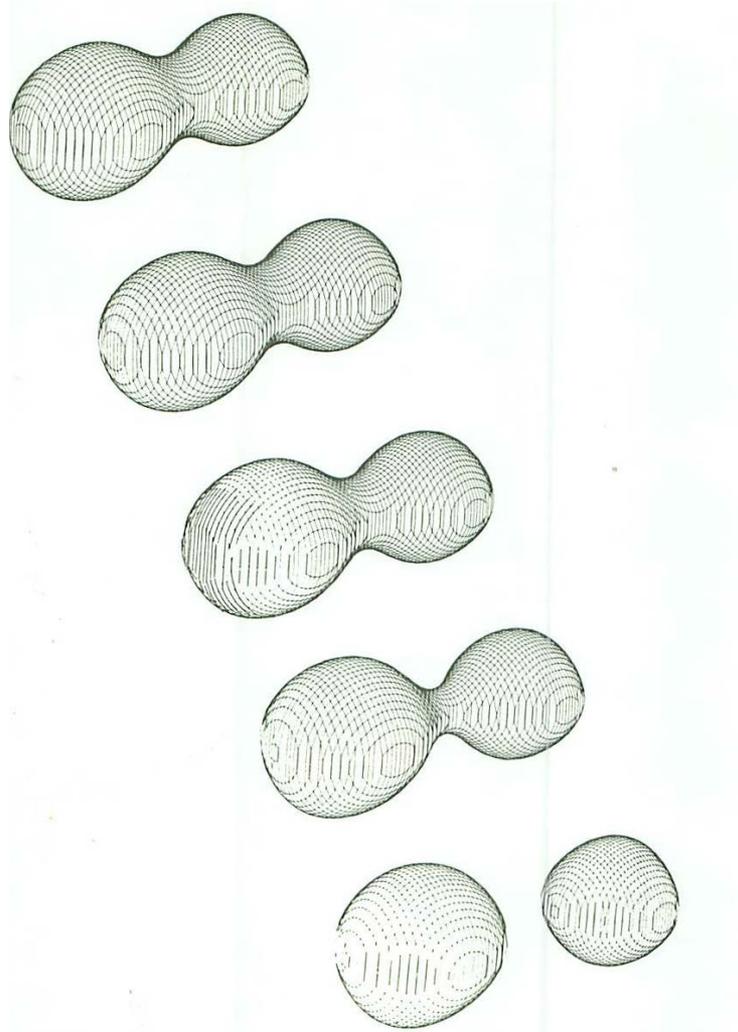


原子核分裂とその連鎖反応

目次

1. 原子核分裂の過程
2. 核分裂エネルギーの貯蔵庫としての電気的斥力エネルギー
3. 核分裂の基本的特徴
4. 核分裂連鎖反応の臨界条件
5. 核分裂連鎖反応の臨界量

1. 原子核分裂の過程(数値計算例)



Be8の自発的核分裂の数値計算例

J. Negele, Rev. Mod. Phys. Vol.54(1982)

2. 核分裂エネルギーの貯蔵庫としての 電気的斥力エネルギー



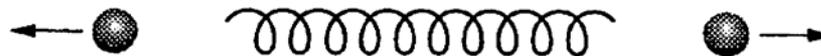
(A)



(B)



(C)



