

## Explanation of the Chart of the Nuclides

### General

In this chart each experimentally observed nuclide is represented by a square containing the symbol of the element and the number of nucleons A. In the chart the nuclides are arranged such that the proton number Z is given on the ordinate and the neutron number N = A - Z on the abscissa.

In the present nuclide chart update, the 1998 edition of the Karlsruhe Nuclide Chart was compared to the NUBASE 2003 evaluation [16] to establish a list of nuclides which were not present in the 1998 evaluation. From this list we have selected only nuclides which have been measured experimentally. In particular, nuclides were selected where the half-life or the mass has been determined or the nuclide has been clearly identified. Where a nuclide has been identified but the half-life has not been measured, a detection limit for half-life is given (greater or lower than a value).

Metastable states, which do not undergo  $\alpha$ -, or  $\beta$ -decay, or spontaneous fission, i.e. decay only by gamma emission, are included only if their half-life is larger than 1 s. Where emission of a particle results from a resonance state in unstable nuclides, both the resonance width and corresponding half-life are given using the relations:

$$\Gamma_{c.m.} T_{1/2} \cong \hbar \ln 2, \quad T_{1/2}(s) \cong 4.562 \times 10^{-22} / \Gamma_{c.m.}(\text{MeV})$$

For mass numbers in the range A = 266 - 294 we have used the latest 2005 (till August 12, 2005) Nuclear Data Sheets revision [17]. For the period not covered by NUBASE, i.e. 2003 until summer 2006, nuclide information has been taken from Nuclear Data Sheets 100 - 107. In addition, original publications up to summer 2006 were taken into account. A full list of new and updated nuclides in the present chart is given later in this brochure.

Atomic weights of the elements and isotopic abundances have been taken from J. R. De Laeter [18]. For isomers which decay exclusively by spontaneous fission, no decay data is given in the chart. A table of half-lives (all less than 0.1 s), from B. Singh [19], are given in the brochure. Chain yields are from R. W. Mills [20] and neutron cross sections are from N. E. Holden [21].

## 「核種チャート」の解説

### 概要

本核種チャートでは、実験的に観察された核種を、元素記号および核子数:Aを含む区画によりで表す。各核種の陽子数:Zは縦軸に、中性子数: N (= A - Z) は横軸に対応する。

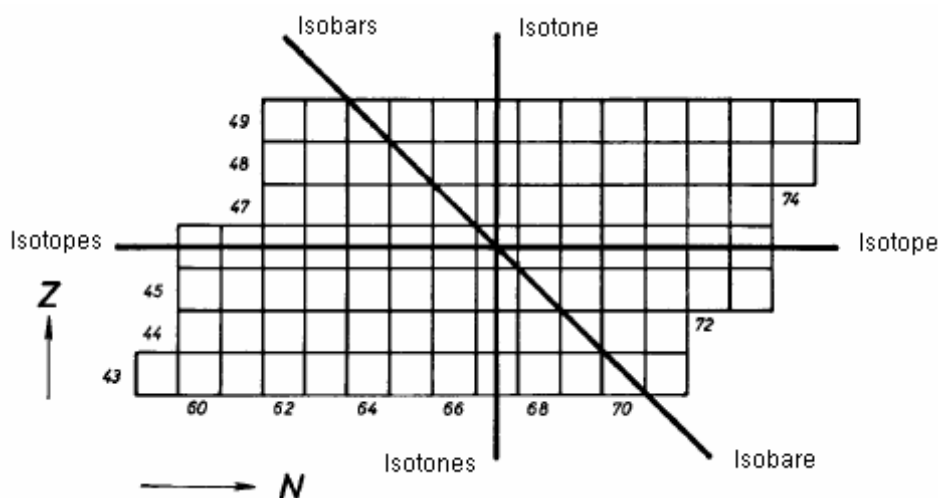
本チャートでは、「カールスルーエ核種チャート 1998年版」と「NUBASE 2003年評価版[16]」とを比較し、前者に記載されていなかった核種をリストアップし、この中から実験的に観察された核種のみ、特に、半減期あるいは質量が決定されたもの、あるいは核種が明確に特定できたもの、を選んで掲載している。核種が特定できても半減期が測定されていないものについては、半減期の測定限界値(ある値以上、あるいは以下)を記している。

