

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.

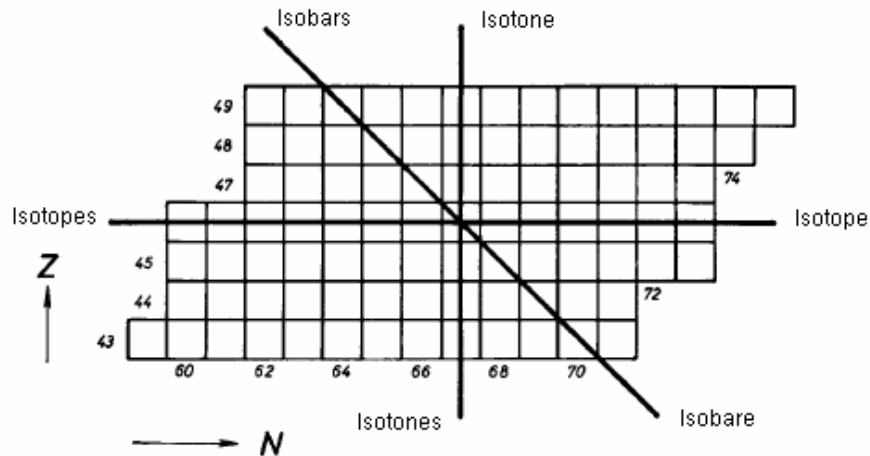
In the present nuclide chart update, the 1998 edition of the Karlsruhe Nuclide Chart was compared to the NUBASE 2003 evaluation [16] to establish a list of nuclides which were not present in the 1998 evaluation. From this list we have selected only nuclides which have been measured experimentally. In 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 α -, or β -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].



핵종(核種) 도표 설명

일반적 사항

실험적으로 관찰된 각 핵종은 이 도표에서 원소기호 및 핵자 A의 수를 포함하는 사각형으로 대표된다. 도표에서 핵종의 양성자 수 Z는 종축에, 중성자 수 N = A - Z는 횡축에 표시된다.

최근 갱신된 핵종 도표에서는 1998년 판 Karlsruhe 핵종 도표가 NUBASE 2003년 평가와 [16] 비교되었는데, 이는 1998년 평가에서는 존재하지 않았던 핵종의 리스트를 만들기 위함이다. 이 리스트로부터 우리는 실험적으로 측정된 핵종만 선정했다. 특히, 반감기 또는 질량이 결정되는 지점, 또는 핵종이 명확하게 확인되는 지점에서 핵종을 선정했다. 핵종이 확인되었으나 반감기가 측정되지 않은 곳에는, 반감기 탐지 한계점을 표시했다.(값보다 크거나 작게).

α -붕괴나 β -붕괴를 겪지 않은 준 안정 상태, 또는 자발핵분열(즉 감마선 방출에 의한 붕괴)은 반감기가 1 s. 보다 더 커야만 포함되었다. 불안정한 핵종 속의 공명 상태로 인해 입자가 방출되는 경우, 공명 폭 및 해당 반감기 모두는 다음의 관계식을 이용하여 계산한다:

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

A = 266 - 294 범위 내에 있는 질량수를 얻기 위해 우리는 2005년 (2005년 8월 12일 까지) Nuclear Data Sheets 최신개정판 [17]을 사용했다. NUBASE가 다루지 못한 기간, 즉 2003년부터 2006년 여름까지의 핵종 정보는 Nuclear Data Sheets 100 - 107에서 따왔다. 여기에 2006년 여름까지 NUBASE의 간행물도 고려하였다. 현 도표에 제시된 새로 개정된 전체 핵종 리스트는 이 브로슈어의 뒤편에도 나온다.

원소들의 원자량 및 동위원소 존재도는 J. R. De Laeter [18]로부터 가져왔다. 도표에는 오직 자발핵분열에 의해서만 붕괴하는 이성체에 대한 붕괴 데이터가 없다. B. Singh [19]로부터 반감기 (전부 0.1s. 이하) 표를 사용했다. 연쇄반응률은 R. W. Mills [20]에서, 중성자 단면은 N. E. Holden [21]에서 가져왔다.