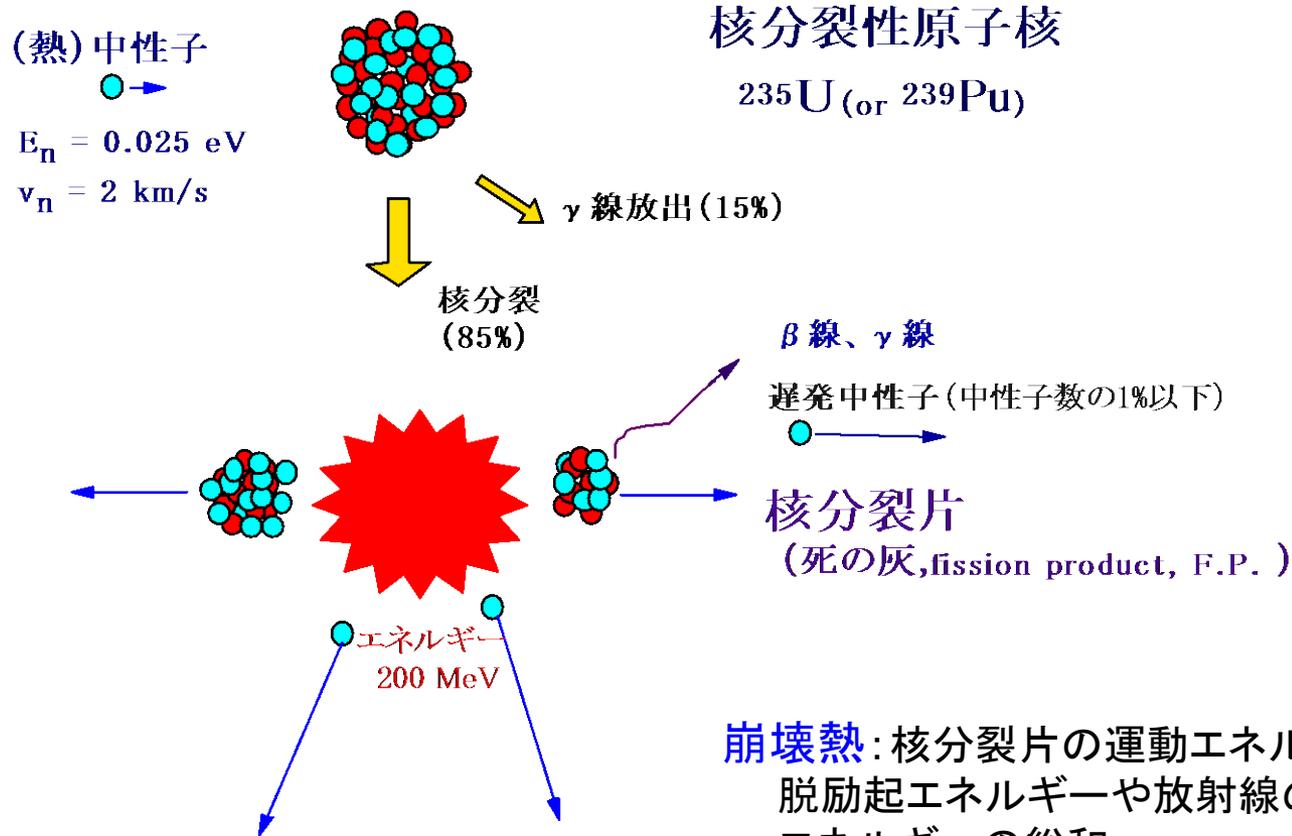
(D)

3. 核分裂の基本的特徴

核分裂には2種類ある:

- (1) 誘起核分裂(induced nuclear fission)
- (2) 自発核分裂(spontaneous nuclear fission)

