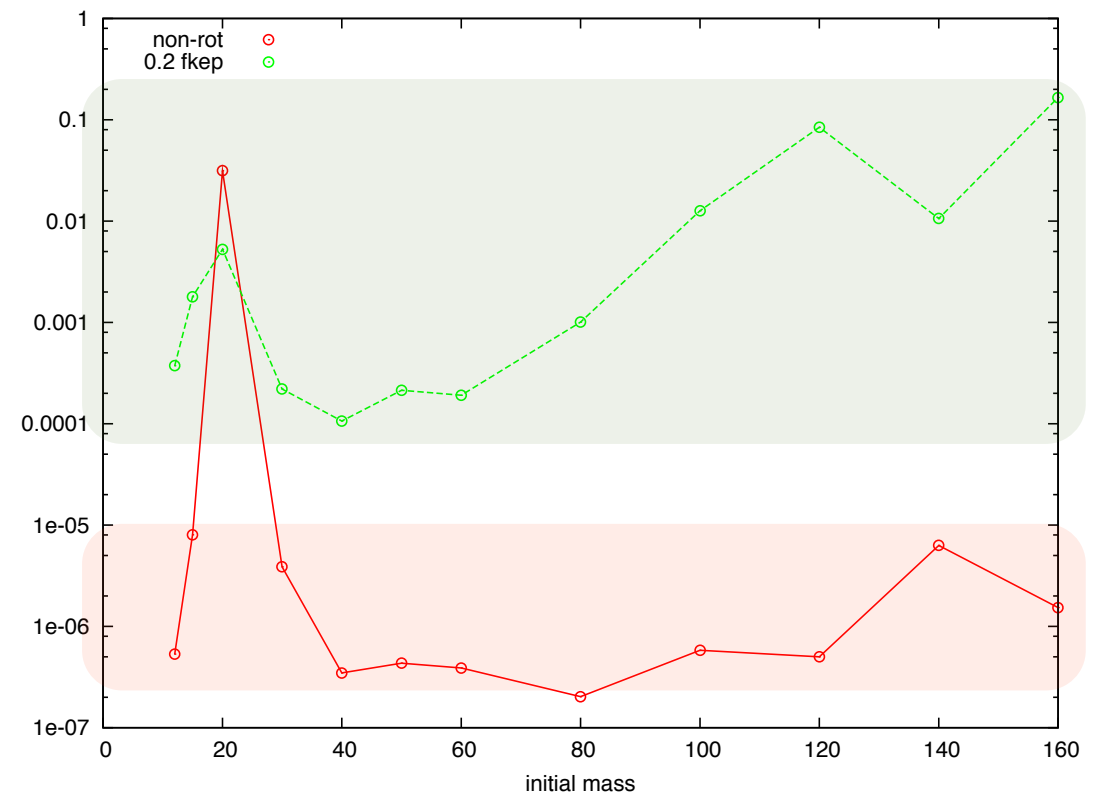


# 窒素生成(4)

回転モデルでは、回転由来の混合がある。

- ヘリウム燃焼期に、生成した炭素・酸素が水素層まで運ばれる
- 水素層でのCNOサイクルがブーストして、多量の窒素を合成
- COコアに取り込まれた窒素は壊される
- ヘリウム層にのこる窒素が多くなる