$\alpha$ 崩壊、 $\beta$ 崩壊、あるいは自発核分裂のいずれも行わず $\gamma$ 放出のみを行う準安定状態については、本 $\gamma$ 放出の半減期が1秒よりも長い場合についてのみ掲載する。共鳴状態の不安定核種から粒子が放出される場合、共鳴幅と半減期の関係は以下の式で示される。

$$\Gamma_{c.m.} T_{1/2} \cong \hbar \ln 2, \quad T_{1/2}(s) \cong 4.562 \times 10^{-22} / \Gamma_{c.m.}(\text{MeV})$$

質量数:Aが266~294の核種に関しては、「Nuclear Data Sheetsの最新版(2005年版、2005年8月12日までのデータを掲載)[17]」を引用している。2003年以降2006夏までの、NUBASEで掲載されていない期間に関しては、「Nuclear Data Sheets 100 - 107」の核データを引用している。更に、2006年夏までに掲載された論文のデータも考慮している。本チャートにて新たに加えられた、あるいは改定された核種のリストは本冊子で後述する。

各元素の原子量および同位体存在比はJ. R. De Laeterの文献[18]を引用している。自発核分裂のみで崩壊する異性核の崩壊データは、本チャートには記載していない。その他、B. Singhの文献[19]記載の0.1秒以下の半減期表、R. W. Millsの文献[20]記載の連鎖収率、N. E. Holdenの文献[21]記載の中性子断面積を本冊子に掲載している。



- [16] G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot and A.H. Wapstra, The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties, Nuclear Physics A, 2003, 729, 3 (2003).  
 [17] M. Gupta and T. W. Burrows, Nuclear Data Sheets 106, 251 (2005).  
 [18] J. R. De Laeter, J. K. Bohlke, P. De Bièvre, H. Hidaka, H. S. Peiser, K. J. R. Rosman, and P. D. P. Taylor, Atomic Weights of the Elements: Review 2000, Pure & Appl. Chem., 75, 683 (2003).  
 [19] B. Singh, R. Zywna, and R. Firestone, Table of Superdeformed Nuclear Bands and Fission Isomers, 3rd Edition, Nuclear Data Sheets 97, 241 (2002).  
 [20] A. Koning, R. Forrest, M. Kellett, R. Mills, H. Henriksson, Y. Rugama "JEFF Report 2.1: The JEFF-3.1 Nuclear Data Library". OECD/NEA Report to be published. See also R. W. Mills "Fission Product Yield "Evaluation", Thesis, 1995, The University of Birmingham, UK .  
 [21] N. E. Holden, Neutron Scattering and Absorption Properties, Handbook of Chemistry and Physics on CD-ROM, version 2006, 11-185, Ed. D.R. Lide, CRC Press, Boca Raton, Florida.

## Decay Modes: Colour and Symbols

Stable nuclide



## 崩壊の種類:色と記号

安定核種

Primordial radionuclides, i.e. those formed in the build-up of terrestrial matter and still present today.



原生核種、即ち、地球創生時より現在まで存在する核種

Decay modes are represented by specific colours.

- p: Proton decay
- $\alpha$ : Alpha decay
- $\epsilon$ : Electron capture
- $\beta^+$ : Positron decay
- $I_\gamma$ : Isomeric transition
- $\beta^-$ : Negatron decay
- sf: Spontaneous fission
- ce: Cluster emission e. g. C 14, Ne 20
- n: Neutron emission

崩壊様式は以下のように色分けする。

- p: 陽子崩壊 (オレンジ色)
- $\alpha$ :  $\alpha$ 崩壊 (黄色)
- $\epsilon$ : 電子捕獲 (ピンク)
- $\beta^+$ :  $\beta^+$ 崩壊 (ピンク)
- $I_\gamma$ : 異性核転移 (白)
- $\beta^-$ :  $\beta^-$ 崩壊 (青)
- sf: 自発核分裂 (緑)
- ce: クラスター放出 (例 C 14, Ne 20、紫)
- n: 中性子放出 (水色)



The data given in the left part apply to the metastable state, those in the right part to the ground state.  $I_\gamma$  denotes  $\gamma$ -quanta due to the decay to the ground state of the same nuclide (isomeric decay).



左側は準安定状態、右側は基底状態を示す。 $I_\gamma$  は同一核種の基底状態への崩壊 (異性核崩壊) に伴う $\gamma$ 放出を示す。

The assignment of decay properties to the metastable or ground state is uncertain.



準安定状態が基底状態かが不明確な崩壊を示す。

One or more short-lived states, for which only decay via spontaneous fission has been observed (spontaneously fissioning isomers) are indicated by a vertical green bar.