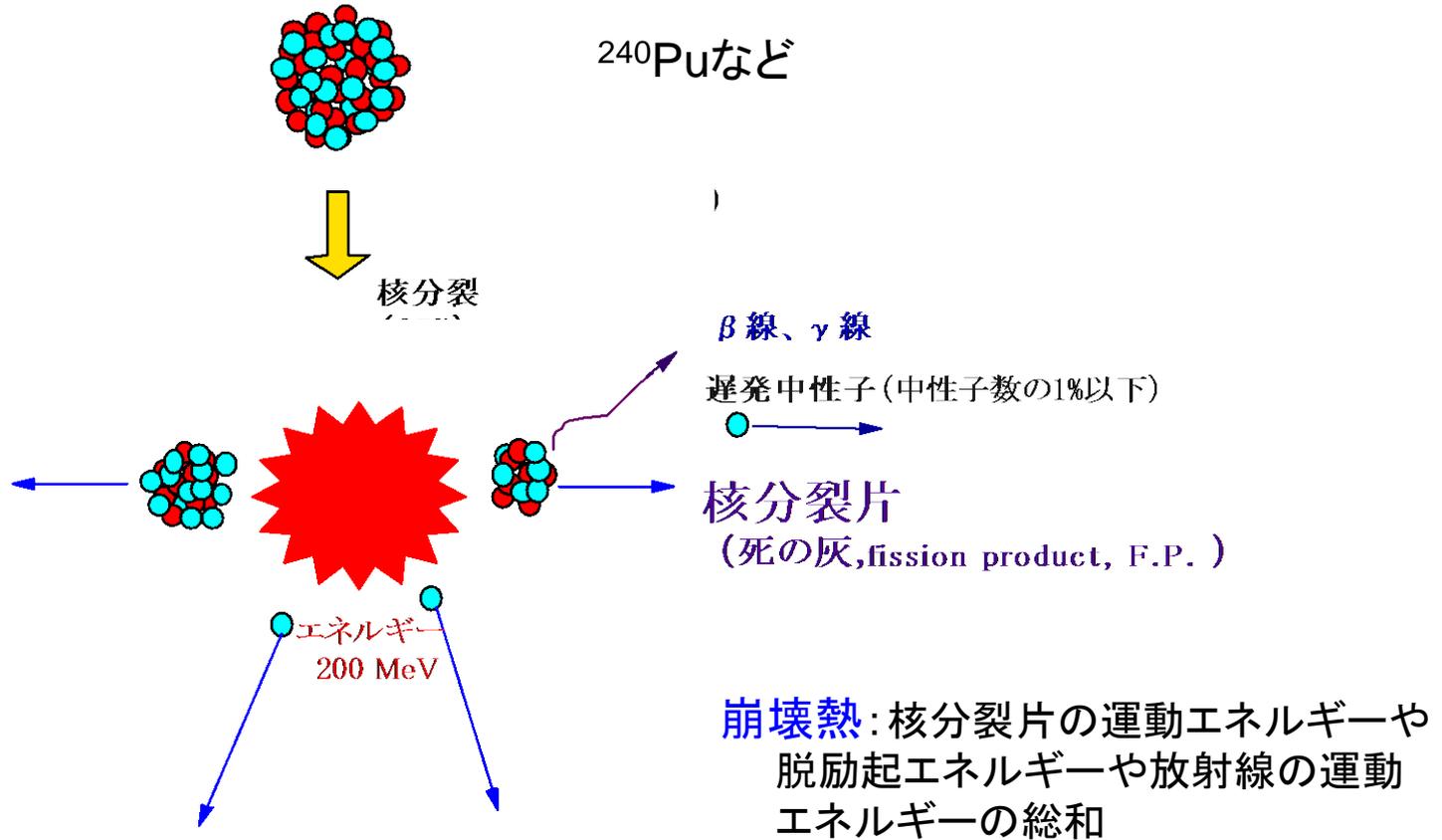
(1) 誘起核分裂:外から入射する中性子により誘起される核分裂



崩壊熱: 核分裂片の運動エネルギーや
脱励起エネルギーや放射線の運動
エネルギーの総和

(2) 自発核分裂

自発核分裂の割合が相対的に高い原子核:



参考

主な核種の自発核分裂の確率:

235U: 5.60×10^{-3} 回/s-kg

238U: 6.93 回/s-kg

239Pu: 7.01 回/s-kg

240Pu: 489,000 回/s-kg (約 1,000,000 中性子/s-kg)

・プルトニウム239の原子核は生成過程で中性子を1個余計に吸収する傾向があるため、実際のプルトニウム239には常にある量のプルトニウム240が含まれている。プルトニウム240は自発核分裂の確率が高いため、プルトニウムの利用に際しては好ましくない混入物質とされている。兵器級プルトニウムではプルトニウム240の含有量は7%以下とされている。

