



# QFL4520 – Química Ambiental II

## *Parte II – Recursos Naturais*

Prof. Dr. Reinaldo C. Bazito

bazito@iq.usp.br



# Parte II – Recursos Naturais: Energia e Água

- *Energia - produção e usos;*
- *Combustíveis fósseis;*
- *Energia nuclear;*
- *Energia de fontes renováveis;*
- *Água – produção e uso.*



## Aula 6:

- *Energia nuclear;*



# Energía Nuclear



# Energia de ligação nuclear

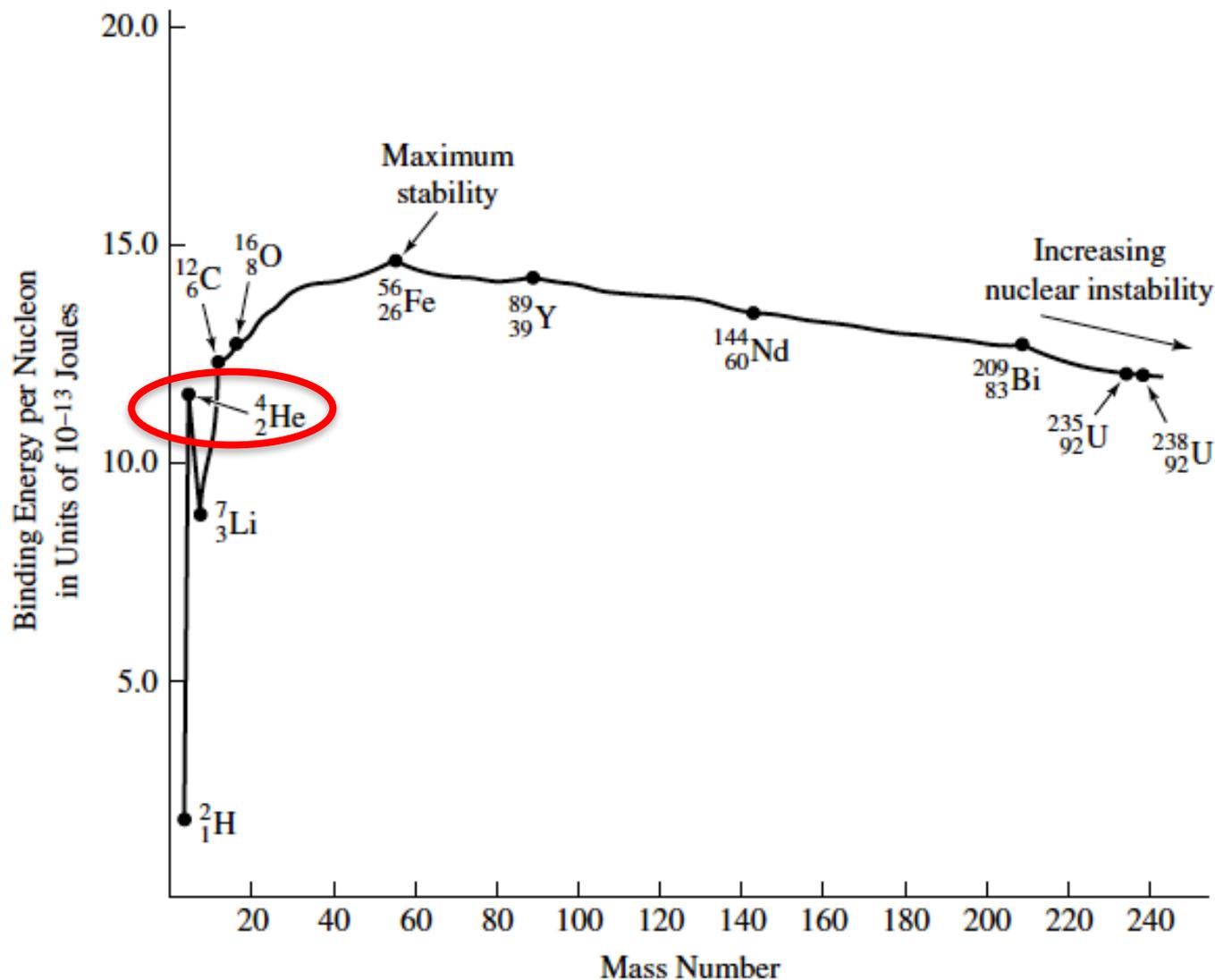


Figure 3.1 Nuclear binding energy curve.