自発核分裂による崩壊のみが観察されている場合 (自発核分裂異性核)、1つあるいはそれ以上の短寿命状態を緑色の縦棒で示す。

Emission of  $\gamma$ -quanta; they are always listed together with the respective parent nuclide.

$\gamma$

$\gamma$ 放出。常に親核種と共に示す。

Emission of the specified particles or spontaneous fission from an excited level of the daughter nuclide, populated via  $\beta$ -decay (" $\beta$ -delayed particle emission or fission").

$\beta x p$ ;  $\beta x n$ ;  
 $\beta d$ ;  $\beta t$ ;  
 $\beta x \alpha$ ;  $\beta sf$

$\beta$ 崩壊で生じた励起状態の娘核種から特定粒子が放出される、あるいは本娘核種が自発核分裂をするもの ( $\beta$ 遅延核分裂)。

Simultaneous emission of two  $\beta$ -particles ("double  $\beta$ -decay", e.g. Te 130  $\rightarrow$  Xe 130).

$2\beta^-$

同時に2回の $\beta$ 崩壊をするもの (2重 $\beta$ 崩壊、例えば Te 130  $\rightarrow$  Xe 130)。

Emission of the specified particles from a particle-unstable nuclide. Simultaneous emission of two particles is indicated only, if one-particle-emission is excluded for energetical reasons (e.g. Be 6  $\rightarrow$  2p).

p; n  
2p; 2 $\alpha$

粒子不安定な核種から特定粒子が放出されるもの。エネルギー的理由により1粒子放出があり得ない場合にのみ、2粒子の同時放出を記載する (例えば Be 6  $\rightarrow$  2p)。

## Multiple Decay Modes and Branching Ratios

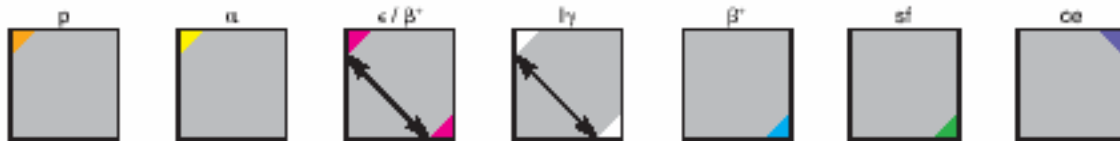
The branching ratios of the decay modes are indicated by 3 different sizes of the coloured sections and by the sequence of the symbols. Pure decay modes are indicated by a single colour (e.g. see previous section). Mixed decay modes are indicated by the use of coloured triangles. A

## 複合崩壊および分岐率

複数崩壊の分岐率は、区画内で色分けされた部分の形状および3種の大きさの違い、およびその配列により表す。単一崩壊では区

small coloured triangle in the top left or bottom right indicates a branching ratio for this mode of  $\leq 5\%$  (conversely, the major mode has a branching ratio of  $\geq 95\%$ ) as shown in the figure. The small triangles representing proton or alpha emission are always on the top left corner (first two boxes). The triangles for  $\beta^-$  emission or spontaneous fission are always at the bottom right. Triangles representing  $\epsilon/\beta^+$  or  $I_\gamma$  may be at the top left or bottom right depending on the major mode. For  $\epsilon/\beta^+$ , the red triangle is at the bottom right if the main mode is alpha or proton emission.

Otherwise, the red triangle is at the top left corner. For isomer transition  $I_\gamma$ , the white triangle is at the bottom right if the main mode is  $\alpha$ - or  $p$ - emission or  $\epsilon/\beta^+$ , otherwise it is at the top left corner. Cluster emission is always indicated with a small triangle in the top right corner. Hence the location of the small triangles is as follows:

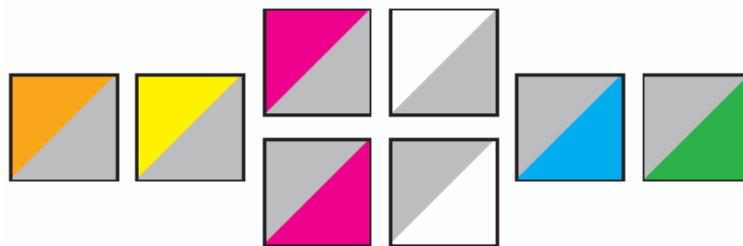


If the branching ratio of the minor mode is in the range 5 – 50% (implying a branching ratio for the major mode in the range 50 – 95%), the box is divided into two by a diagonal connection the lower left and top right corners. The location of the large triangles is similar to that described above.