・ガンバレル型の原子爆弾では、分割した核物質を合体させて臨界量にするために要する臨界挿入時間 (critical insertion time) に約1ミリ秒かかり、この時間内に起こる自発核分裂の確率は十分に小さくなければならない。そのため、ガンバレル方式の原爆に用いられる核物質としてはウラン235のみが適している。

・Pu原爆では自発核分裂の割合が無視できないPu240の含有のために爆縮という方式が発明されて、長崎原爆として実現し、その後の核弾頭にも採用されている。

・自発核分裂が崩壊モードの中で無視できない確率で起こる放射性同位元素は中性子線源として用いられる。

・この目的ではカリホルニウム252 (半減期2.645年、自発核分裂分岐比 3.09%) がしばしば用いられている。

・このような線源から放出される中性子線は、航空貨物に隠された爆発物の検査や建設業界での土壌の水分含有量の測定、サイロに貯蔵された物資の湿度の測定、その他様々な用途に使われている。

高速中性子(即発中性子) \longrightarrow (平均) 2.5個

$$\begin{aligned} E_n(\text{平均}) &= 2\text{MeV} \\ &= 2,000,000 \text{ eV} \\ v_n(\text{平均}) &= 19,500 \text{ km/s} \end{aligned}$$

核分裂していない原子核に吸収されると、
次の核分裂を起こすことができる！
 \rightarrow **連鎖反応**の可能性

核分裂片 (F.P., Fission Product)

- 1) 真っ二つに分裂するのはほとんどなく、
質量数(陽子数)で、
軽い分裂片で90(38)前後、
重い分裂片で140(54)前後の組み合わせが多い。
 \leftarrow **魔法数20,28,50,82**を持つ原子核がしやすい
- 2) 一般に、放射性で、ガンマ線、ベータ線または中性子(**遅発中性子**)を放出する。
- 3) 超重荷電粒子としての核分裂片:
分裂前の原子が持っていた電子は適当な分かれ方をするが、
取り残されるものも多い。
それぞれの核分裂片は約+20単位の電気量を持っている。
 \rightarrow 励起作用, 電離作用が非常に大きい。
 $E_{FP1} = \text{約}97\text{MeV}, E_{FP2} = \text{約}65\text{MeV}$
 $v_{FP} = \text{約}c/3 = 100,000 \text{ km/s}$
空気中の飛程は約2cm程度である。

核分裂反応のエネルギーは
化学反応のエネルギーの約200万倍！
(要素的過程における比較)

1電子ボルト(eV)