回転モデルは無回転モデルより多くの窒素を生成した



# ヘリウム層進化(1)

回転の影響は星の外層で重要。

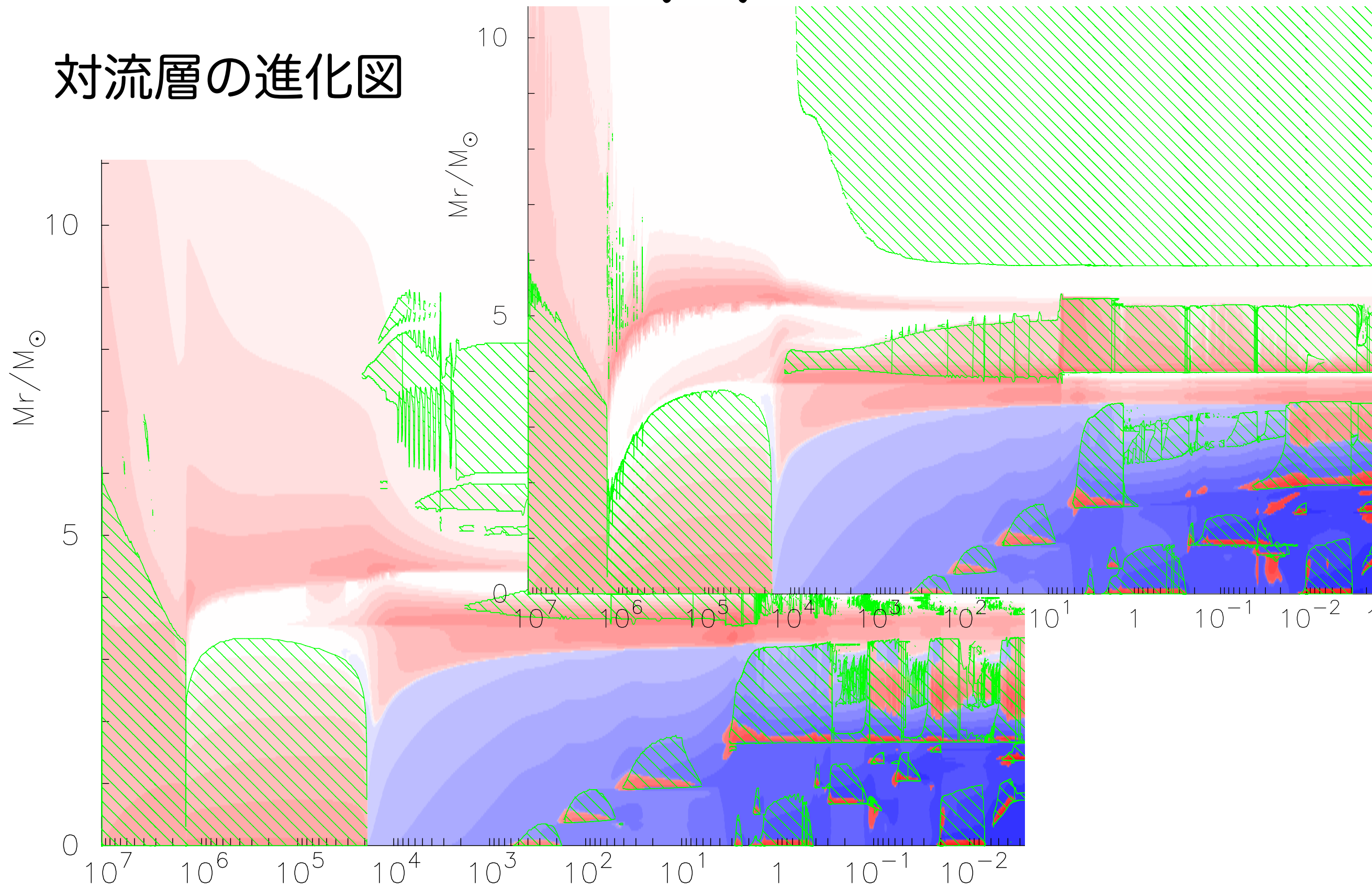
- CNOサイクルブーストのため。
  - ・強力なエネルギー生成を行う。
  - ・ヘリウム層を巨大にする。
- 回転混合の効率は、Kelvin-Helmholtz timescale程度(?)  
ニュートリノ冷却の重要なコアの後期進化には影響しない