[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



붕괴 방식: 색깔과 기호

안정된 핵종

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



원시 방사성 핵종, 즉 지구 물질 형성 시에 만들어져서 오늘날까지 존재하는 것들.

Decay modes are represented by specific colours.

- p: Proton decay
- α : Alpha decay
- ϵ : Electron capture
- β^+ : Positron decay
- I_γ : Isomeric transition
- β^- : Negatron decay
- sf: Spontaneous fission
- ce: Cluster emission e. g. C 14, Ne 20
- n: Neutron emission

붕괴 방식은 특정한 색깔에 의해 대표된다.

- p: 양성 붕괴
- α : 알파 붕괴
- ϵ : 전자 포획
- β^+ : 양전자 감퇴
- I_γ : 이성체 전이
- β^- : 음전자 감퇴
- sf: 자발핵 분열
- ce: 클러스터 방출 (예를 들어 C 14, Ne 20의 경우)
- n: 중성자 방출



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



왼쪽 부분에 보이는 데이터는 준안정 상태에 해당되며, 오른쪽 부분의 데이터는 기저 상태에 해당된다. I_γ 이란 동일한 핵종이 기저상태로 붕괴함으로써 인한(이성체 감퇴) γ -양자들을 표시한다.

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



준안정 또는 기저 상태로의 붕괴 정도를 지정하는 것은 불확실하다.

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.



한 개 혹은 그 이상의 짧은 반감기 준위들. 자발핵분열을 통한 유일한 붕괴로 관찰되었는데 (자발핵분열된 이성체), 이는 수직의 녹색 막대기로 표시된다.

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

γ

γ -양자 방출; 항상 각각의 모 핵종과 함께 열거된다.

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

$\beta xp; \beta xn;$
 $\beta d; \beta t;$
 $\beta x\alpha; \beta sf$

β -붕괴(β -지연 입자 방출 또는 분열)를 통한 특정 입자의 방출, 또는 딸 핵종의 들뜬 준위로부터의 자발핵분열.

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

$2\beta^-$

두 β -입자의 동시 방출 (" β -붕괴", 예를 들면 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 α

입자-불안정 핵종으로부터 특정 입자의 방출. 단 입자 방출이 에너지적인 이유 때문에 배제되는 경우에만 두 개 입자의 동시 방출이 제시된다. (예를 들면 Be 6 \rightarrow 2p).

Multiple Decay Modes and Branching Ratios

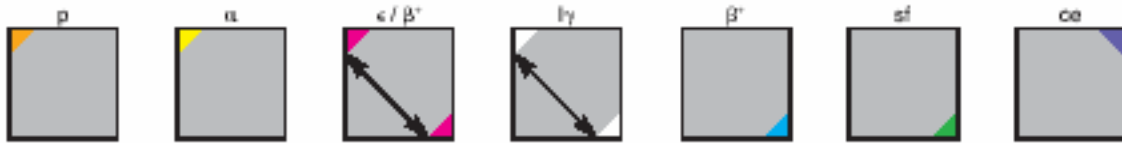
The branching ratios of the decay modes are indicated by 3 different sizes of the coloured sections and by the sequence of the symbols. Pure decay modes are indicated by a single colour (e.g. see previous section). Mixed decay modes are indicated by the use of coloured triangles. A

다수 붕괴 방식 및 분기 비율

붕괴 방식의 분기 비율은 3 개의 다른 크기의 색단면과 기호의 순서로 표시된다. 순수 붕괴 방식은 단색으로 나타난다 (예를 들어 이전 섹션을 보라). 혼합 붕괴 방식은 색깔 있는 삼각형을

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 β^- emission or spontaneous fission are always at the bottom right. Triangles representing ϵ/β^+ or γ may be at the top left or bottom right depending on the major mode. For ϵ/β^+ , the red triangle is at the bottom right if the main mode is alpha or proton emission.

