

放射線教育フォーラム  
2024年度第1回勉強会  
2024年6月16日

# 環境中に存在する放射性核種と その起源

放射線教育フォーラム  
京都大学名誉教授

柴田 誠一

**放射線**: ある線源から放出される光線または粒子。

**放射線**が観測されたとき、その放射線を放出している放射線源(放射性同位体、加速器や原子炉、宇宙線など)が、どこかにある。

**放射能**: 原子核が、放射線をともなって自発的に変換していく現象のこと。

**放射能**という言葉は、上記の意味に加えて、単位時間に壊変する原子核の数(ベクレル単位で表される放射能量)、放射線を放出する物質(放射性物質あるいは放射性同位体)を表すこともある。

2007年7月16日10時13分頃 中越沖地震発生

当日夜 大阪 熊取地区 環境放射線レベル 上昇

地震と環境放射線レベルの上昇に因果関係があるか？

当日夜 大阪 熊取地区 局地的豪雨

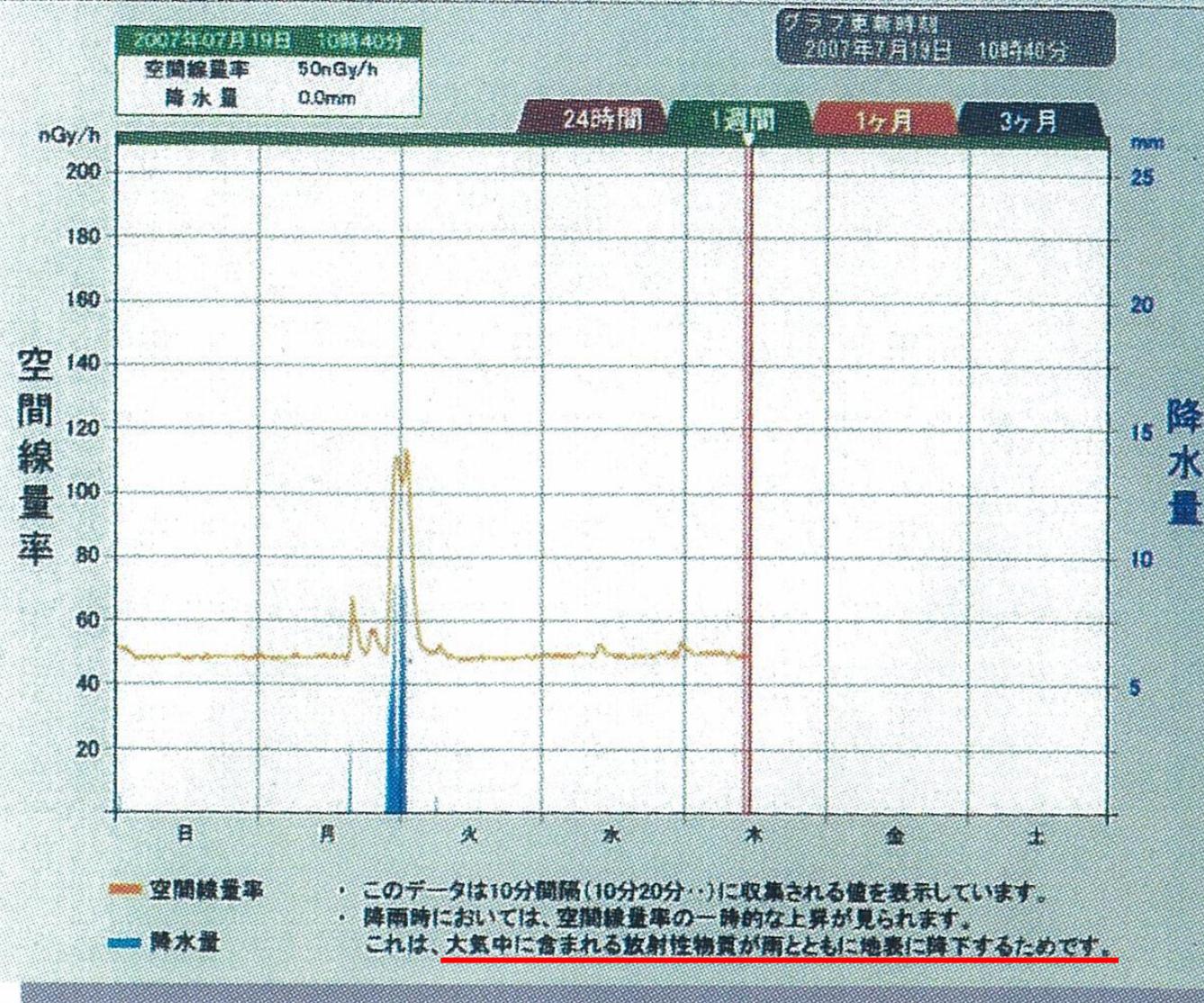
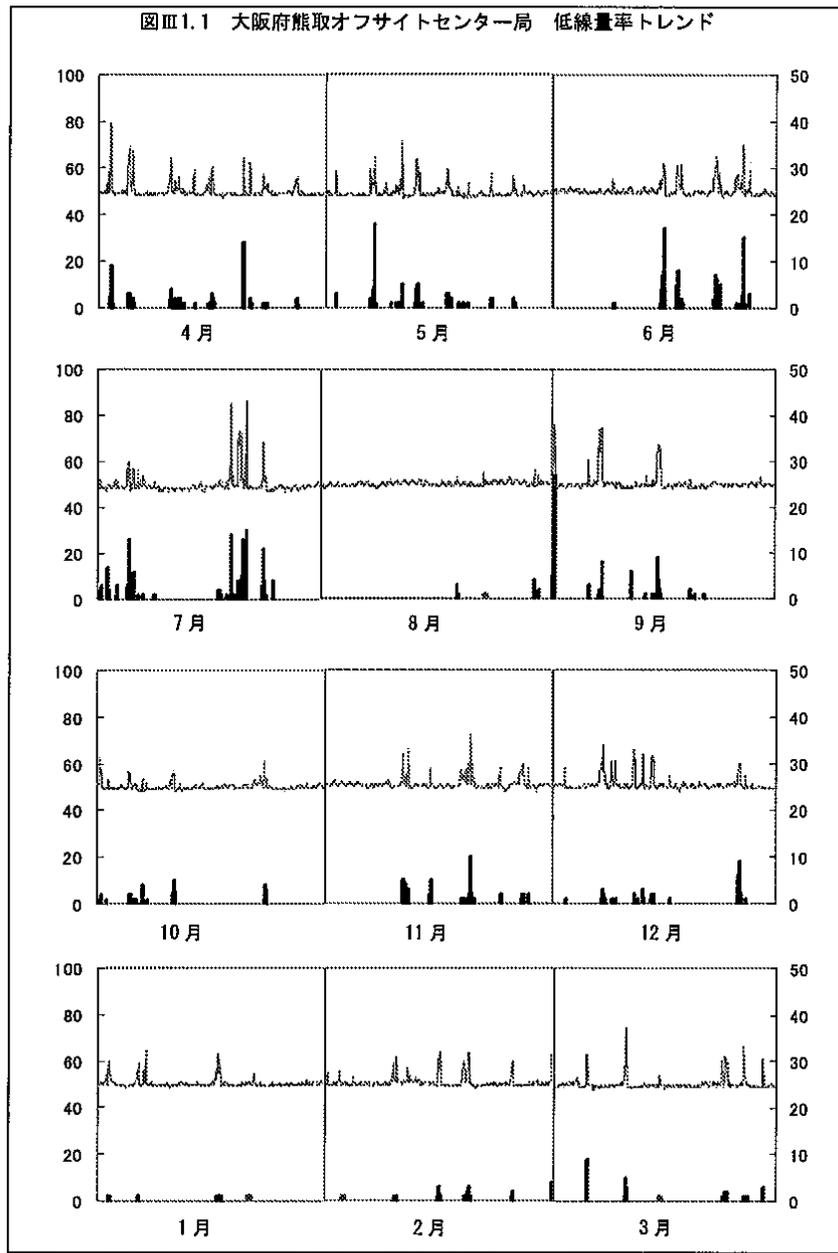


図1.空間線量率と降水量との関係(7/15~19)  
測定場所:熊取オフサイトセンター

図III.1.1 大阪府熊取オフサイトセンター局 低線量率トレンド



※・は感雨(1mm未満の降雨)