# Partículas Atômicas/Subatômicas

TABLE 3.1 SIMPLE ATOMIC PARTICLES

Type	Schematic representation	Charge	Mass*	Chemical symbol <sup>†</sup>
Neutron		0	1.0087	${}^1_0\text{n}$
Proton		+1	1.0078	${}^1_1\text{p}$
Electron		-1	0.0009	$e^-$
Helium-4 (alpha particle)		+2	4.0026	${}^4_2\text{He}$

\*In atomic mass units (amu), where  $1 \text{ amu} = 1.6606 \times 10^{-24} \text{ g}$ .

<sup>†</sup>The superscript for neutron, proton, and helium-4 is the *mass number*, equivalent to the number of protons and neutrons in the nucleus; the subscript is the *atomic number*, equivalent to the number of protons; the superscript of the electron indicates its negative charge.



# Curva de Estabilidade Próton-Nêutron

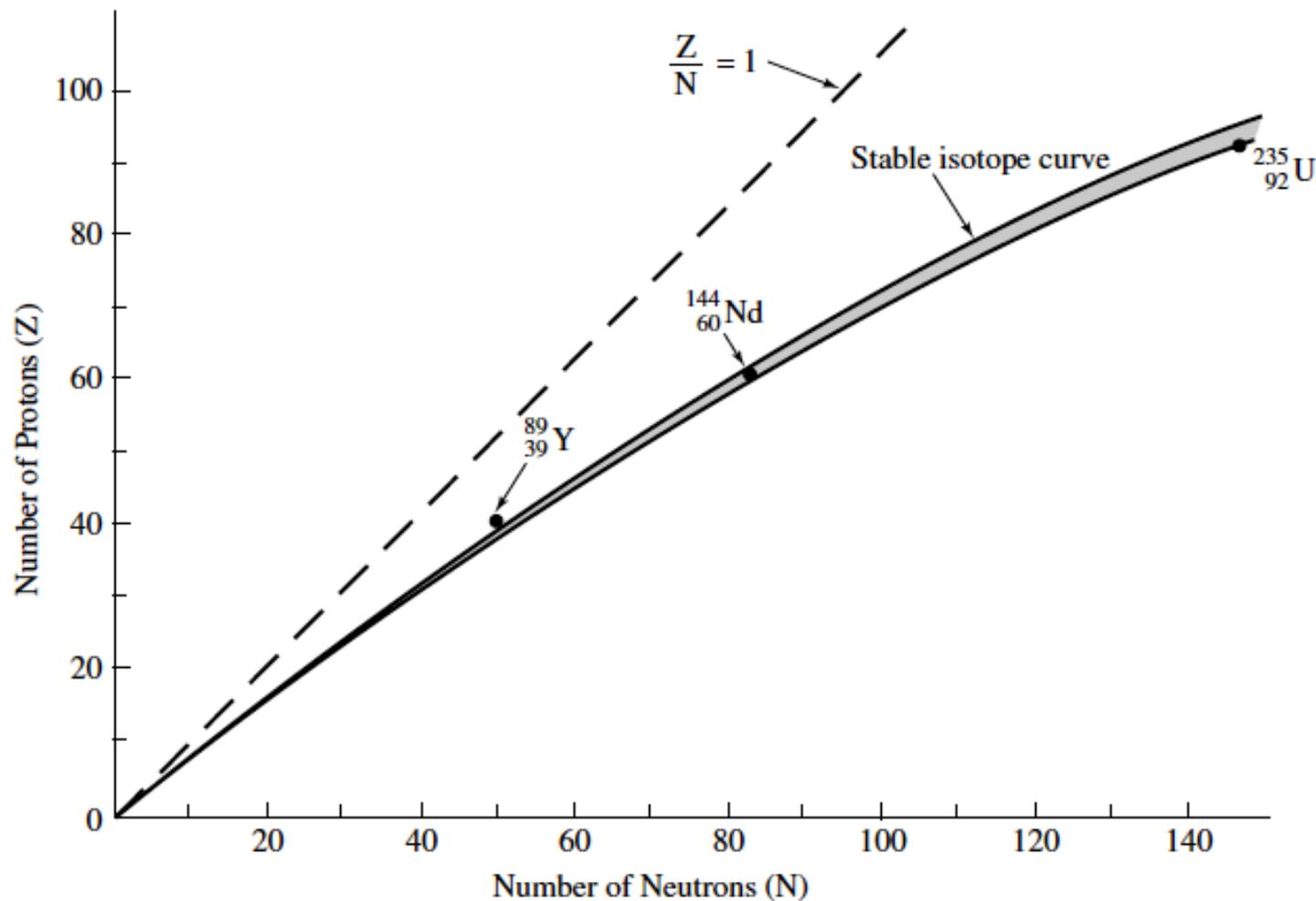
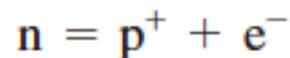