画全体を単一色で現すのに対し（前節参照）、複合崩壊は区画内に別の色の三角形で表す。左上あるいは右下に小さな三角形がある場合には、分岐率が 5%以下、即ち、主な崩壊様式の割合が 95%以上であることを示す。陽子あるいは $\alpha$ 粒子を放出する崩壊は、下記の左側 2 図のように区画内左上の三角形で表す。 $\beta^-$ 崩壊や自発核分裂は右下の三角形で表す。電子捕獲/ $\beta^+$ 崩壊あるいは異性核転移では、主な崩壊様式に応じて区画内の左上あるいは右下の三角形で表す。この場合、主な崩壊様式が $\alpha$ 粒子放出あるいは陽子放出であれば、電子捕獲/ $\beta^+$ 崩壊を右下の赤い三角形でし、それ以外では左上の赤い三角形で表す。異性核転移:  $I_\gamma$  は主な崩壊様式が $\alpha$ 粒子放出、陽子放出、あるいは電子捕獲/ $\beta^+$ 崩壊の場合には右下の白い三角形で表し、それ以外の場合には左上の白い三角形で表す。クラスター放出の場合は常に右上の三角形で表す。

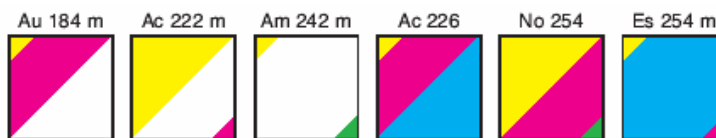
以下に凡例を示す。

分岐率が 5 – 50%、即ち主な崩壊様式の割合が 50 – 95%の場合、区画は斜線により左上と右下に 2 等分される。この際の三角形の位置は上述同様である。



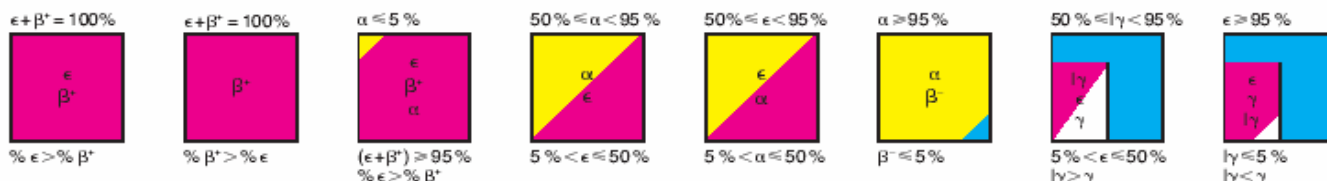
In some cases, three decay modes are possible. Some examples are shown below.

3つの崩壊様式が存在する場合の例を以下に示す。



Examples:

例



The symbols for the particle emitting decay modes are arranged according to branching ratio with the highest branching ratio first, followed by  $\gamma$ -quanta and conversion electrons. The data for the isomeric decay have been arranged corresponding to the branching ratio of the decay mode.  $\beta$ -delayed particles or fission ( $\beta n$ ,  $\beta p$ ,  $\beta sf$ ) precede or follow the  $\gamma$ -quanta according to the relative intensities.

For a given type of radiation the sequence of the energies corresponds to the relative intensities (in decreasing order) of the respective radiation. In case of  $\beta$ -decay a slightly different rule is used (see below).

Points indicate further transitions of the same type with lower intensities.

Energies are given in keV for  $\gamma$ -quanta, in MeV for all kinds of particles. A radiation symbol without energy value indicates that the radiation occurs but the energy has not been measured.

Endpoint energy of the most abundant  $\beta$ -transition. In case further transitions with higher energies exist, the second number corresponds to the highest endpoint energy observed.

$\beta$ -transitions with known energies, for which the sum of their abundances is less than 1%.

Electron capture is specified only, if it is more probable than  $\beta^+$ -decay.

Particle energies listed according to decreasing probabilities of the respective transitions. At least one energy is given, even if the abundance of the most prominent group is less than 1%.

Energies of the strongest  $\gamma$ -quanta arranged in order of decreasing intensities. Intensities less than 1% are given in brackets.

$\gamma$ -Energies followed by an asterisk denote transitions after  $\beta$ -delayed particle emission.