=1ボルトの電圧で電子を加速するとき電子のもつエネルギー

= 1.6×10^{-19} joule

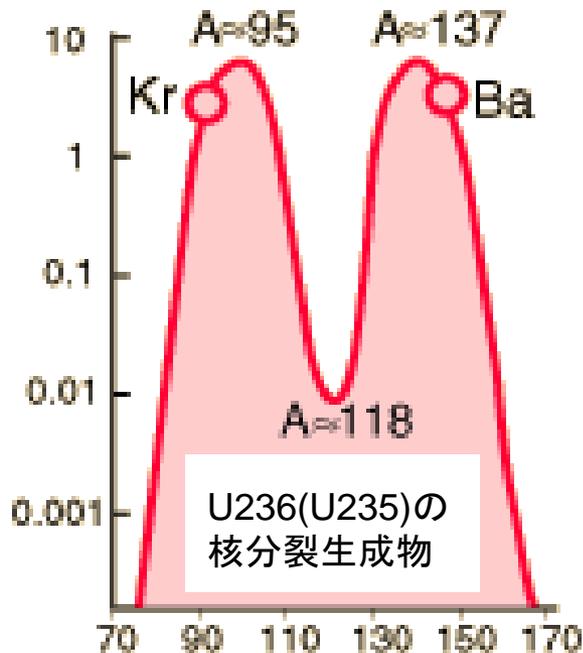
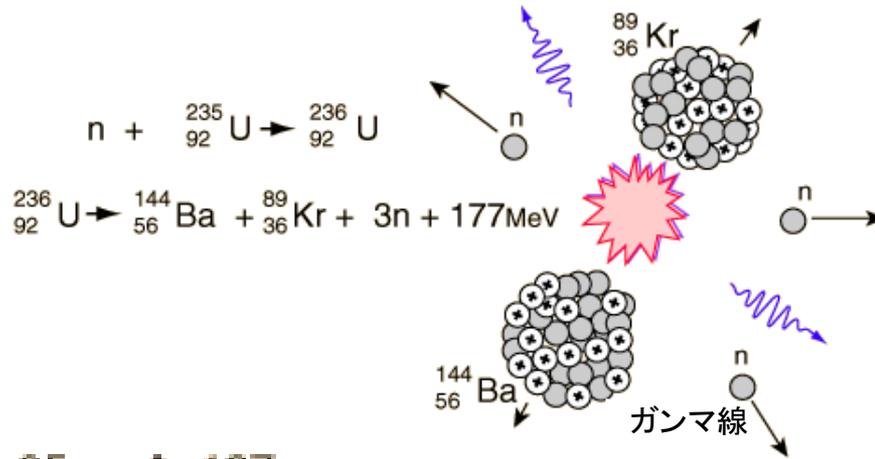
化学反応におけるエネルギーは数eV

例: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{Q}$;

$\text{Q} = 2.9 \text{ eV / 分子}$

核分裂生成物の収率の質量数依存性

U235の核分裂過程における多くの核反応の一例



グラフの説明と注意:

縦軸(対数)は収率, 横軸は質量数 A_1, A_2
 収率とは質量数 A の原子核が質量数 A_1, A_2 をもつ2つ原子核に分裂する割合であるから、合計は200%になる。