空間線量率と降水量との関係

測定場所:熊取オフサイトセンター

環境放射線レベルが上昇したのは、大気中に含まれる放射性物質が雨とともに地表へ降下するため

この大気中に含まれる放射性物質とは？

## 天然に存在する放射性核種

- 1) 天然一次放射性核種
- 2) 天然二次放射性核種
- 3) 誘導放射性核種
- 4) 消滅放射性核種

## 同位体

原子番号が同じで、質量数が異なる原子を互いに同位体であるという。

## 核種

個々の原子核に独立の意味をもたせる場合は核種という。

例：  $^{12}\text{C}$  と  $^{13}\text{C}$  は互いに同位体であるが、異なる核種である。

## 天然一次放射性核種

太陽系が誕生した46億年前から存在し、半減期が長いいため放射壊変によって消失せず現在まで残っている核種のこと。

### 系列をつくる放射性核種

$^{238}\text{U}$  ( $T = 45$ 億年) から出発するウラン系列

$^{235}\text{U}$  ( $T = 7$ 億年) から出発するアクチニウム系列

$^{232}\text{Th}$  ( $T = 140$ 億年) から出発するトリウム系列

### 系列を作らない放射性核種

代表的なものとして、

$^{40}\text{K}$  ( $T = 13$ 億年)、 $^{87}\text{Rb}$  ( $T = 480$ 億年)など

$T$ : 半減期

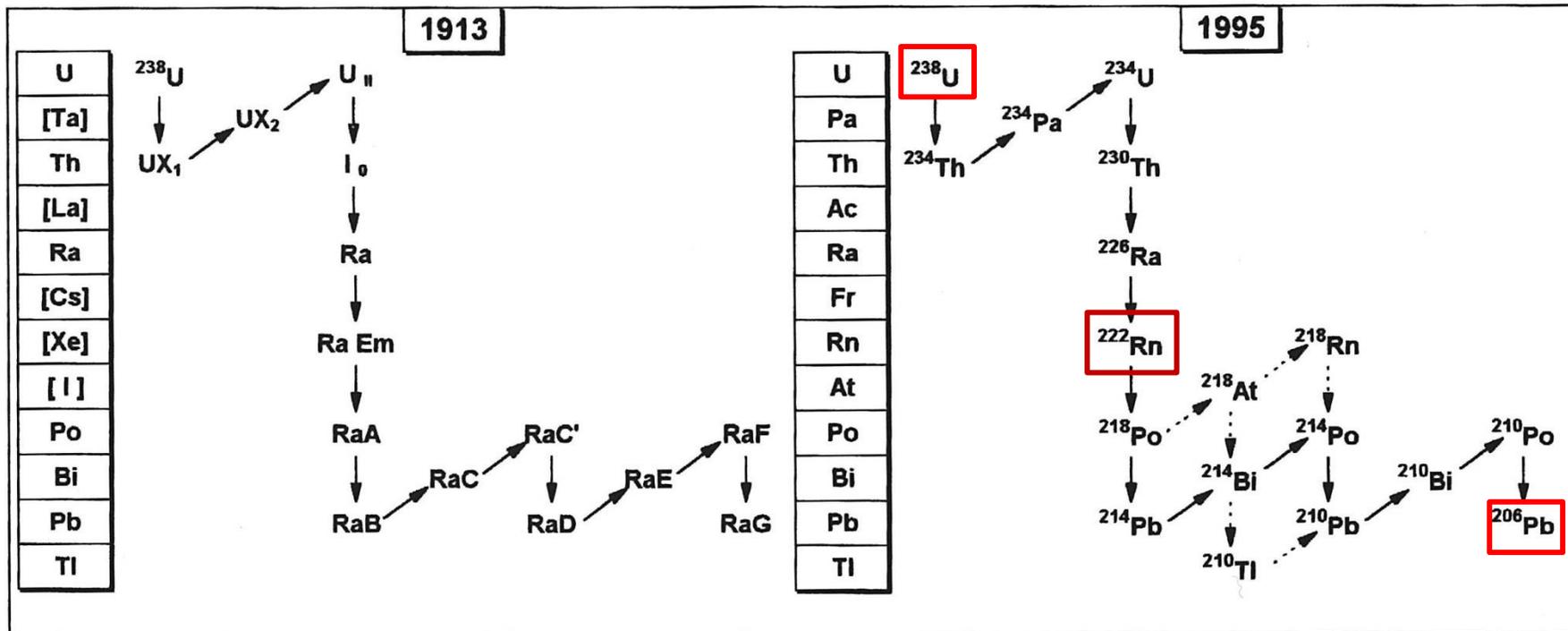
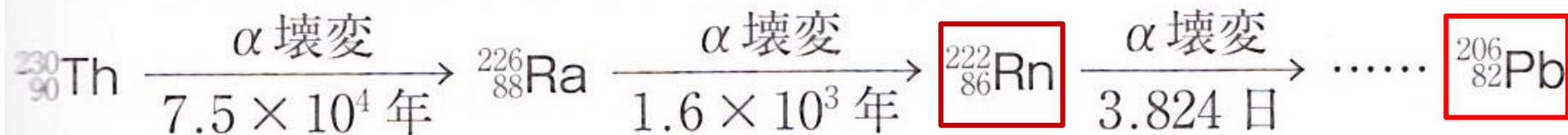


Fig. 3. The  $4n + 2$  radioactive family in 1913 and 1995. Dotted arrows indicate minor branchings.

ウラン系列 :  $^{238}\text{U} \rightarrow \dots \rightarrow ^{222}\text{Rn} \dots \rightarrow ^{206}\text{Pb}$

親核種

〔例〕  ${}^{238}_{92}\text{U}$  は  $\alpha$  壊変,  $\beta$  壊変によって次のようにな変化していく.



安定核種

→ の下の時間は半減期. 元素記号の左肩の数字は質量数を表す.

$\gamma$  線は  $\alpha$  線,  $\beta$  線に伴って放出される.  $\gamma$  線が放出される際は, 原子核のエネルギーが変化するだけである.

## 放射壊変

$\alpha$  壊変は、 $\alpha$  線すなわち  $\alpha$  粒子を原子核から放出する壊変であり、 $\alpha$  粒子は高速のヘリウム原子核 ( ${}^4\text{He}^{2+}$ ) で、陽子2個と中性子2個からなる。

また、 $\beta$  壊変は  $\beta$  線を原子核から放出する壊変であり、 $\beta$  線は電子の流れで、原子核から電子を放出する。

したがって、

「 $\alpha$  壊変によって、原子番号が2、質量数が4減少し、 $\beta$  壊変によって原子番号が1増加し、質量数は変わらない。」

\* 厳密にいうと  $\beta$  壊変にはこのような  $\beta^-$  壊変の他、 $\beta^+$  壊変 (陽電子を放出) や 軌道電子捕獲 (軌道電子が核に吸収される) があり、後二者の場合には、原子番号が1減少する。安定な核種より中性子数の少ない核種などで起こる。

## 天然二次放射性核種

壊変系列を構成する放射性核種の中で、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$  以外は短寿命の放射性核種である。

このような核種を天然二次放射性核種と呼ぶ。親核種 ( $^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ ) が存在する限り、二次放射性核種も常に存在する。

放射性物質が放出する  $\gamma$  線に基づく環境中の外部放射線量の大部分は、天然二次放射性核種に由来する。

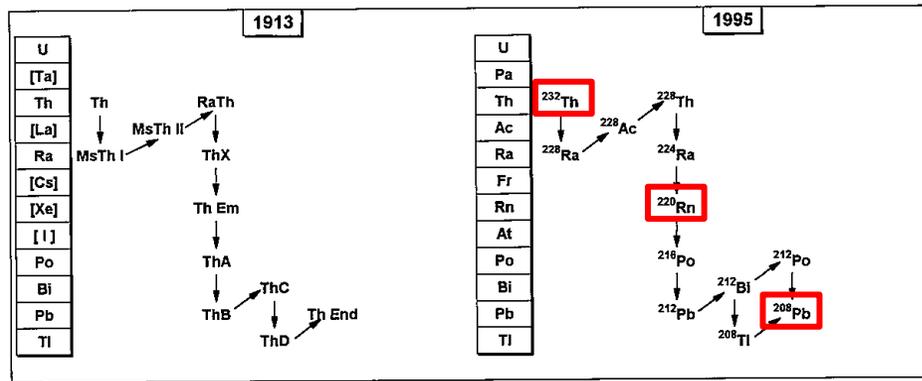


Fig. 2. The  $4n$  radioactive family in 1913 and 1995.

## トリウム系列

親核種:  $^{232}\text{Th} \rightarrow$

$\dots \rightarrow ^{220}\text{Rn} \dots \rightarrow ^{208}\text{Pb}$

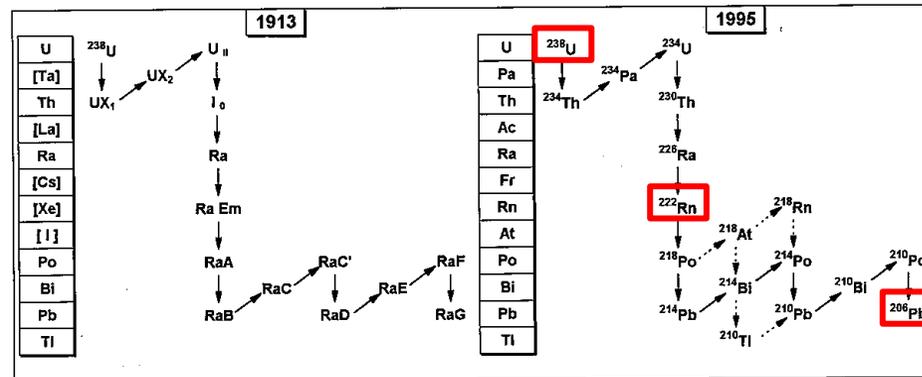


Fig. 3. The  $4n + 2$  radioactive family in 1913 and 1995. Dotted arrows indicate minor branchings.

## ウラン系列

親核種:  $^{238}\text{U} \rightarrow$

$\dots \rightarrow ^{222}\text{Rn} \dots \rightarrow ^{206}\text{Pb}$

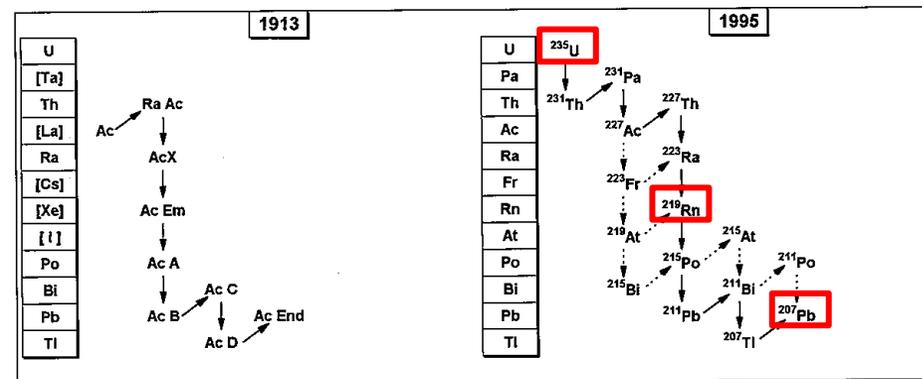


Fig. 4. The  $4n + 3$  radioactive family in 1913 and 1995. Dotted arrows indicate minor branchings.

## アクチニウム系列

親核種:  $^{235}\text{U} \rightarrow$

$\dots \rightarrow ^{219}\text{Rn} \dots \rightarrow ^{207}\text{Pb}$

## 誘導放射性核種

天然において核反応が起こり、その結果、生成する放射性核種を「誘導放射性核種」と呼ぶ。核反応を起こすための高エネルギー粒子としては地球外から到達する宇宙線が重要なために、通常は大気中で生成する誘導放射性核種に注目する。

例:  $^3\text{H}$  ( $T = 12$ 年),  $^7\text{Be}$  ( $T = 53$ 日),  $^{14}\text{C}$  ( $T = 5730$ 年)

宇宙線の発見: 1912年 ヘス

## 消滅放射性核種

太陽系の形成過程のある時期までは存在し、現在得られる試料中に壊変生成物が見出され、存在が確認できる核種のこと。

例： $^{129}\text{I}$  ( $T = 1600$ 万年),  $^{244}\text{Pu}$  ( $T = 8000$ 万年) がある。

## 放射性核種

## 半減期

$^{87}\text{Rb}$

$4.8 \times 10^{10}$  年

天然一次放射性核種

$^{232}\text{Th}$

$1.4 \times 10^{10}$

$^{238}\text{U}$

$4.5 \times 10^9$

$^{40}\text{K}$

$1.3 \times 10^9$

$^{235}\text{U}$

$7.0 \times 10^8$

-----

-----

$^{244}\text{Pu}$

$8.0 \times 10^7$

消滅放射性核種

$^{129}\text{I}$

$1.6 \times 10^7$

$^{247}\text{Cm}$

$1.6 \times 10^7$

$^{239}\text{Pu}$

$2.4 \times 10^4$

放射性核種	半減期	同位体比
$^{238}\text{U}$	$4.5 \times 10^9$ 年	99.27 %
$^{235}\text{U}$	$7.0 \times 10^8$	0.72 %
$^{244}\text{Pu}$	$8.0 \times 10^7$	消滅放射性核種