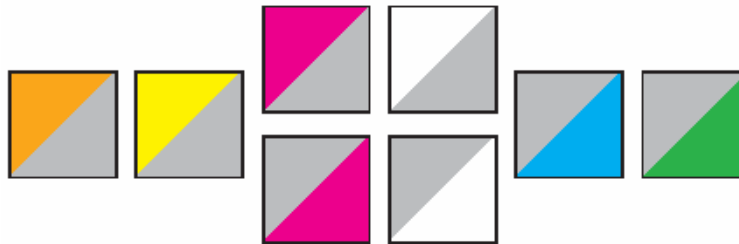
Otherwise, the red triangle is at the top left corner. For isomer transition γ , the white triangle is at the bottom right if the main mode is α - or p- emission or ϵ/β^+ , otherwise it is at the top left corner. Cluster emission is always indicated with a small triangle in the top right corner. Hence 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.

사용하여 나타난다. 그림에서 보이듯 맨 위 왼쪽이나 아래 오른쪽의 작은 색 삼각형은 $\leq 5\%$ 방식의 분기율을 나타낸다. (역으로, 주된 방식은 분기율이 $\geq 95\%$ 이다.) 양성자나 알파 방출을 의미하는 작은 삼각형들은 항상 맨 위 왼쪽 구석 (첫번째 2 개의 상자)에 있다. β^- 방출이나 자발핵분열에 대한 삼각형은 항상 오른쪽 아래에 있다. ϵ/β^+ 또는 γ 를 나타내는 삼각형은 주된 방식에 따라 왼쪽 위나 오른쪽 아래에 나타날 수도 있다. ϵ/β^+ 의 경우, 주 방식이 알파 또는 양성자 방출인 경우, 빨간 삼각형이 오른쪽 아래에 있다.

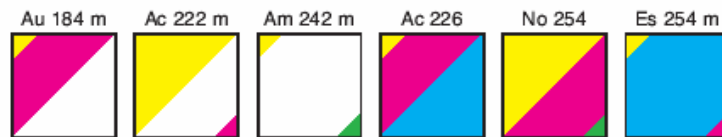
그렇지 않을 경우, 빨간 삼각형은 왼쪽 위 구석에 있다. 이성체 전이 γ 에 대해, 주 모드가 알파 또는 양자 붕괴이거나 ϵ/β^+ 라면 백색 삼각형이 오른쪽 밑바닥에 있다. 아니면 위편 왼쪽 구석에 있다. 클러스터 방출은 항상 오른쪽 구석 꼭대기에 있는 작은 삼각형으로 나타난다. 그러므로 작은 삼각형의 위치는 다음과 같다:



비주류 모드의 분기 비율이 범위 5 - 50% (50 - 95% 범위의 주 모드 분기율 포함)인 경우에, 상자는 오른쪽 위와 왼쪽 아래를 대각선으로 연결하여 두 개로 분할된다. 큰 삼각형의 위치는 위의 설명과 유사하다.

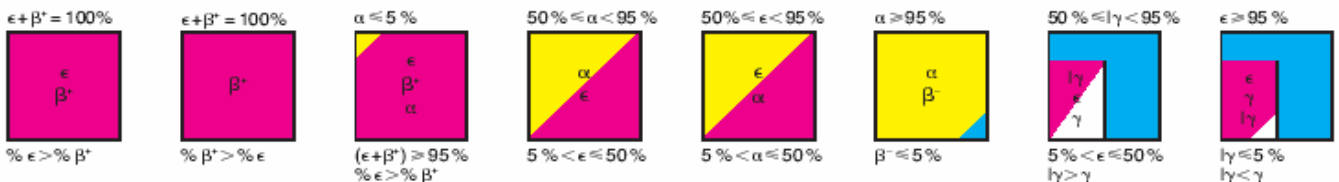
In some cases, three decay modes are possible. Some examples are shown below.

어떤 경우는 3 개의 붕괴 방식도 가능하다. 몇몇 보기가 아래에 있다.