星外層の構造・組成は、軽い元素の生成に影響する

- 軽い元素(~Al)は低温でも合成できる
- 星の外側はSN shockに影響されにくい
- CEMPの説明などに使われる

# ヘリウム層進化(2)

対流層の進化図



# ヘリウム層進化(3)

そこでヘリウム層での組成変化に注目。

- 崩壊直前の組成分布があるので、  
爆発に影響されないと仮定して軽元素生成量を見積もる



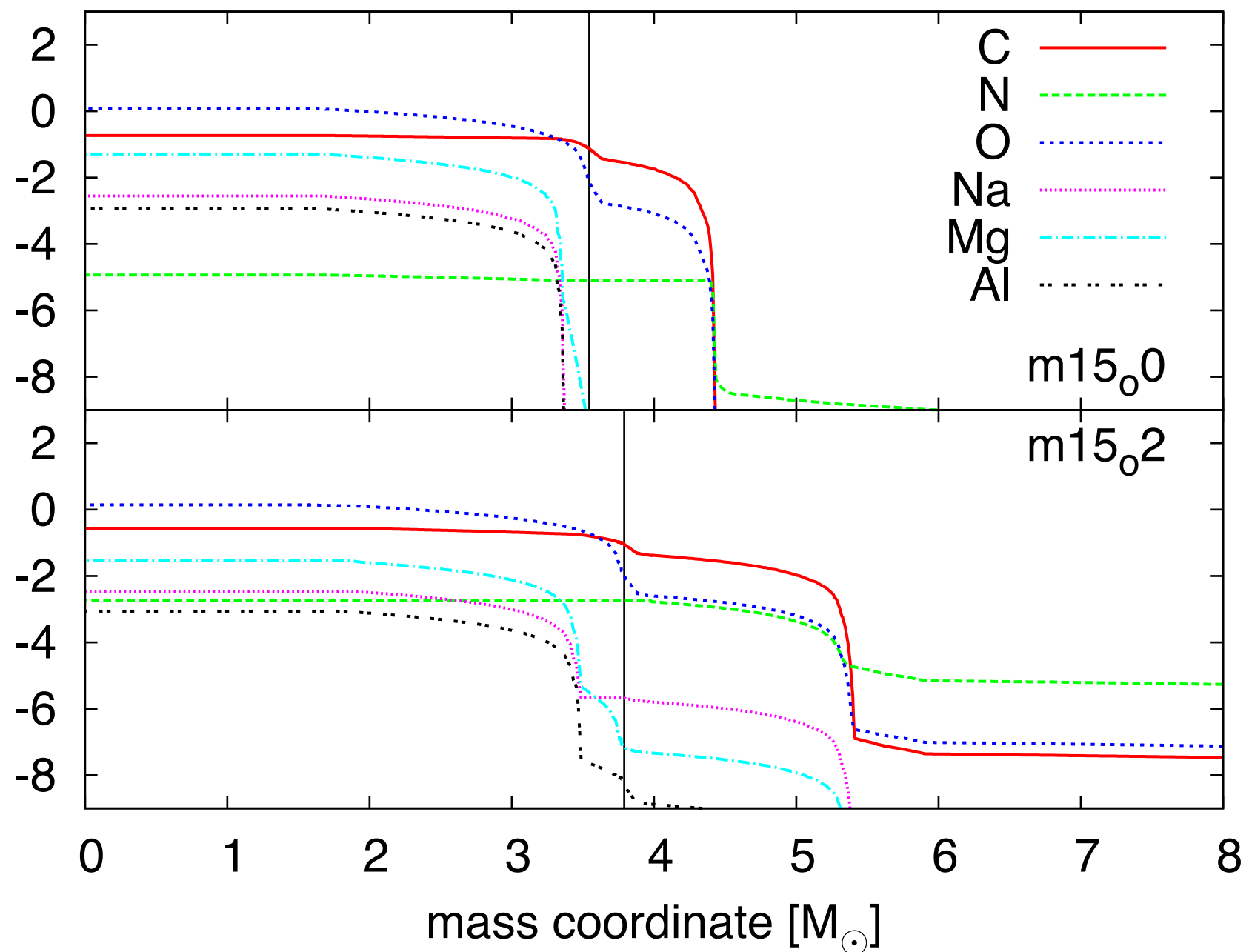
これを外から積分する

- 結果、COコア質量に依存した組成区分が可能
  - 2-10 Msun : N rich
  - 12-20 Msun : O rich
  - 30- Msun : Mg rich