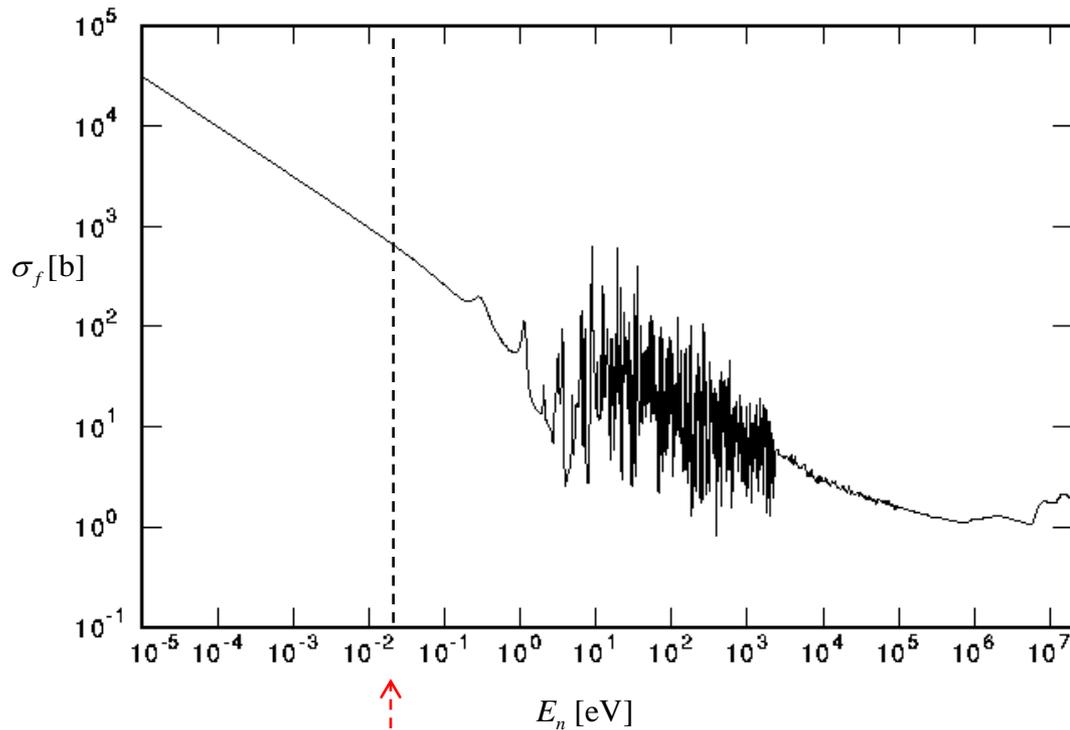
グラフからわかること

- 1) 真二つになる割合は非常に小さい。
- 2) ピークになるのは $A_1=97, A_2=135$ あたりである。この理由は原子核の魔法数に関係している。

主な核分裂生成物とU-235,Pu-239の比較

生成物	U-235の収率	Pu-239の収率	半減期	備考
Cs-133	6.70 %	7.02 %	安定	一部は中性子捕獲により, 半減期約2年のCs-134になる
Cs-137	6.19	6.61	30.17y	
I-129	0.543	1.37	15.7My	
I-131	2.83	3.86	8.02d	
I-135	6.28	6.54	6.57h	崩壊で生成するXe-135は原子炉中で最も主要な毒性物質で、10-15%が中性捕獲でXe-136になり、残りは半減期9.14hでCs-135になる。
Zr-93	6.30	3.80	1.53My	
Tc-99	6.05		211ky	
Sr-89	4.73	1.72	50.53d	
Sr-90	5.75	2.10	28.9y	
Xe-133	6.70	7.02	5.25d	
Pm-147	2.27		2.62d	
Sm-149	1.09	1.22	安定	主要な毒性物質の一つ

ウラン235核に中性子が入射した場合の 核分裂反応の断面積のエネルギー依存性



熱中性子領域

共鳴吸収領域

核分裂中性子領域

グラフの説明と注意:

縦軸: 核分裂断面積 σ_f (fission cross section) の対数. 単位[b, barn]

横軸: 中性子のエネルギー E_n の対数
単位は電子ボルト[eV]

グラフからわかること

- 1) 熱中性子のエネルギーに対しては約550bと非常に大きい.
- 2) エネルギーの平方根に反比例する傾向
- 3) 0.3 eV~0.5keV領域に共鳴吸収のピーク.

最初の自立的な核分裂連鎖反応1942年@米国シカゴ大学

NUCLEAR ENERGY

HENRY MOORE - SCULPTOR

DEDICATED DECEMBER 2, 1967

THE 25TH ANNIVERSARY OF THE
FIRST CONTROLLED GENERATION OF NUCLEAR POWER
AN EXPERIMENT BY ENRICO FERMI AND HIS COLLEAGUES

2014.09.28 03:59

ON DECEMBER 2, 1942
MAN ACHIEVED HERE
THE FIRST SELF-SUSTAINING CHAIN REACTION
AND THEREBY INITIATED THE
CONTROLLED RELEASE OF NUCLEAR ENERGY

2014.09.28 03:59

Chicago Landmark



Site of the First Self-sustaining Controlled Nuclear Chain Reaction December 2, 1942