ウラン ( $^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ ) の半減期と同位体比からわかること

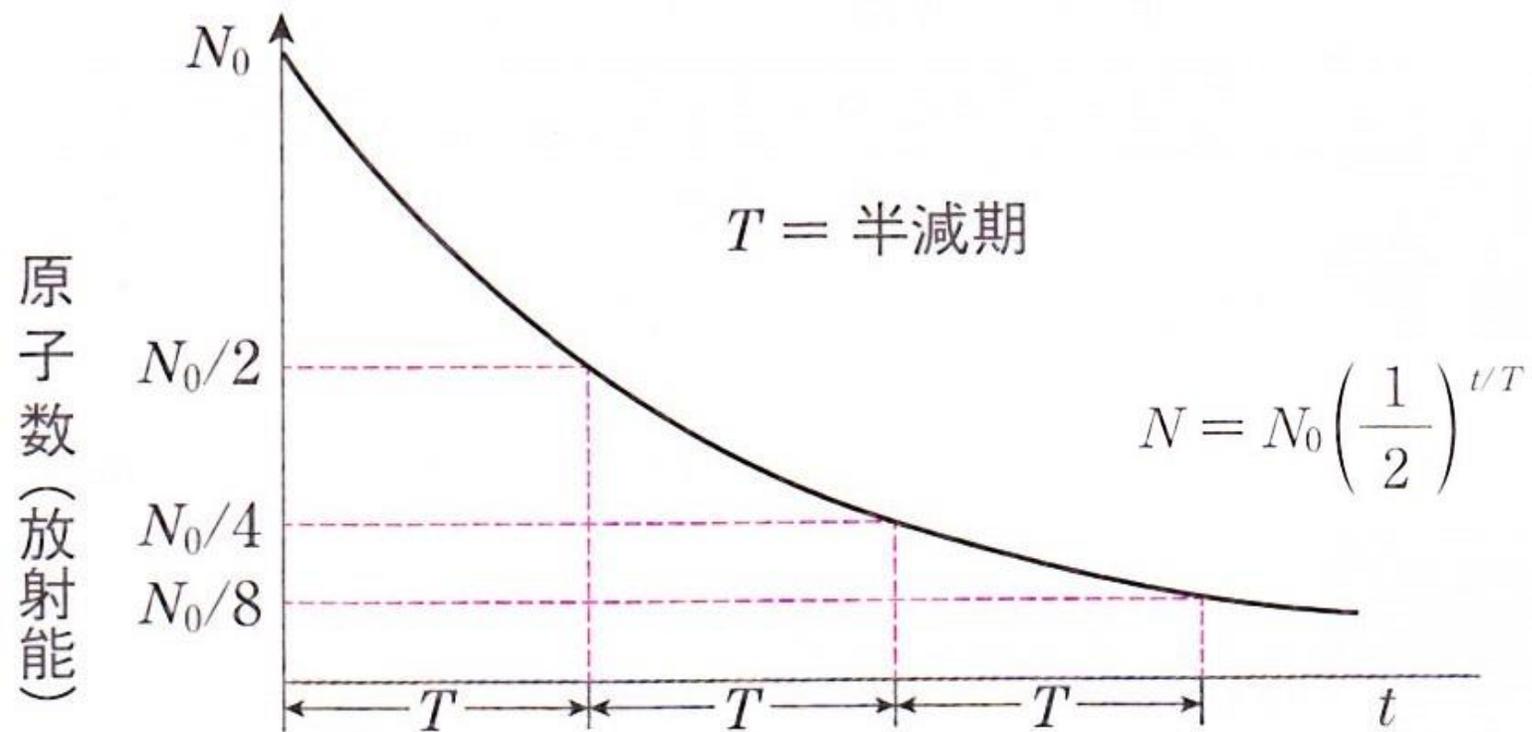


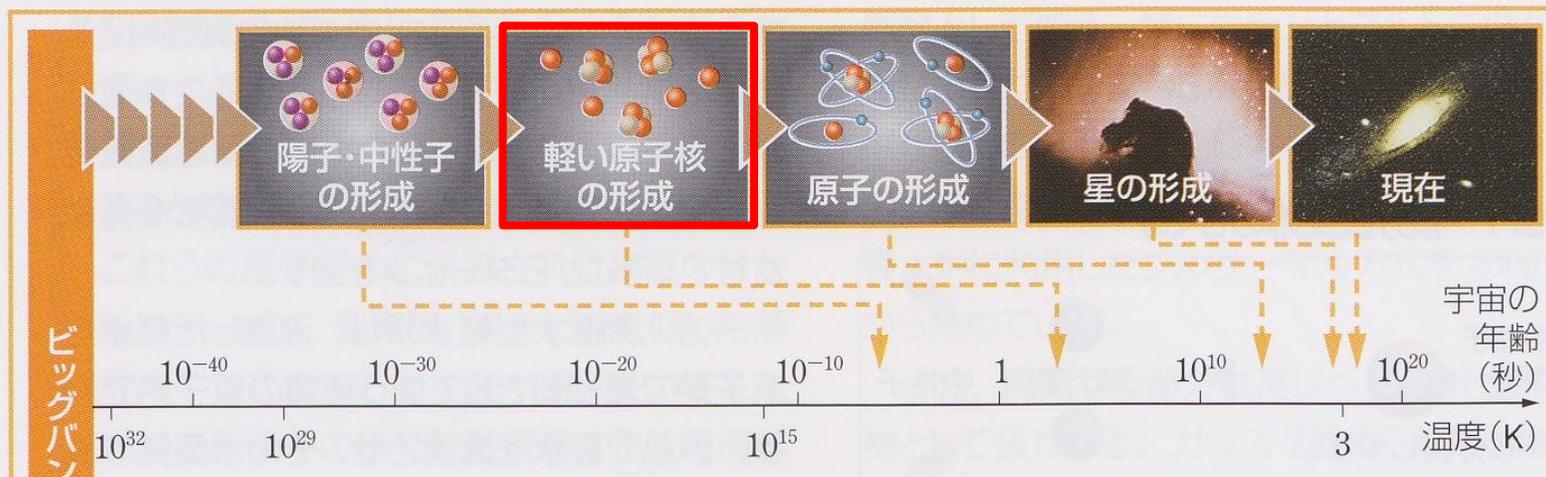
図 1-18 半減期と原子数

# 元素の起源

## C 宇宙のはじまり

宇宙は約 138 億年前に、ビッグバンとよばれる高温で高密度の状態から始まったと考えられている。宇宙のごく初期にどのような現象が起こったかは、素粒子研究とも密接に関連している。

### ● 宇宙の歴史



ビッグバン直後の宇宙は、非常に高温・高密度の状態であったと考えられる。その後時間とともに宇宙は膨張し、3分後には10億度程度まで温度が低下して原子核を構成し始める。電子はその反粒子である陽電子と出会うことでほとんどなくなってしまったが(電子対消滅)、一部残存した電子が40万年後に原子核に捕獲され、ようやく原子が構成される。このときの3000Kの熱放射が、現在、約2.7Kの宇宙マイクロ波背景放射として観測されている。

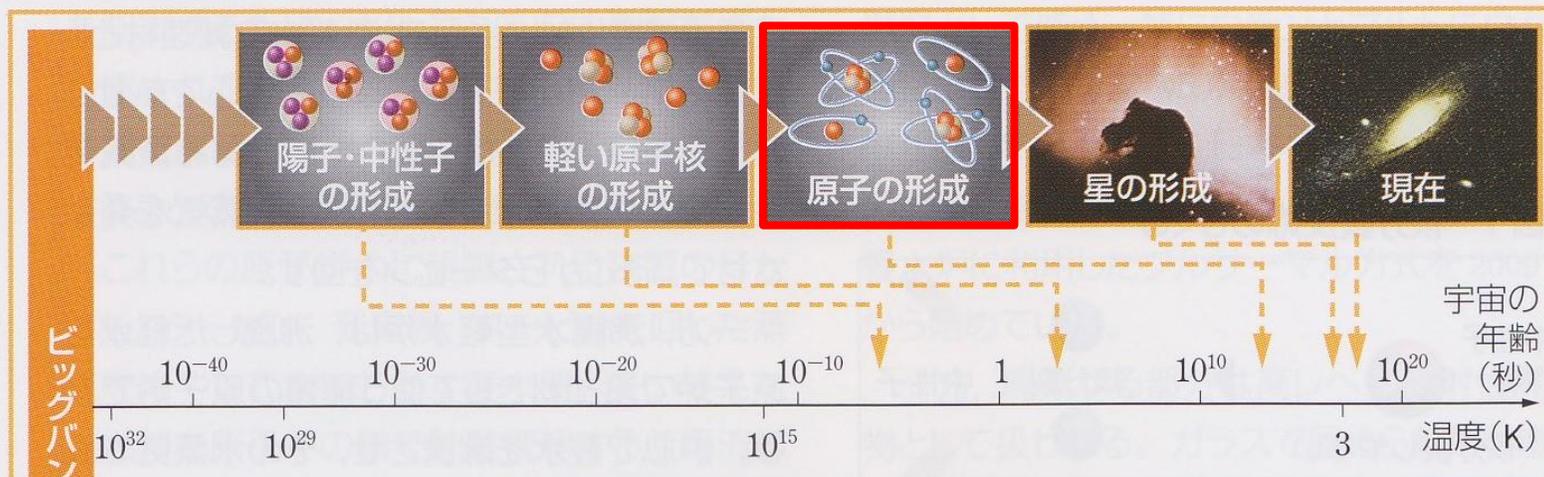
### 原子核の形成

ビッグバンから3分経過し、 $10^9$  Kまで下がると、陽子と中性子が結合し、光子を放出して重水素核( $^2\text{H}$ )ができ、安定に存在できるようになる。できた $^2\text{H}$  同士の衝突や陽子との反応で、 $^3\text{H}$ 、 $^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$ ができ、それらをもとに $^7\text{Li}$ 、 $^7\text{Be}$ までが合成される。

## C 宇宙のはじまり

宇宙は約 138 億年前に、ビッグバンとよばれる高温で高密度の状態から始まったと考えられている。宇宙のごく初期にどのような現象が起こったかは、素粒子研究とも密接に関連している。