Figure 3.2 The proton-neutron stability curve.

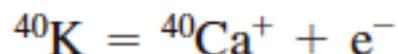


## Decaimento Beta ( $\beta$ )

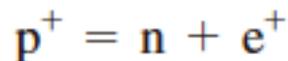
- *Excesso de nêutrons = conversão de nêutron em próton e ejeção de elétron ("raios beta");*



- *Forma-se novo elemento (com um próton a mais – número atômico 1 unidade maior - e mesma massa atômica)*



- *Falta de nêutrons = conversão de próton em neutron e ejeção de pósitron ("raios beta");*



- *Forma-se novo elemento (com um próton a menos – número atômico 1 unidade menor e mesma massa atômica)*



## Decaimento Alfa ( $\alpha$ )

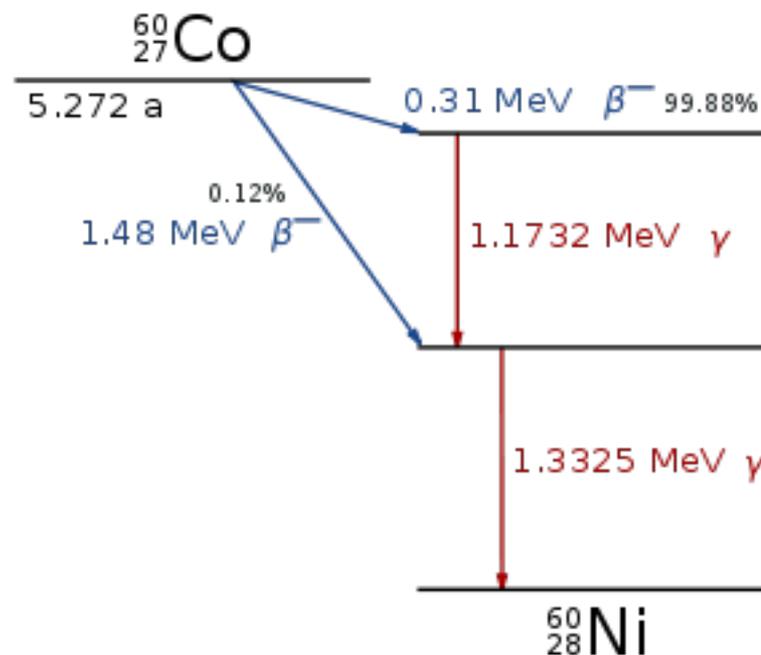
- *Excesso de prótons (independentemente do número de nêutrons) – ejeção de um núcleo de Hélio (2 prótons e dois nêutrons) (“raios alfa”);*
- *Forma-se novo elemento (com dois prótons a menos e número atômico 4 unidades menor) – número atômico 1 unidade maior - e mesma massa atômica)*



# Formas de Decaimento Nuclear

## Decaimento Gama ( $\gamma$ )

- *Excesso de energia – normalmente ocorre em outro decaimentos quando os núcleos formados estão num estado nuclear excitado;*
- *O decaimento ocorre por emissão de radiação gama (radiação eletromagnética)*



# Radioisótopos de ocorrência natural

**TABLE 3.2 LONG-LIVED RADIOISOTOPES**

Isotope	$t_{1/2}$ (years)
$^{238}\text{U}$	$4.5 \times 10^9$
$^{235}\text{U}$	$7.0 \times 10^8$
$^{232}\text{Th}$	$1.4 \times 10^{10}$
$^{87}\text{Rb}$	$4.9 \times 10^{10}$
$^{40}\text{K}$	$1.3 \times 10^9$