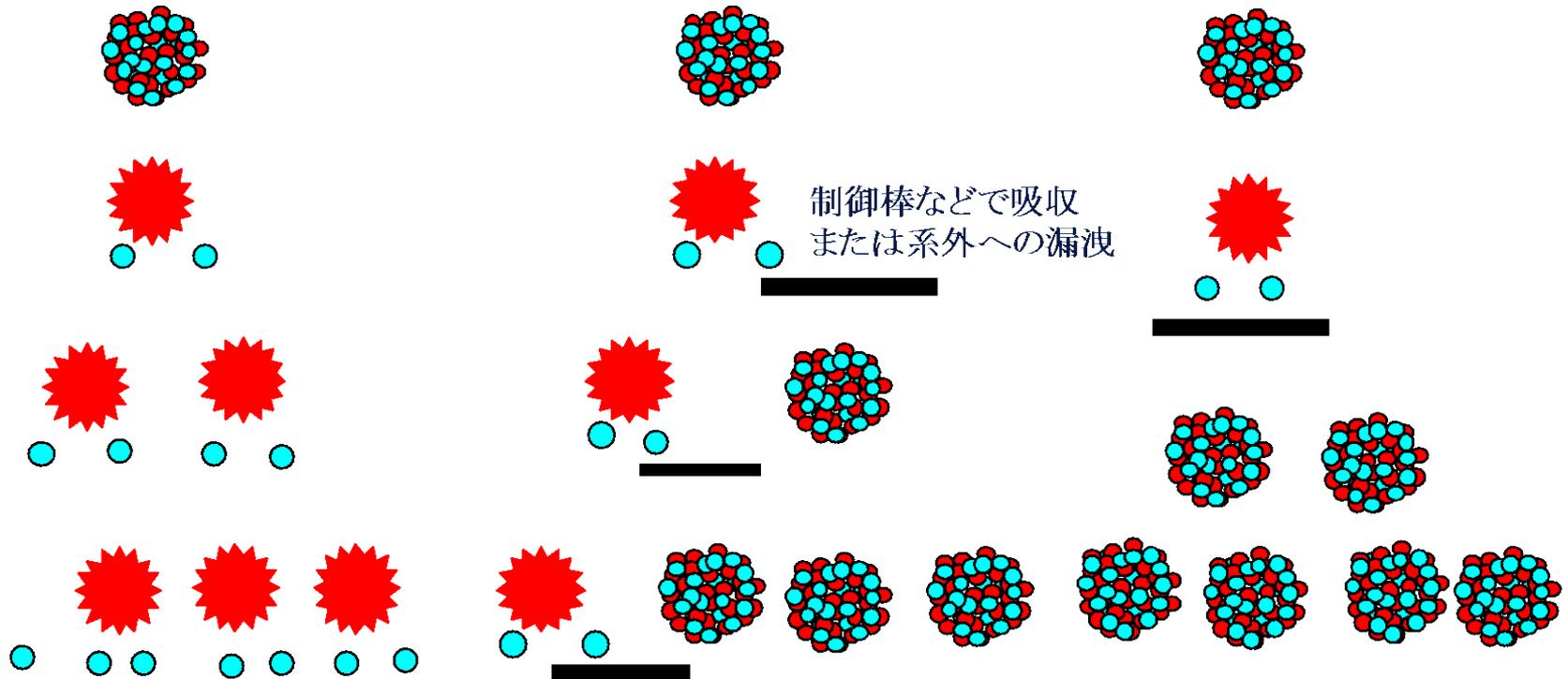
Physicist Enrico Fermi and his colleagues established the first self-sustaining controlled nuclear reaction in makeshift laboratories constructed under the grandstands of Stagg Field Stadium on December 2, 1942. The success of this experiment ushered in the atomic age, opening tremendous potential to modern science.

Designated a Chicago Landmark on October 27, 1971,
by the City Council of Chicago.
Richard J. Daley, Mayor