### ● 宇宙の歴史



ビッグバン直後の宇宙は、非常に高温・高密度の状態であったと考えられる。その後時間とともに宇宙は膨張し、3分後には10億度程度まで温度が低下して原子核を構成し始める。電子はその反粒子である陽電子と出会うことでほとんどなくなってしまったが(電子対消滅)、一部残存した電子が40万年後に原子核に捕獲され、ようやく原子が構成される。このときの3000Kの熱放射が、現在、約2.7Kの宇宙マイクロ波背景放射として観測されている。

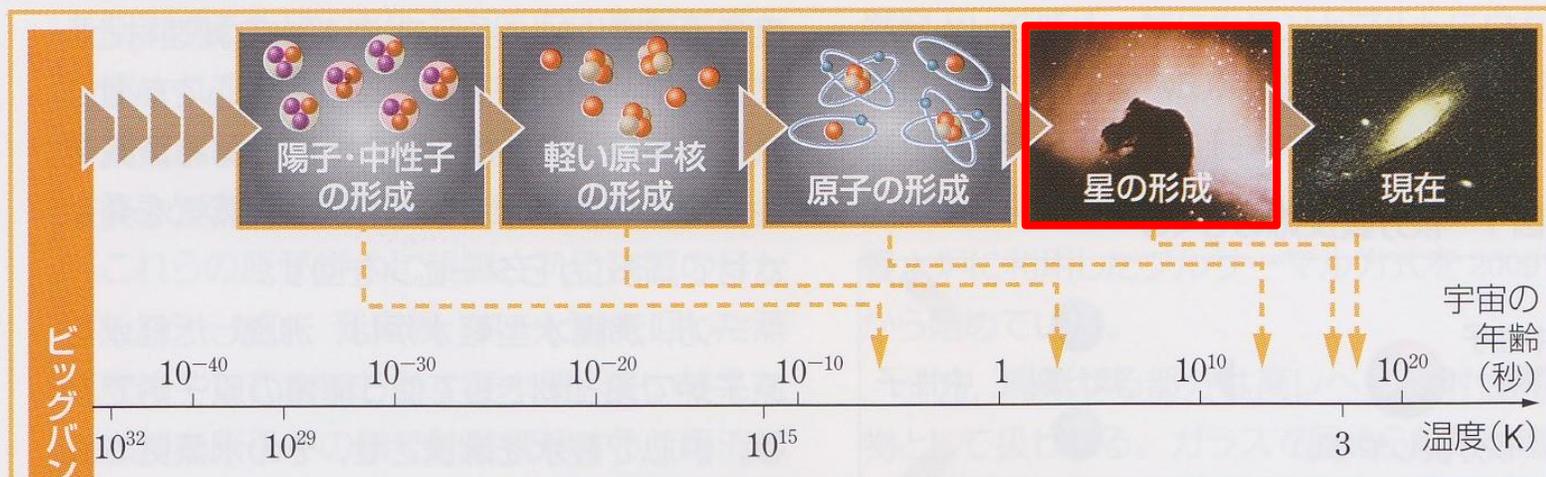
### 原子の形成

宇宙開闢後 38万年の頃、温度が 3000 K 以下になり電子の熱運動エネルギーが下がると、電子は陽子やHe 原子核に捕えられ、H 原子、He 原子ができる。

## C 宇宙のはじまり

宇宙は約 138 億年前に、ビッグバンとよばれる高温で高密度の状態から始まったと考えられている。宇宙のごく初期にどのような現象が起こったかは、素粒子研究とも密接に関連している。

### ● 宇宙の歴史



ビッグバン直後の宇宙は、非常に高温・高密度の状態であったと考えられる。その後時間とともに宇宙は膨張し、3分後には10億度程度まで温度が低下して原子核を構成し始める。電子はその反粒子である陽電子と出会うことでほとんどなくなってしまったが、一部残存した電子が40万年後に原子核に捕獲され、ようやく原子が構成される。このときの3000Kの熱放射が、現在、約2.7Kの宇宙マイクロ波背景放射として観測されている。

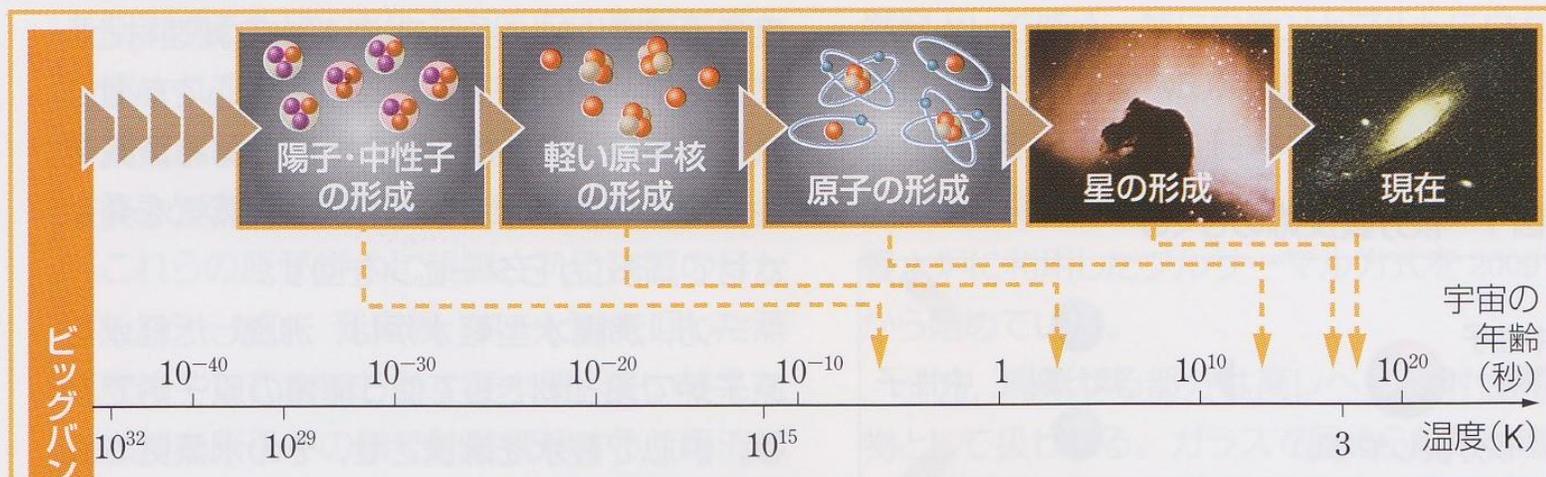
### 星の形成

宇宙背景放射の強度は、宇宙空間でわずかな強弱を示す。このことは、物質が空間にわずかながら不均一に放出されていることを意味している。重力により濃い物質雲がさらにいくつかの濃い領域に凝縮する。これらの雲、すなわち原始の銀河の中では、局所的により高い密度の物質は星へと変化していく。(原始星 (protostar) の誕生)

## C 宇宙のはじまり

宇宙は約 138 億年前に、ビッグバンとよばれる高温で高密度の状態から始まったと考えられている。宇宙のごく初期にどのような現象が起こったかは、素粒子研究とも密接に関連している。

### ● 宇宙の歴史



ビッグバン直後の宇宙は、非常に高温・高密度の状態であったと考えられる。その後時間とともに宇宙は膨張し、3分後には10億度程度まで温度が低下して原子核を構成し始める。電子はその反粒子である陽電子と出会うことでほとんどなくなりましたが(電子対消滅)、一部残存した電子が40万年後に原子核に捕獲され、ようやく原子が構成される。このときの3000Kの熱放射が、現在、約2.7Kの宇宙マイクロ波背景放射として観測されている。

### 恒星の進化に伴う Fe より軽い核の合成

原始星の中心温度が  $10^7$  K を超えると  $^1\text{H}$  から  $^4\text{He}$  ができる核融合反応が起き、内部密度が約  $10^{24}$ 個/cm<sup>3</sup>で主系列星となる。

恒星の内部温度の上昇に伴い、核融合反応が次々に起き、原子番号の大きい元素が合成される。

# REVIEWS OF MODERN PHYSICS

---

VOLUME 29, NUMBER 4

OCTOBER, 1957

---

## Synthesis of the Elements in Stars\*

E. MARGARET BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, WILLIAM A. FOWLER, AND F. HOYLE

*Kellogg Radiation Laboratory, California Institute of Technology, and  
Mount Wilson and Palomar Observatories, Carnegie Institution of Washington,  
California Institute of Technology, Pasadena, California*