Examples:

예:



The symbols for the particle emitting decay modes are arranged according to branching ratio with the highest branching ratio first, followed by γ -quanta and conversion electrons. The data for the isomeric decay have been arranged corresponding to the branching ratio of the decay mode. β -delayed particles or fission (β_n , β_p , β_{sf}) precede or follow the γ -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 β -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 γ -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 β -transition. In case further transitions with higher energies exist, the second number corresponds to the highest endpoint energy observed.

β -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 β^+ -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 γ -quanta arranged in order of decreasing intensities. Intensities less than 1% are given in brackets.

γ -Energies followed by an asterisk denote transitions after β -delayed particle emission.

Several γ -quanta of unknown intensities within the energy interval 291-1319 keV.

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

Cross Sections

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

Cross section for the (n, γ) 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, α) 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.

β^+ 2.7 ...
 β^- 1.2; 1.9...

β^- ...
 β^+ ...

ϵ

α 3.75,
4.43...
p 1.56
 β_p 4.5

γ 815; 1711...
 γ (1340)

γ 815*

γ 291-1319

e^-

σ

σ_f

$\sigma_{n,p}$

$\sigma_{n,\alpha}$

σ_{abs}

입자를 방출하는 붕괴 방식의 기호는 분기율에 따라 나열되었는데, 가장 높은 분기율이 처음에 오고, 그 다음에 γ -양자와 전환 전자들이 온다. 이성체 감퇴 데이터는 붕괴 방식의 분기율에 대응하여 나열되었다. β -지연 입자 또는 분열(β_n , β_p , β_{sf}) 가 그 상대적 강도에 따라 γ -양자 앞 또는 뒤에 온다.

주어진 유형의 방사선 에너지 순서는 각 방사선의 상대적 강도(점점 감소되는 순서로 나열)에 해당한다. β -붕괴의 경우는 약간 다른 규칙이 사용된다. (아래 참조)

...

이 점들은 낮은 세기를 지닌 동일한 유형이 후에 좀 더 전이할 것을 나타낸다.

에너지는 γ -입자에 대해 keV로 주어지고, 모든 입자에 대해서는 MeV로 주어진다. 에너지 값이 없는 방사선 기호는 방사선은 방출되지만 에너지가 측정되지는 않았다는 것을 나타낸다.

가장 많은 β -전이의 끝점 에너지를 나타낸다. 고에너지를 가진 전이가 나중에 더 일어날 경우, 두 번째 숫자는 측정된 가장 높은 끝점 에너지이다.

알려진 에너지를 갖는 β - 전이이며, 각 존재도의 합은 1% 미만이다.

β^+ -붕괴보다 전자 포획의 가능성이 더 큰 경우에만 특별히 표시한다.

입자 에너지는 각각의 전이에서의 감소율에 따라 나열되었다. 비록 가장 현저한 그룹이 1% 미만이라 할지라도 적어도 한 개의 에너지가 주어진다.

가장 강한 γ -양자의 에너지는 세기가 감소하는 순서로 배열되었다. 1% 미만의 강도는 괄호 속에 나타났다.

별표가 쳐진 γ - 에너지는 β -지연된 입자 방출 후에 전이가 일어났음을 나타낸다.

에너지 간격 291- 1319 keV 내에서 미지의 강도를 가진 g -양자.

전환 전자는 g - 양자들보다 더 많아야만 지정된다. 에너지는 인용되지 않는다.

단면

모든 단면은 '반' (barn= 10^{-24} cm^2)으로 표시되고, 열 중성자 (0.0253 eV)를 가진 반응이 있음을 나타낸다.

(n, γ) 반응에 대한 단면을 나타낸다. 값이 두 개 주어진다면, 첫 번째 값은 준안정 상태에서 핵 생성물이 형성됨을 나타내고, 두 번째 값은 기저 상태에서의 형성을 나타낸다.

분열 단면

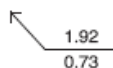
(n, p) 단면

(n, α) 단면

흡수 단면

추가 기호 및 약어

U235 (위의 숫자)와 Pu239(아래 숫자)의 열 중성자 분열에 대한 연쇄반응률 (%)은 화살표선으로 나타낸다.