Commission on Chicago
Historical and Architectural Landmarks

2014.09.28 04:03

4. 核分裂連鎖反応の臨界条件



臨界条件

臨界超過

発生する中性子数 $>$

臨界

発生する中性子数 $=$ 材料等への吸収される、または系外への漏洩する中性子数

臨界未満

発生する中性子数 $<$

5. 核分裂連鎖反応の臨界量

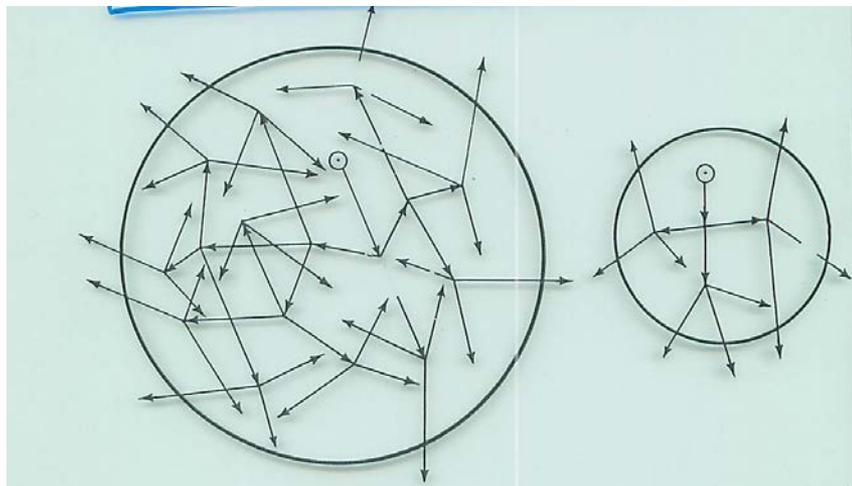
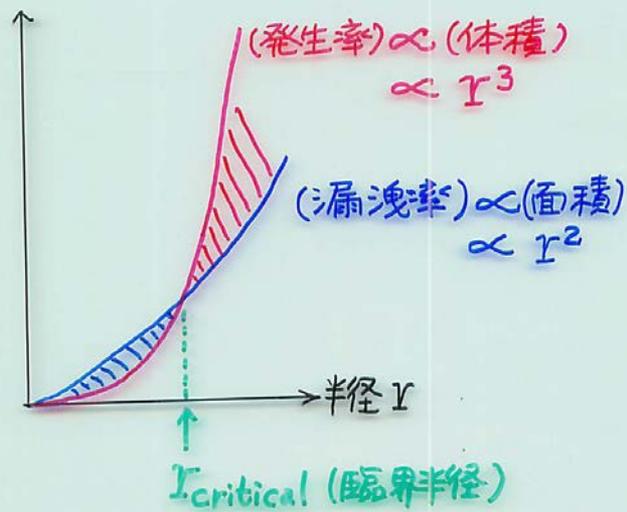


Figure 1.48. Effect of increased mass of fissionable material in reducing the proportion of neutrons lost by escape.



臨界量の実例

核種	臨界量 (爆縮なし)		半減期		
	高速中性子系	熱中性子系	α 崩壊	自発核分裂	β 崩壊
$^{235}_{92}\text{U}$	49 kg	820 g	7.1×10^8 y	1.8×10^{17} y	
$^{239}_{94}\text{Pu}$	10 kg	530 g	2.4×10^4 y	5.5×10^{15} y	
^{240}Pu	158 kg		6.6×10^3 y	1.3×10^{11} y	
$^{241}_{95}\text{Am}$	113 kg		458 y	2.3×10^{14} y	
^{242}Am	6 kg (*)	23 g	152 y ($^{242\text{m}}\text{Am}$)		16 h
$^{245}_{96}\text{Cm}$		42 g	9.3×10^3 y		
^{247}Cm		159 g	1.6×10^7 y		
$^{249}_{98}\text{Cf}$		32 g	360 y	1.5×10^9 y	
^{251}Cf		10 g	800 y		
^{252}Cf		1.5~2 g (*)	2.7 y	85 y	

一口に、連鎖反応といっても

出力を定常的に維持する連鎖反応の条件と爆発的連鎖反応を開始し、想定された威力発揮までの過程を完了する条件とはお互いにかかなり異なる！

俗説：原子炉は制御された核分裂、原爆は制御されない核分裂



正しくは、どちらも制御が必要あり、しかし、異質の制御である

定常的出力を出す連鎖反応(原子炉)：

発生する中性子数の1%以下の遅発中性子数の制御がポイント

爆発的連鎖反応(核爆発装置)：

広島型原爆(ウラン235使用、砲身型)；臨界量以下の核分裂物質を急速に合体
長崎型原爆(爆縮型)：高精度の構造、

超短時間(1000万分の1秒以下)の高精度の制御が必要。