B<sup>2</sup>FH 理論



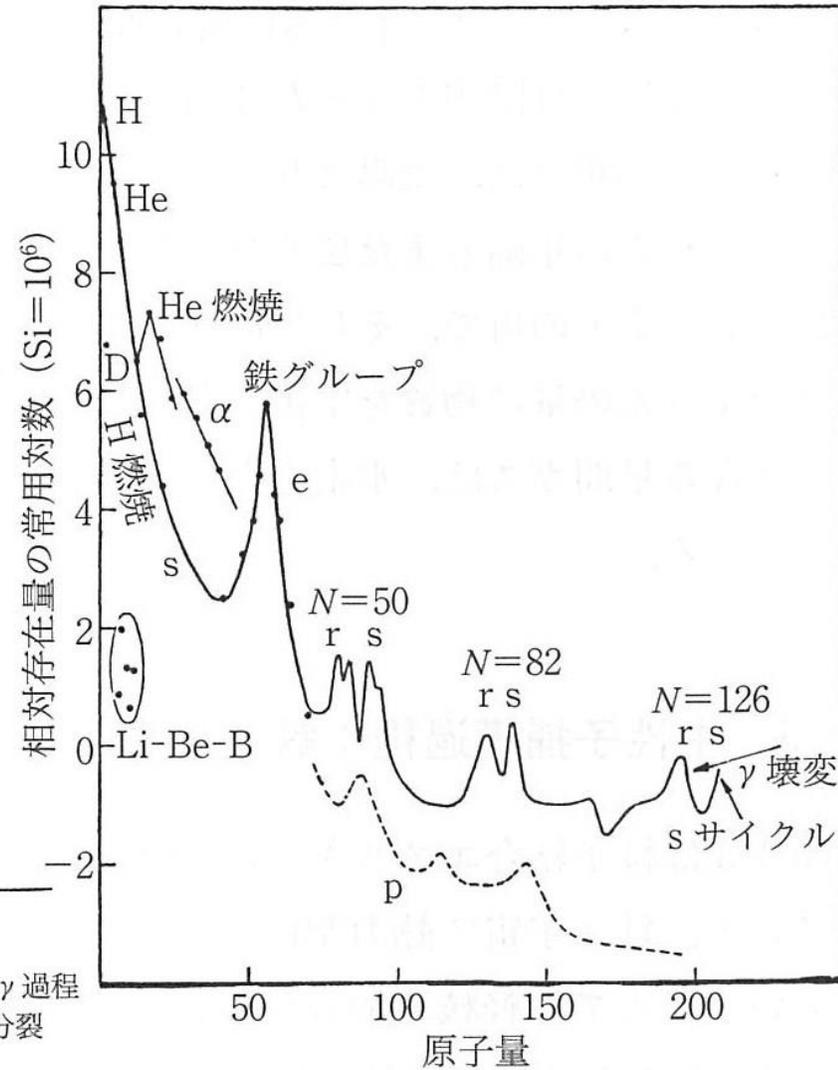
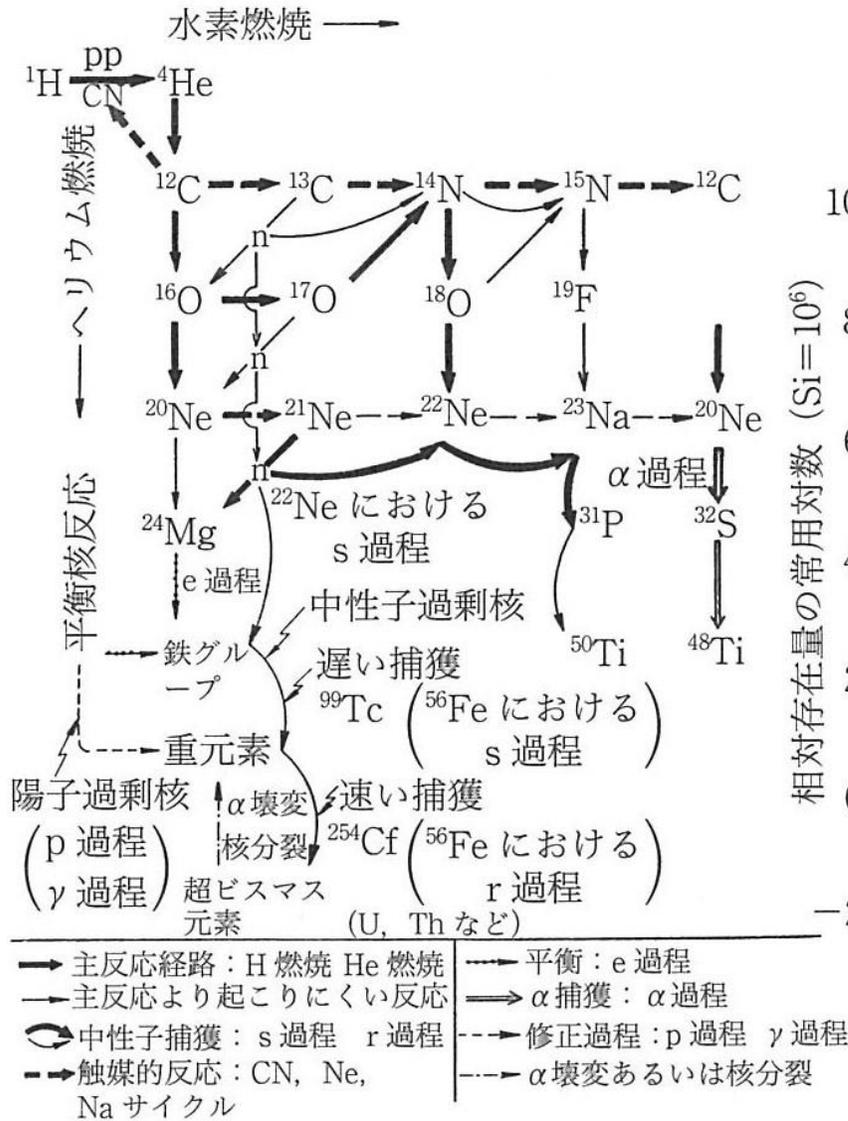
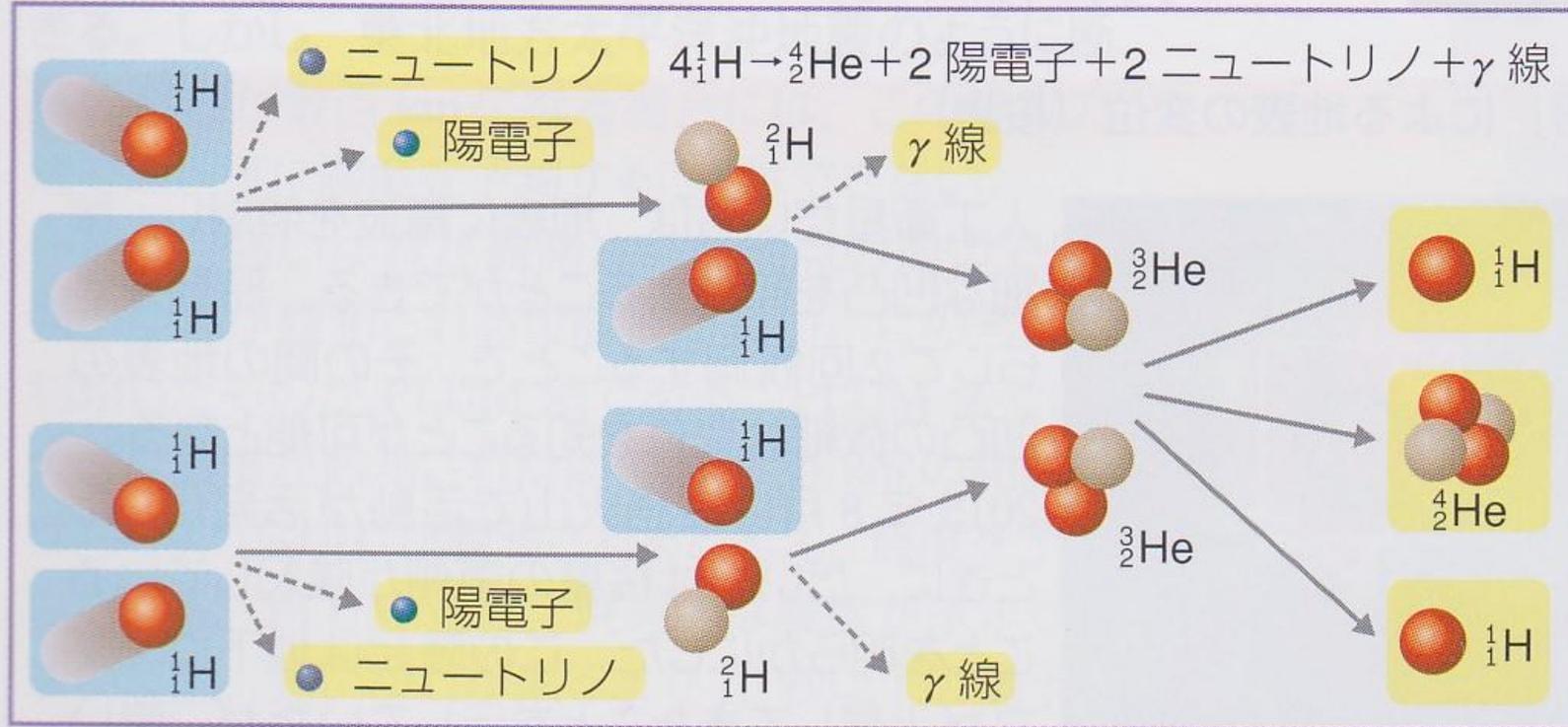


図 17.7 (a) 星における元素合成の核過程の概略図. (b) 原子存在度の計算値 (Burbidge, Burbidge, Fowler, Hoyle から引用)

●太陽での核融合反応(p-p連鎖)



質量が太陽程度か、それより軽い恒星の中心部では、おもに p-p 連鎖とよばれる水素の核融合反応が起こる。図は ppI とよばれる p-p 連鎖の 86% ほどを占める主反応である。4 個の水素の原子核(陽子)から、1 個のヘリウム原子核ができる。