# 低質量の場合(12-20 Msun)

- COコア質量に依存した組成の区分
  - 2-10 Msun : N rich

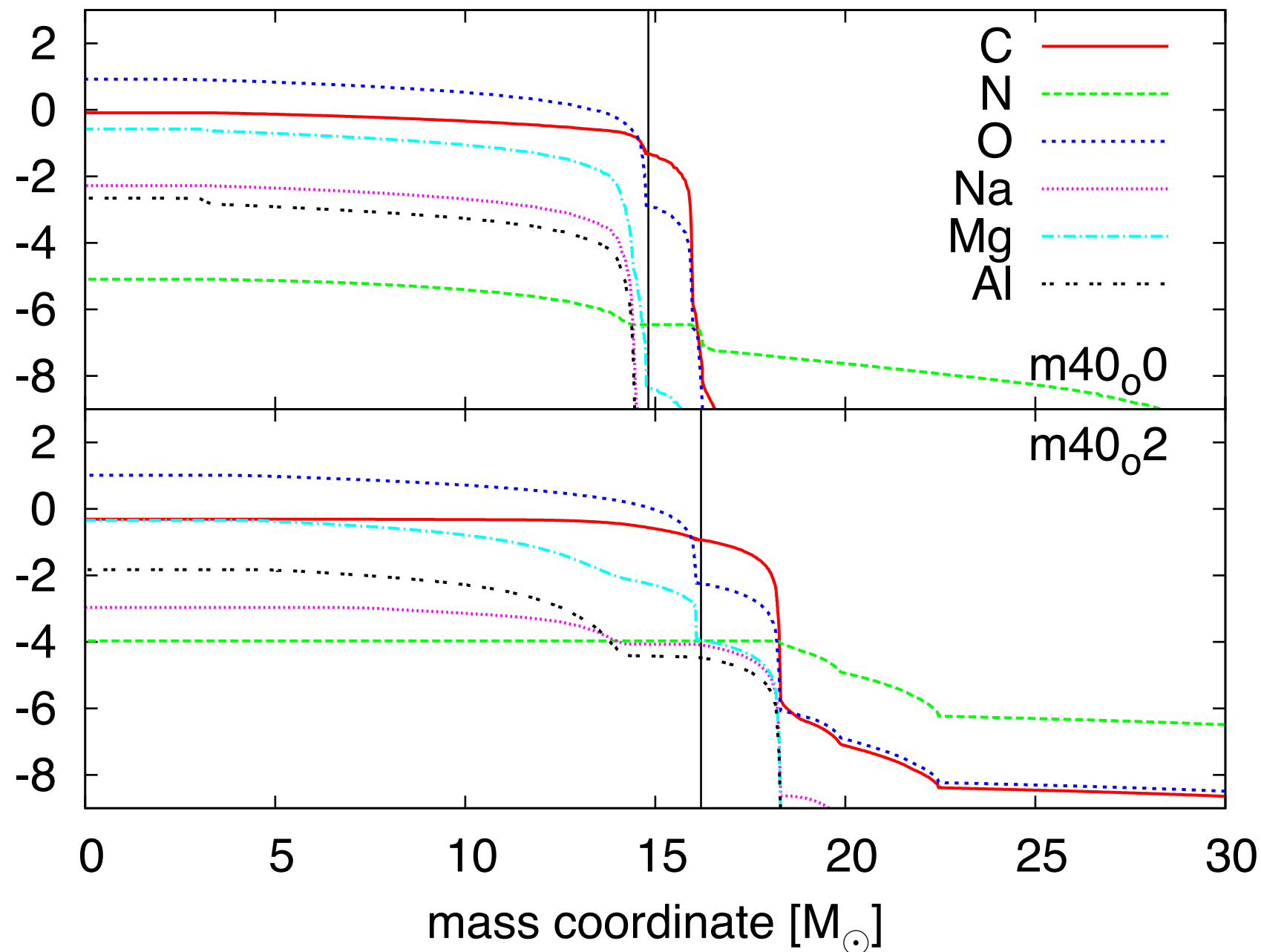
- コアの組成は  
回転によらない
- 回転モデルは  
**N, Na, Mg**など作る



# 中間質量(30-60 Msun)

- COコア質量に依存した組成の区分
  - ・ 12-20 Msun : O rich (Nがなくなる)