Several  $\gamma$ -quanta of unknown intensities within the energy interval 291-1319 keV.

Conversion electrons are specified only if they are more abundant than the  $\gamma$ -quanta. Energies are not quoted.

### Cross Sections

All cross sections are given in barn ( $10^{-24} \text{ cm}^2$ ) and refer to reactions with thermal neutrons (0.0253 eV).

Cross section for the  $(n, \gamma)$  reaction. If two values are given, the first refers to the formation of the product nucleus in the metastable, the second to the formation in the ground state.

Fission cross section

$(n, p)$  cross section

$(n, \alpha)$  cross section

Absorption cross section

### Additional Symbols and Abbreviations

Chain yield (%) for the thermal neutron fission of U235 (above) and Pu239 (below) the arrowed line.

Nuclides with a closed neutron or proton shell are characterized by heavy horizontal or vertical lines.

粒子放出を伴う崩壊では、分岐率の大きい順で記号を記す。続いて $\gamma$ 放出と転換電子を記す。異性核転移では分岐率の順に記す。 $\beta$ 遅延粒子放出や $\beta$ 遅延自発核分裂( $\beta n$ ,  $\beta p$ ,  $\beta sf$ )は、相対強度に応じて $\gamma$ 放出の前後に記す。

それぞれの放射様式では、エネルギーは相対強度の大きい順に記す。但し、 $\beta$ 遅延崩壊の場合は、以下に示すようにやや異なる規則を用いる。

... は、同様式で低い強度の転移が更にあることを示す。

放射エネルギーは、 $\gamma$ 放出の場合はkeV単位で、全ての粒子放出の場合にはMeV単位で示す。エネルギーの値が記載されていない場合は、放射自体は生ずるものの放射エネルギーがまだ測定されていないことを示す。

$\beta^+$  2.7 ...  
 $\beta^-$  1.2; 1.9... 最も分岐率の大きな $\beta$ 転移の最終エネルギー。更にエネルギーの大きな転移がある場合には、2番目の数値が測定されている最大の最終エネルギーを示す。

$\beta^-$  ...  
 $\beta^+$  ... 合計収率が1%未満で、エネルギーが判明している $\beta$ 転移。

$\epsilon$  電子捕獲は、 $\beta^+$ 崩壊よりも収率が大きい場合のみ記載。

$\alpha$  3.75,  
4.43...  
p 1.56  
 $\beta p$  4.5 粒子のエネルギーは、転移収率が大きい順に記載。最も顕著なグループの収率が1%未満の場合でも最低1つのエネルギー値は記載。

$\gamma$  815; 1711...  
 $\gamma$  (1340) エネルギーが最も大きな $\gamma$ 放出については強度が大きい順に記載。強度が1%未満の場合は( )内に記載。

$\gamma$  815\*  $\gamma$ エネルギーに \* が付くものは、 $\beta$ 遅延粒子放出後の転移を示す。

$\gamma$  291-1319 291 ~ 1319keVのエネルギー範囲内にいくつかの強度不明な $\gamma$ 放出があることを示す。

$e^-$  転換電子は $\gamma$ 放出よりも収率が高い場合についてのみ記載。エネルギーは記載せず。

### 断面積

断面積は全て0.0253eVの熱中性子に対する値で、バーン( $10^{-24} \text{ cm}^2$ )単位で示す。

$\sigma$   $(n, \gamma)$  反応に対する断面積。2つの値が記載されている場合には、1番目の値が準安定状態の核種生成反応、2番目が基底状態の核種の生成反応に相当する。

$\sigma_f$  核分裂断面積

$\sigma_{n,p}$   $(n, p)$  反応の断面積

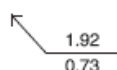
$\sigma_{n,\alpha}$   $(n, \alpha)$  反応の断面積

$\sigma_{abs}$  吸収断面積

### その他の記号および略号

U235 の熱中性子核分裂に対する連鎖収率(%)を矢印の上に、Pu239 の熱中性子核分裂に対する連鎖収率(%)を矢印の下に記載。

中性子閉殻あるいは陽子閉殻を有する核種は太線で強調する。



The symbols “m” and/or “g” indicate that the metastable and/or ground state of the daughter nuclide is populated, respectively. The symbols are presented in order of decreasing probability. Branches with probabilities less than 5% are not shown. Subscripts on “m”, e.g.  $m_1$ ,  $m_2$ , are used to denote different metastable states (with  $m_2$  being a higher energy state than  $m_1$ ).