## CNO サイクル

CNO サイクルは、炭素 (C)、窒素 (N)、酸素 (O) を触媒として起こる、水素の核融合反応である。

質量が太陽程度以上の恒星で、中心部の温度が 1000 万 K を大きくこえると、p-p 連鎖よりも CNO サイクルがおもなエネルギー源となる。

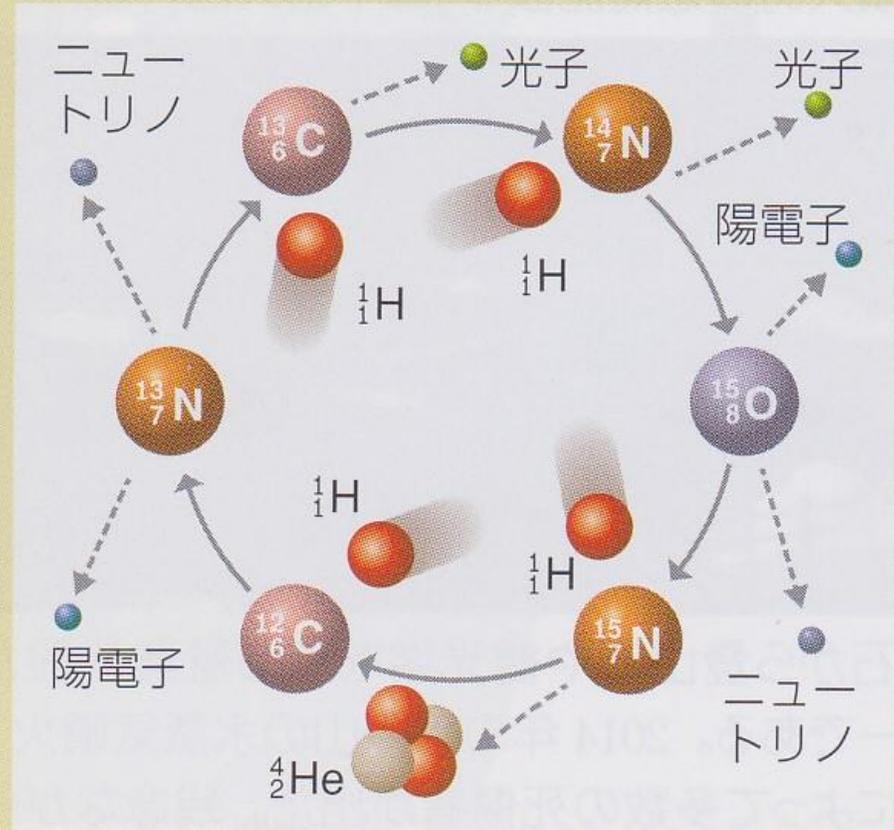


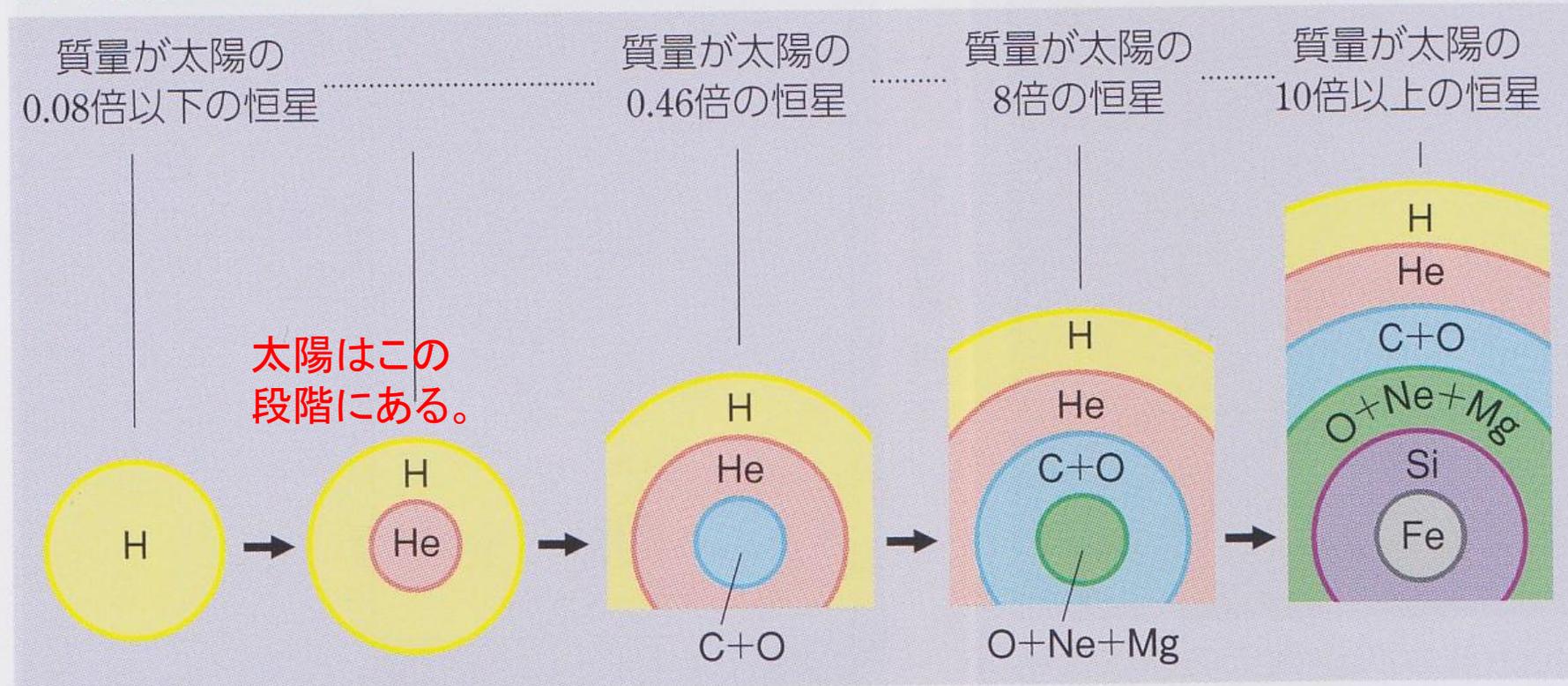
表 17.1  $^4\text{He}$  を生成する陽子-陽子チェーン；太陽エネルギーの約 90% を生産する

反応経路	Q/MeV	平均反応時間	
$^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} +  e^- + e^+  + \nu_e$ (2%)	1.44	$1.4 \times 10^{10}$ y	(17.11)
$^1\text{H} + ^2\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \gamma$	5.49	6 s	(17.13)
$^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + 2\ ^1\text{H}$	12.86	$9 \times 10^5$ y	(17.21)
全体 $4\ ^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} +  2e^- + 2e^+  + 2\nu_e$	26.7	$1.4 \times 10^{10}$ y	(17.5)

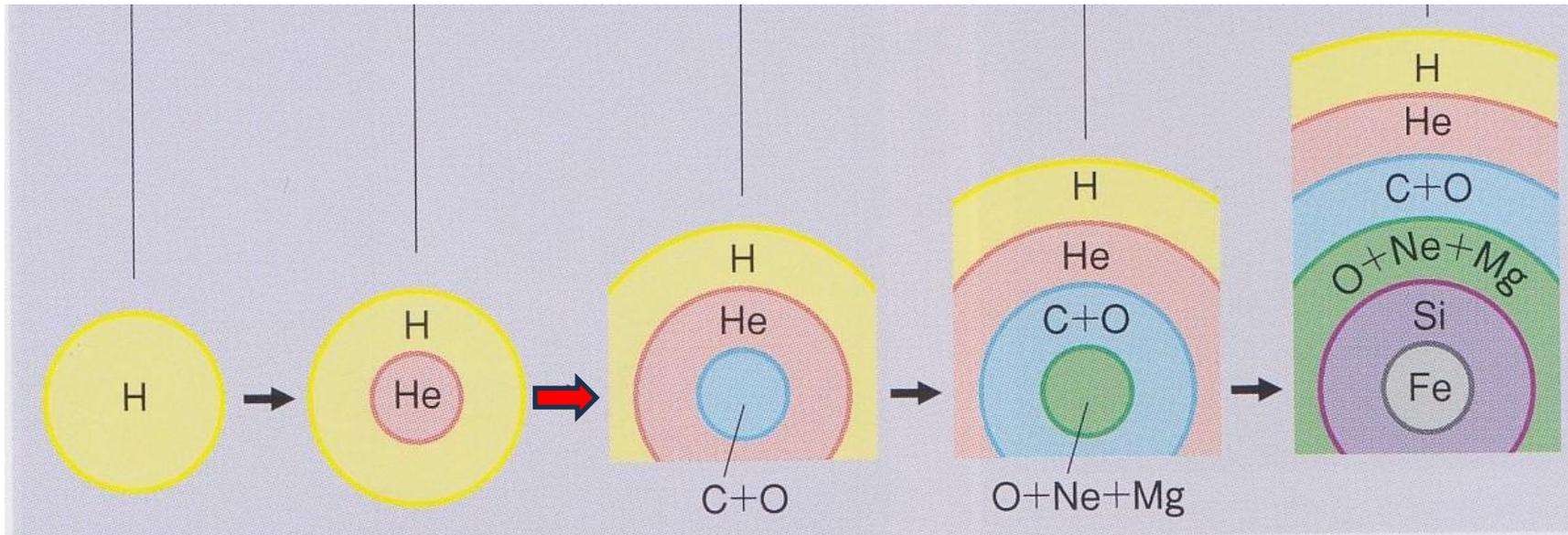
表 17.2  $^4\text{He}$  を生成する CN サイクル；太陽エネルギーの約 10% を生産する

反応経路	Q/MeV	平均反応時間	
$^{12}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma$	1.94	$10^7$ y	(17.26a)
↓			
$^{13}\text{C} + e^- + e^+ + \nu_e$	1.20	7 min	(17.26b)
$^{13}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{14}\text{N} + \gamma$	7.55	$3 \times 10^6$ y	(17.27)
$^{14}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$	7.29	$3 \times 10^8$ y	(17.28a)
↓			
$^{15}\text{N} + e^- + e^+ + \nu_e$	1.74	2 min	(17.28b)
$^{15}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^4\text{He}$	4.86	$10^5$ y	(17.29)
全体 $4\ ^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} +  2e^- + 2e^+  + 2\nu_e$	26.7	$3 \times 10^8$ y	(17.5)

## ●内部構造の進化

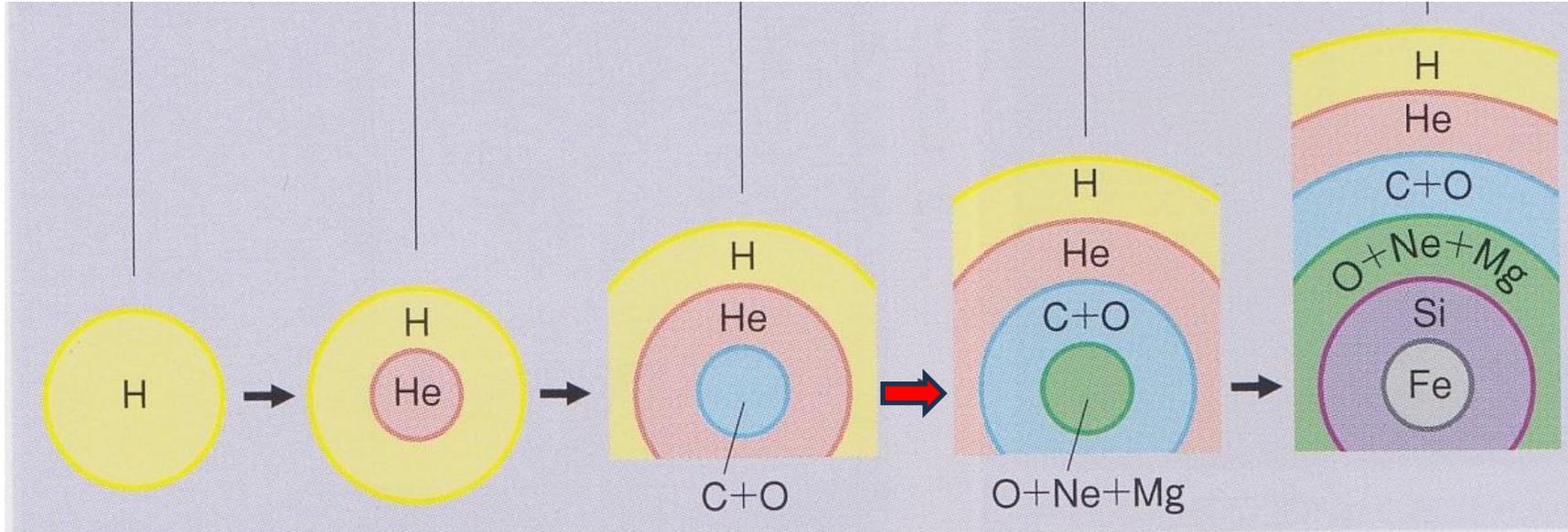


生まれたばかりの恒星は大部分が水素(H)でできている。主系列星になると、核融合反応で中心部の水素はヘリウム(He)に変わっていく。恒星の質量が太陽の0.46倍以上であれば、収縮によって中心温度は1億Kに達し、核融合反応によりヘリウムが炭素(C)と酸素(O)とに変わっていく。この後、質量が十分に大きければさらに炭素、ネオン(Ne)、酸素、ケイ素(Si)の核融合反応へと進んでいき、最後は鉄(Fe)の核ができてそのまわりを燃えかすの元素の層が取り囲む構造になる。