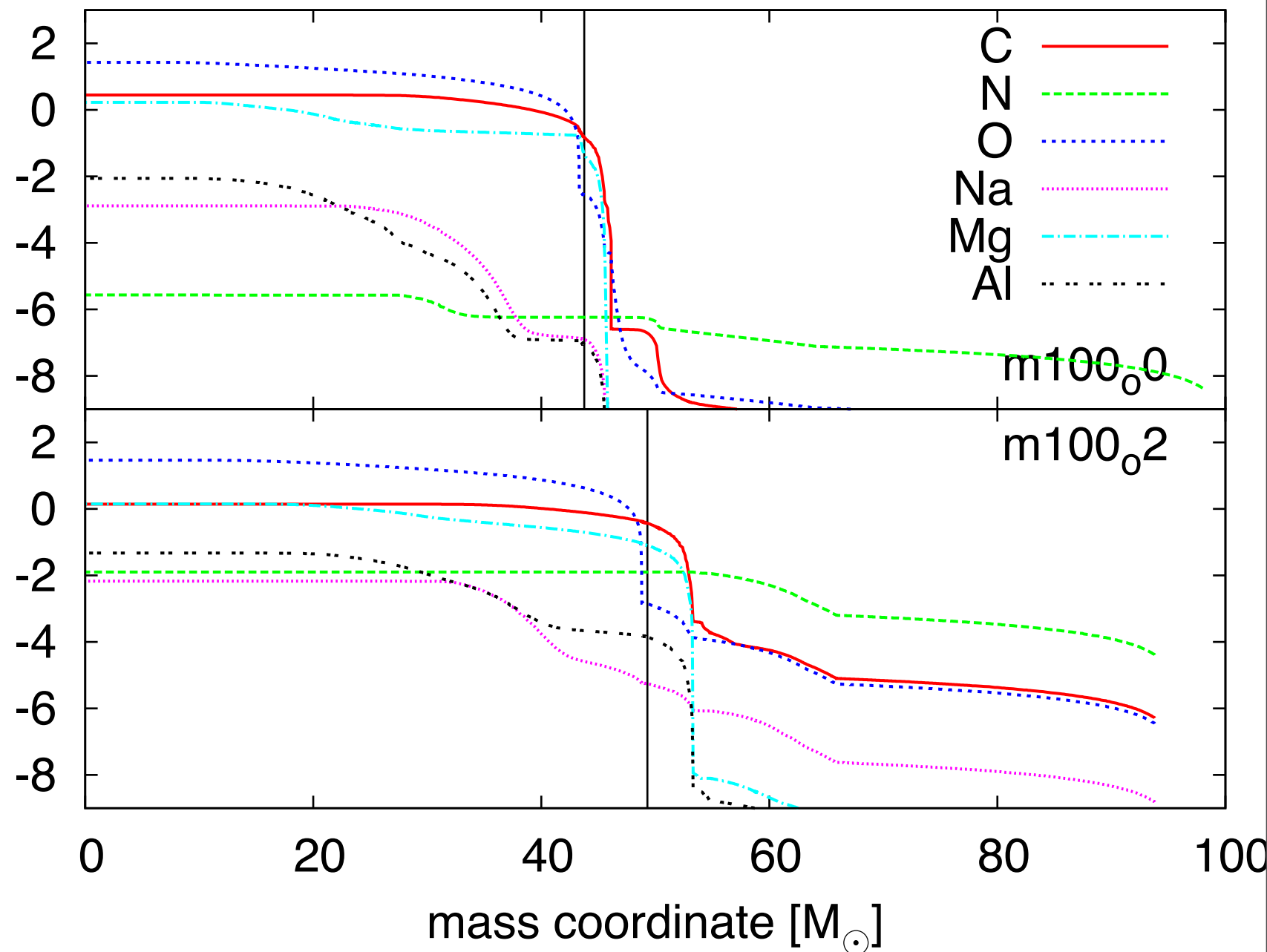
- 中間質量では  
Nを燃やす



# 大質量(80- Msun)

- COコア質量に依存した組成の区分
  - ・ 30- Msun : Mg rich (O→Mg)