Data or assignment uncertain.

Nanosecond, microsecond, millisecond, second, minute, hour, day, year.

m; g

?

ns,  $\mu$ s, ms, s,  
m, h, d, a

“m” と “g” はそれぞれ娘核種が準安定状態あるいは基底状態で生成されることを示し、収率の高い順に記載。但し、収率が5%未満の分岐は記載しない。“ $m_1$ ”、“ $m_2$ ”のような“m”の添え字は異なる準安定状態を示し、“ $m_2$ ”は“ $m_1$ ”よりも高いエネルギー準位にあることを意味する。

データあるいは指摘が不明確

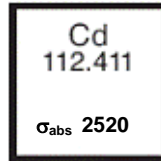
ナノ秒、マイクロ秒、ミリ秒、秒、分、時間、日、年

## Arrangement of Symbols and Data

### Elements

symbol of the element  
standard atomic weight based on C 12 = 12

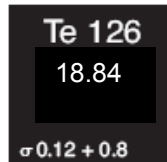
absorption cross section for thermal neutrons (barn)



### Stable Nuclides

symbol of the element, number of nucleons  
abundance in naturally occurring element (atom %)

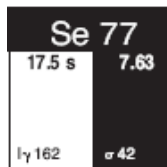
(n,  $\gamma$ )-cross sections for the formation of the metastable  
and the ground state of Te 127 by thermal neutrons (barn)



symbol of the element, number of nucleons

left hand side: half-life of metastable state;  
 $\gamma$ -energy (keV) of the isomeric transition

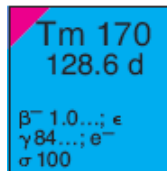
right hand side: abundance in the natural element (atom %)  
(n,  $\gamma$ )-cross sections for the thermal neutrons (barn)



### Unstable Nuclides

symbol of the element, number of nucleons  
half-life

modes of decay, endpoint energy of  $\beta^-$ -radiation (MeV)  
 $\gamma$ -energy (keV), conversion electrons,  
(n,  $\gamma$ )-cross section (barn)



symbol of the element, number of nucleons  
half-lives

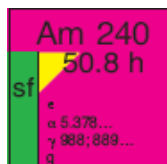
both states decay by electron capture; the metastable  
state decays to the ground state  
with a branching ratio for  $I_\gamma$  in the range of 50% – 95%



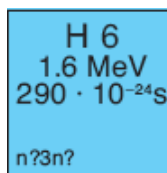
symbol of the element, number of nucleons

left hand side: spontaneous fission isomer,  $T < 0.1$  s

right hand side: decay data of the ground state  
"g" indicates that the daughter Pu 240g is formed to at least  
95 %; a population of Pu 240m up to 5% cannot be  
excluded



where emission of a particle results from a resonance  
state in an unstable nucleus, both the resonance  
width  $\Gamma$  (MeV) and the half-life  $T_{1/2}$  are given



## 記号およびデータの配置

### 元素

元素記号

C12 = 12 とする原子量

熱中性子に対する吸収断面積 ( バーン )

### 安定核種

元素記号、核子数

天然存在元素中の本核種の存在割合(at%)

熱中性子により準安定状態および基底状態のTe 127 を生成する (n,  $\gamma$ ) 反応の断面積 ( バーン )

元素記号、核子数

左側：準安定状態の半減期、異性核転移に伴う $\gamma$ エネルギー ( keV )

右側：自然存在元素中の本核種の存在割合(at%)、  
熱中性子に対する (n,  $\gamma$ ) 反応の断面積 ( バーン )

### 不安定核種

元素記号、核子数

半減期

崩壊様式、 $\beta$ 放射の最終エネルギー ( MeV )

$\gamma$ エネルギー ( keV )、転換電子

(n,  $\gamma$ ) 反応の断面積 ( バーン )

元素記号、核子数

半減期

左右両者とも電子捕獲により崩壊し、 $I_\gamma$ 崩壊への分岐率は 50  
~ 95%の範囲内で準安定状態から基底状態への崩壊を行う。

元素記号、核子数

左側:半減期0.1秒未満の自発核分裂

右側:基底状態の崩壊データ

"g" は娘核種の収率として Pu 240g は 95%以上、Pu 240m は  
5%以下であることを示す。

共鳴状態の不安定核種から粒子放出がなされる場合には、共  
鳴幅  $\Gamma$ (MeV) と半減期  $T_{1/2}$  の双方を記載する。