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



닫혀있는 중성자 또는 양성자 껍질을 가진 핵종은 굵은 수직선과 수평선으로 특징을 표시한다.

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).

m; g

"m" 그리고/혹은 "g" 기호는 딸 핵종의 준안정 그리고/또는 기저 상태가 각각 측정되었음을 나타낸다. 이 기호들은 확률이 감소하는 순서대로 나열되었다. 5% 미만의 확률을 가진 가지들은 표시하지 않았다. 상이한 준안정 상태들을 표현하기 위해 "m"의 아래 첨자, 예를 m_1 , m_2 를 사용했다. (m_1 보다는 m_2 가 에너지 상태가 더 높다.)

Data or assignment uncertain.

?

불확실한 자료나 해결되어야 할 문제

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

ns, μ s, ms, s,
m, h, d, a

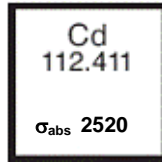
나노세컨드, 마이크로세컨드, 밀리세컨드, 초분, 시간, 일, 년

Arrangement of Symbols and Data

Elements

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

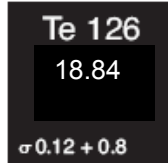
absorption cross section for thermal neutrons (barn)



Stable Nuclides

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

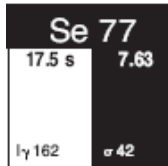
(n, γ)-cross sections for the formation of the metastable and the ground state of Te 127 by thermal neutrons (barn)



symbol of the element, number of nucleons

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

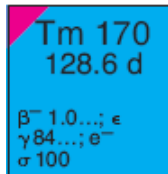
right hand side: abundance in the natural element (atom %)
(n, γ)-cross sections for the thermal neutrons (barn)



Unstable Nuclides

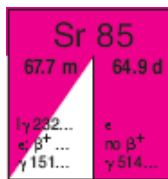
symbol of the element, number of nucleons
half-life

modes of decay, endpoint energy of β^- -radiation (MeV)
 γ -energy (keV), conversion electrons,
(n, γ)-cross section (barn)



symbol of the element, number of nucleons
half-lives

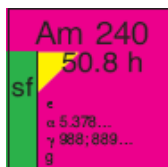
both states decay by electron capture; the metastable state decays to the ground state with a branching ratio for I_γ in the range of 50% – 95%



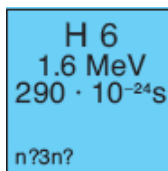
symbol of the element, number of nucleons

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 Γ (MeV) and the half-life $T_{1/2}$ are given



기호와 데이터의 배열

원소들

원소기호

C 12 = 12에 근거하는 표준 원자량

열 중성자에 대한 흡수 단면(barn)

안정한 핵종

원소기호, 핵자의 수

원소의 자연 발생률 (원자 %)

열 중성자 (barn)로 나타난 Te 127의 준안정상태와 기저 상태 형성에 대한 (n, γ)-단면

원소기호, 핵자 수

좌측: 준안정 상태의 반감기;

이성체 변이의 γ -에너지 (keV)

우측: 자연적 원소 존재율 (원자 %)

열 중성자 (barn)에 대한 (n, γ)-단면

불안정한 핵종

원소기호, 핵자 수

반감기

붕괴 방식, β^- -방출의 끝점 에너지(MeV)

γ -에너지 (keV), 전환전자

(n, γ)-단면(barn)

원소기호, 핵자 수

반감기

전자 포획에 의한 붕괴의 두 상태;

준안정 상태에서부터 기저 상태로

I_γ 에 대한 50% - 95% 범위 내의 분기율

원소기호, 핵자 수

좌측: 자발핵분열 이성체, $T < 0.1$ s

우측: 기저 상태의 붕괴 데이터

"g"는 딸 Pu 240g가 적어도 95%까지 생성된다는 것을 나타낸다.

5%의 Pu 240m의 존재를 배제해서는 안 된다.

불안정한 핵에 있는 공명 상태의 결과로 입자가 방출될 때,

공명폭 Γ (MeV) 와 반감기 $T_{1/2}$ 둘 다 표시한다.