- 大質量では  
Oまで燃えて  
Mgを作る



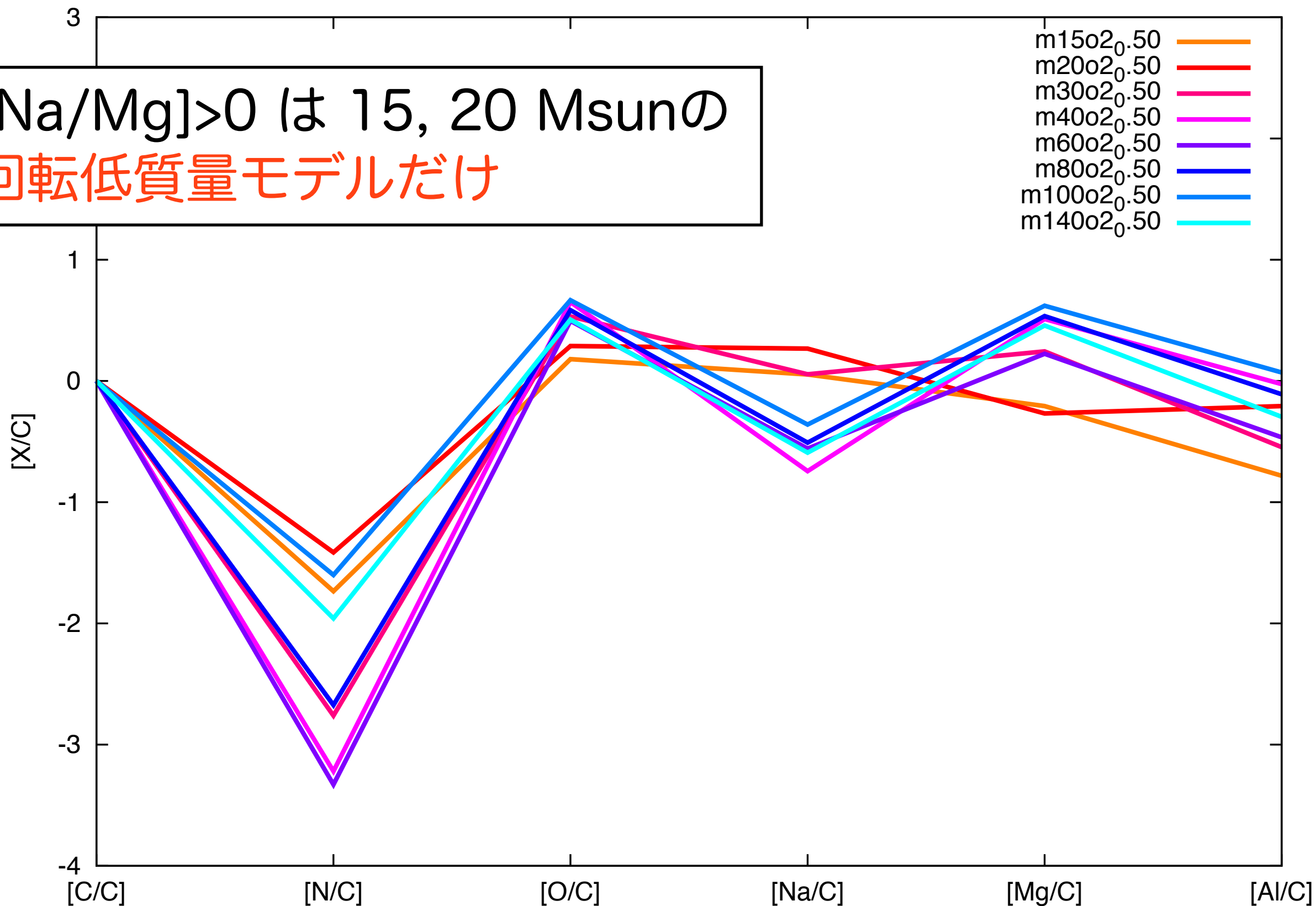
# Naの増加(1)

さらに、回転混合によってHeコアの進化が異なる

- CNOサイクルブーストのため。
  - ・強力なエネルギー生成を行う。
  - ・ヘリウム層を巨大にする。
  - ・ヘリウムコアが次第に大きくなる
- (多分) CO比の変化を通じてNa, Mg量の違いに帰結

# Naの増加(2)

[Na/Mg]>0 は 15, 20 Msunの  
回転低質量モデルだけ



# 結果のまとめ

## 窒素について

- 無回転モデルは窒素をつくれない。  
炭素を含む水素層がないから。
- 回転モデルは割合つくれている  
回転混合で炭素が混ざるから。

## ヘリウム層について

- ヘリウム層の厚さは回転で増える
- ヘリウム層の組成は初期（COコア）質量による
  - 12-20 Msun: N rich
  - 30-60 Msun: O rich
  - 80- Msun: Mg rich

## Naについて

- 回転モデルはNa rich, 低質量だと  $[\text{Na}/\text{Mg}] > 0$
- CO比がちがうことに起因か

# 観測との比較

## 窒素について

- 現実のEMPは窒素を持っている。  
回転による内部混合で窒素を作る

## ヘリウム層について

- ヘリウム層の組成は初期 (COコア) 質量による  
80以上の外層はMg rich (O def.)、観測に合わない

## Naについて

- 回転による内部混合でNa量が増加
- 特に $[\text{Na}/\text{Mg}] > 0$ の観測は低質量回転モデルでのみ説明可能