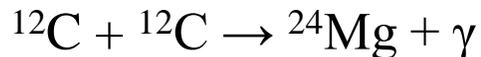
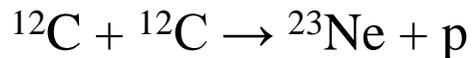
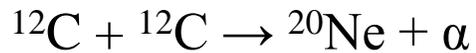
## 2. ヘリウム燃焼 (He burning)

中心温度が  $2 \times 10^8$  K を超えると、3個の  $^4\text{He}$  ( $\alpha$ 粒子) から  $^{12}\text{C}$  ができる核融合反応が起き、生成した  $^{12}\text{C}$  は  $^4\text{He}$  と核融合して  $^{16}\text{O}$  ができる。この段階で恒星は、主系列から離れ**赤色巨星**となり、第2世代以降の恒星では以前の元素合成でつくられ恒星中にすでに取り込まれている重元素を種核として、中性子が付加する **s 過程 (s process)** が起き、**Fe** より重い元素が合成される。



### 3. 炭素燃焼 (C burning)

中心温度が  $8 \times 10^8$  K になると、

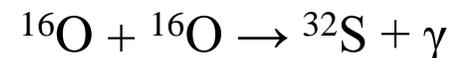
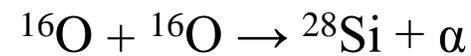
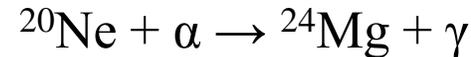
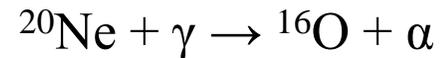


などの反応が起き、NeやMgが合成される。

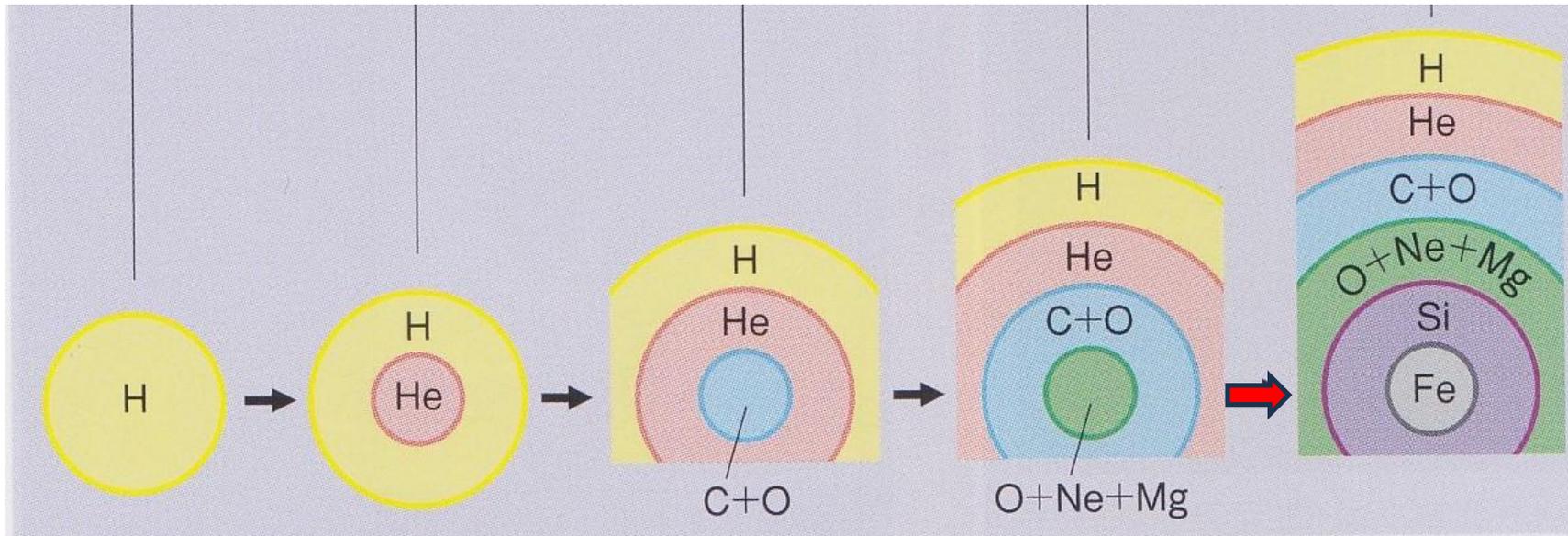
### 4. ネオンおよび酸素燃焼

(Ne and O burning)

$1.5 \times 10^9$  K に達すると、



などの反応が起き、SiやSが合成される。



## 5. $\alpha$ 過程( $\alpha$ process)および e 過程(equilibrium process)

$3.5 \times 10^9$  K に達すると、 $^{28}\text{Si}$  に  $\alpha$  粒子が反応し、 $^{32}\text{S}$ 、 $^{36}\text{Ar}$ 、 $^{40}\text{Ca}$ 、 $^{44}\text{Ti}$ 、 $^{48}\text{Cr}$ 、 $^{52}\text{Fe}$ 、 $^{56}\text{Ni}$  ができ、このうち、あとの 4 核種は放射壊変で、 $^{44}\text{Ca}$ 、 $^{48}\text{Ti}$ 、 $^{52}\text{Cr}$ 、 $^{56}\text{Fe}$  になる。

この段階では、いろいろな核種、陽子、中性子、光子の間に熱力学的平衡が成立し、原子核の結合エネルギーが最大で、もっとも安定な  $^{56}\text{Fe}$  を中心に Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni などが合成される。

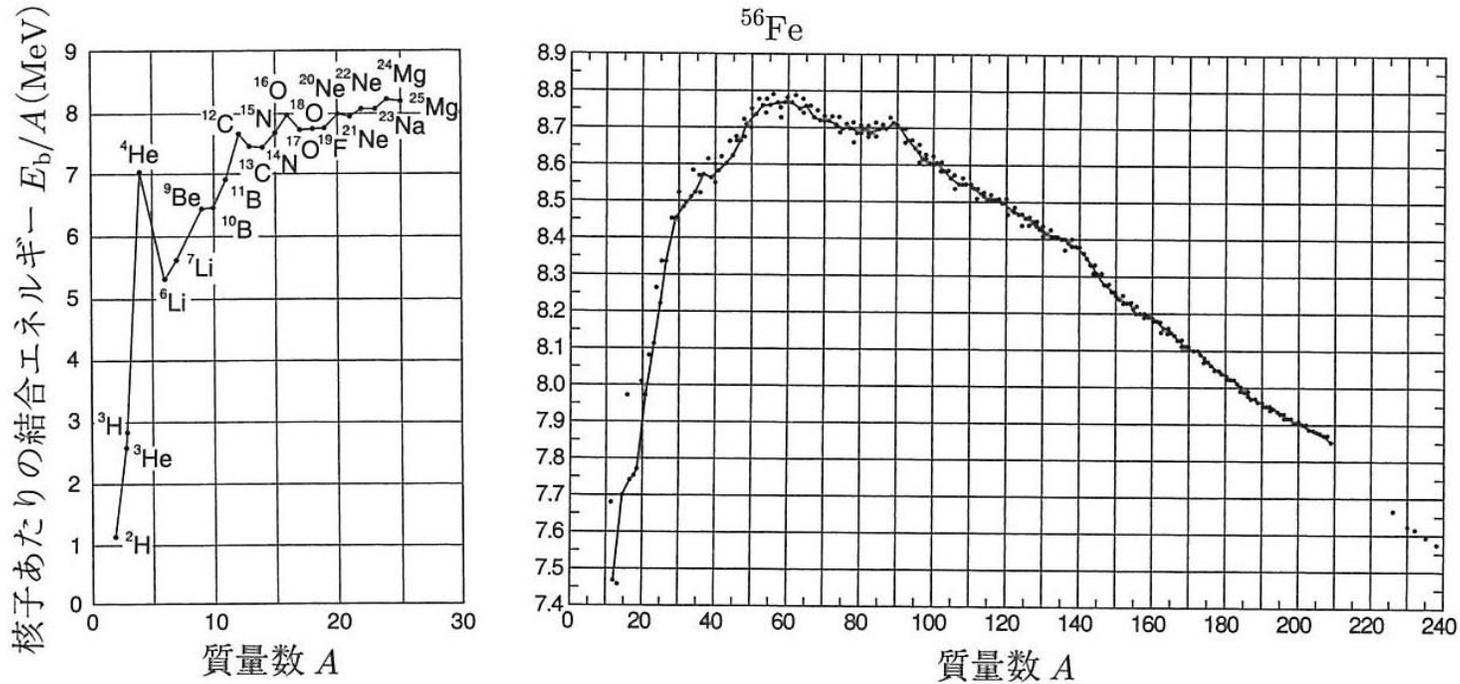


図 2.7 原子核の結合エネルギー<sup>5)</sup>

原子核の結合エネルギーは、すべての原子核の中で  $^{56}\text{Fe}$  が最も大きく安定であるため、 $^1\text{H}$  から  $^{56}\text{Fe}$  へ向かってエネルギーを解放しながら核融合反応で元素合成が進む。 $^{56}\text{Fe}$  より重い元素は核融合反応ではつくることができないので、**中性子捕核反応**でつくられる。

### s 過程 (s process)

中性子密度:  $10^7 \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$

中性子捕獲の寿命は、数年～数千年と長く、 $^{56}\text{Fe}$  を起点として  $^{209}\text{Bi}$  まで合成される。

## 原子核の結合エネルギー

質量欠損:  $\Delta M_A = M_A - ZM_H - NM_n$

ここで、 $M_A$  : 質量数  $A$  の原子の質量、

$M_H$  : 水素原子の質量、

$M_n$  : 中性子の質量、

$A = Z + N$  (質量数 = 陽子数 + 中性子数)

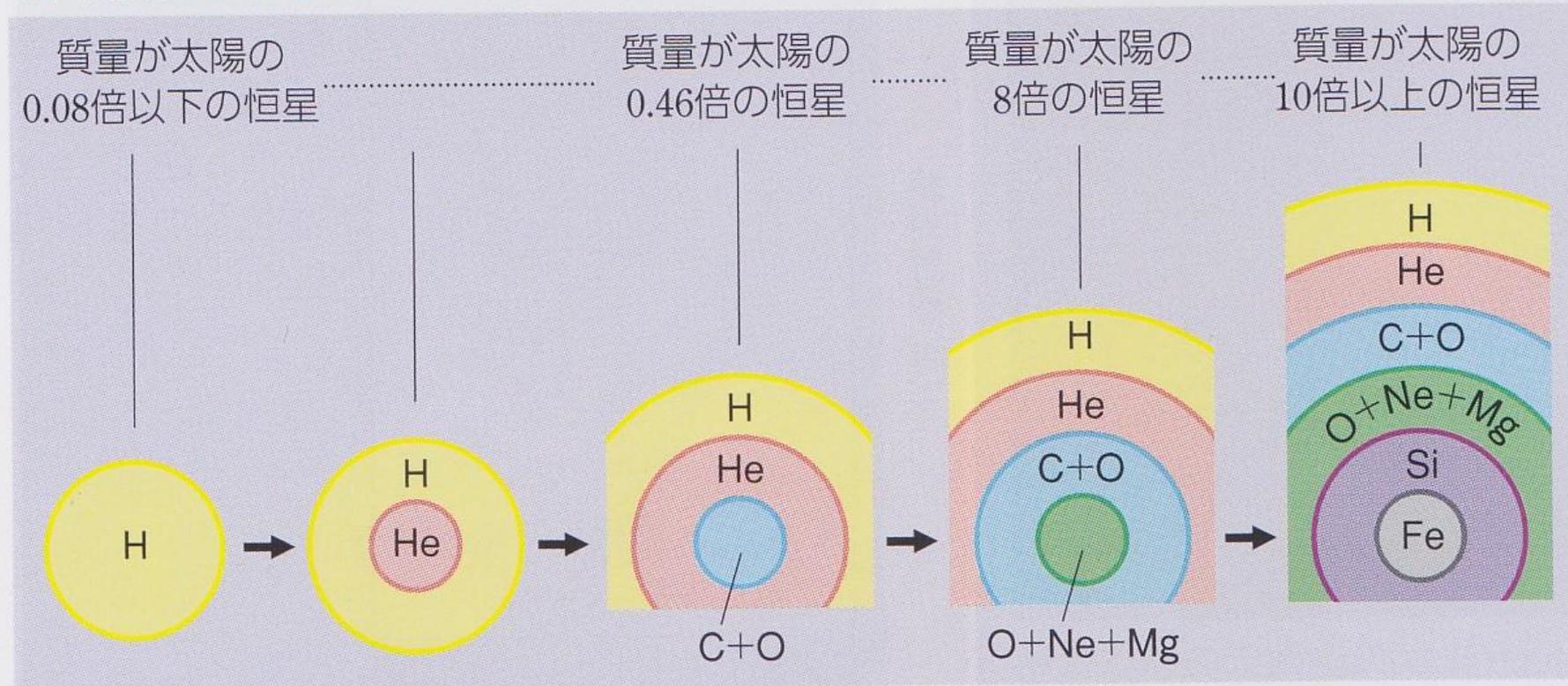
$E = mc^2$  より 1原子質量単位は、931.5 MeV に等しい。

$$E = mc^2 = 931.5 \Delta M_A$$

原子核の結合エネルギー :  $E_B \text{ (MeV)} = - 931.5 \Delta M_A$

核子あたりの結合エネルギー :  $E_B / A$

## ●内部構造の進化



生まれたばかりの恒星は大部分が水素(H)でできている。主系列星になると、核融合反応で中心部の水素はヘリウム(He)に変わっていく。恒星の質量が太陽の0.46倍以上であれば、収縮によって中心温度は1億Kに達し、核融合反応によりヘリウムが炭素(C)と酸素(O)とに変わっていく。この後、質量が十分に大きければさらに炭素、ネオン(Ne)、酸素、ケイ素(Si)の核融合反応へと進んでいき、最後は鉄(Fe)の核ができてそのまわりを燃えかすの元素の層が取り囲む構造になる。

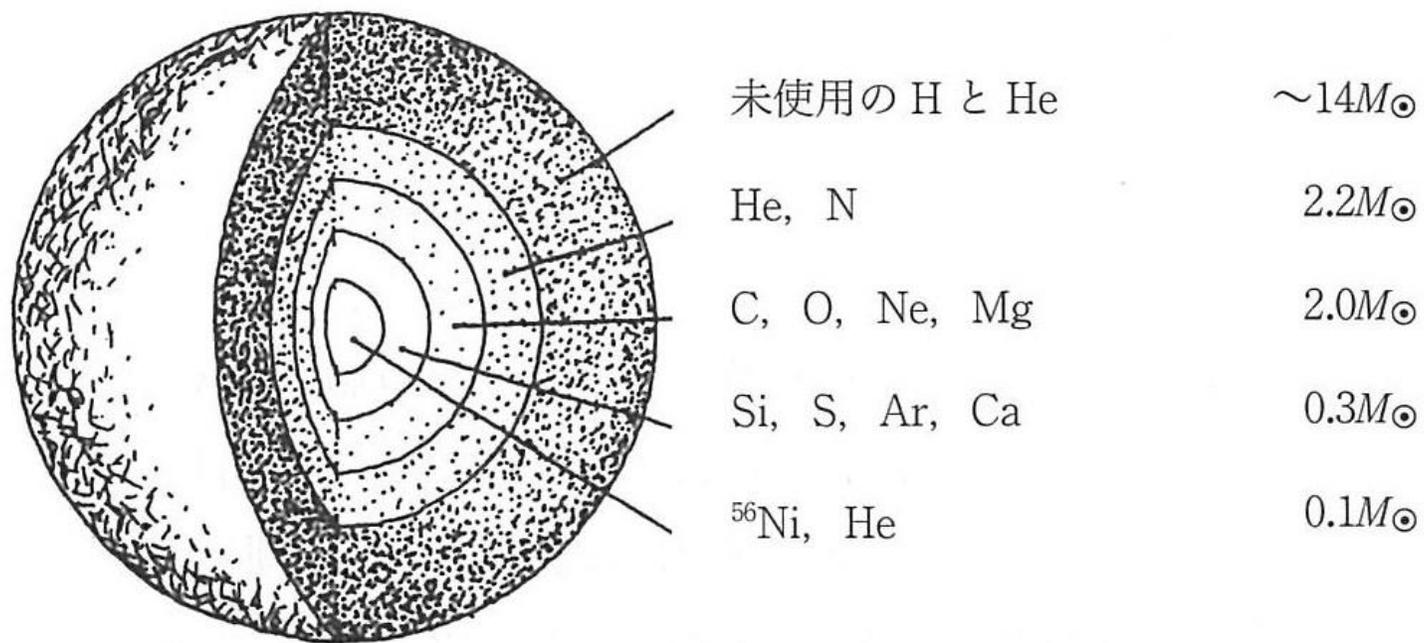


図 17.6 超新星爆発直前における質量  $20M_{\odot}$  の星の殻構造

## r 過程 (r process)

中性子密度:  $10^{20} \sim 10^{30} \text{ cm}^{-3}$

中性子捕獲の寿命は、 $10^{-2} \sim 10^{-6}$ 秒と短く、中性子捕獲でできた放射性核種が  $\beta^-$ 壊変するより速く中性子捕獲が進む。その結果、種となる安定核種を出発点として、中性子が著しく過剰の超短寿命核種が一挙にでき、それらは  $\beta^-$ 壊変を繰り返して安定核種となる。

超新星爆発の際に r 過程が起こると考えられていた。

近年、中性子星の合体も r 過程の有力な天体環境との報告がなされている。

● 超新星残骸 **地**

かに星雲 (NGC1952, M1)



1054 年に観測された超新星が残した超新星残骸。中心にはパルサーがある。1054 年の超新星は、中国の古記録こきろくや藤原定家さだいえの明月記めいげつきに書き残されている。

八日し未 霜凝天晴北山雪白

客星更依不審同泰後却并返更如此晚夕  
東西之糸彗而有餘

客星一昨日夜露今現修し出現以後客二  
日法雲不見休其外若天伏晴連日見候而  
此一兩日若無川達天曉見良方候曉夕東  
西出現候之糸別

客星如見例

皇極天皇元年秋七月甲寅客星入月

陽成院貞觀十九年正月廿五日丁酉戌時

客星在辟見西方

宇多天皇寬平三年三月廿九日己卯亥時

客星在東成星東方相去一寸許

醍醐天皇延長八年五月以後七月以前客

星入羽林中

一條院寛弘三年四月二日食日夜以降騎

官中有大客星如熒惑光明動耀連夜正

見南方或去騎陣侍軍星雲本休増光欽

後冷泉院天喜二年四月中旬以後丑時客

星出替赤度見東方字天圓星大和星

二條院承和二年四月廿二日し丑亥時客

星見大微官中

藤原定家は、父俊成とともに歌人として高名で、新古今和歌集の撰者の一人となり、作歌活動ではそこに集められた歌の作風に指導的役割を果たした。彼は明月記と呼ばれる日記を残しており、記述は治承4年（1180年）定家19歳のときから嘉禎1年（1235年）74歳のときに及んでいる。これは漢文体で書かれ、その几帳面で情熱的な叙述がよく知られている。

写真の部分には、これまでに現われた不審な星の記載がみられる。その中に、後冷泉院天喜2年4月中旬（1054年夏）丑時以後おうし座に客星（この場合は超新星）が出現したという下りがある。この超新星の名残りがおうし座かに星雲とされている。

明月記（藤原定家）の“客星”出現の記述

ま と め

## 太陽の進化

**星間雲**：星間物質が集まっている星間雲は，星が生まれる場所である。

↓ 星間雲で原始星が誕生する。

**原始星**：生まれたばかりの原始星は，まだそれほど高温でなく，星間物質におおわれている。

↓ 原始星はやがて主系列星となる。

**主系列星**：主系列星の中心部における水素の核融合反応は安定で，恒星はその一生の大部分を主系列星として過ごす。

↓ 中心部の水素が燃えつきると恒星は膨張し，(赤色)巨星へと進化を始める。

**(赤色)巨星**：(赤色)巨星は温度は低いが，表面積が大きいいため，明るく見える。

↓ ヘリウムの核融合反応が始まり，一度収縮するが，再び膨張し外側のガスを放出する。

**白色わい星**：最後は核融合反応の止まった，高温・高密度の白色わい星となってしだいに冷えていく。



## 参考文献

- “放射線と放射能” 松浦他訳 学会出版センター 1996年
- “一般化学(四訂版)” 長島、富田共著 裳華房 2016年
- “宇宙・地球化学” 野津憲治著 朝倉書店 2010年
- “放射化学” 柴田他訳 丸善 2005年
- “物理図録(改訂版)” 数研出版 2019年
- “地学図録(改訂版)” 数研出版 2019年
- “宇宙と物質の起源” 高エネルギー加速器研究機構  
素粒子原子核研究所編  
ブルーバックス 講談社 2024年

ご清聴ありがとうございました。