*Meia-vida = tempo para metade dos núcleos presentes decaírem (atividade cair pela metade) – decaimento é exponencial*



# Seqüência de Decaimentos

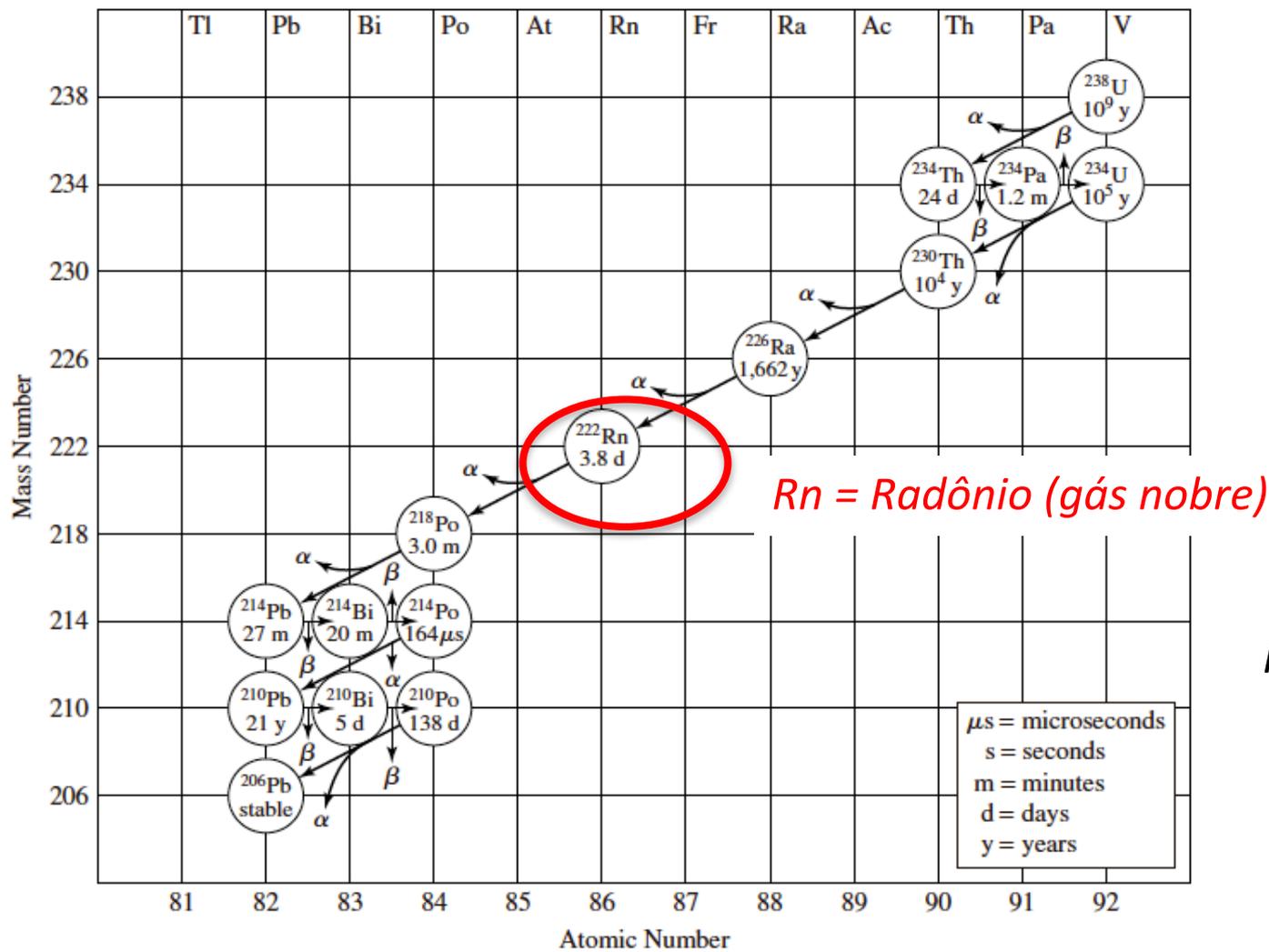


Figure 3.3 Uranium-238 decay chain through lead-206. The half-lives of isotopes are given in the circles.



# Efeitos da radiação

*Radiação  $\alpha$ ,  $\beta$  ou  $\gamma$  de alta energia é emitida no decaimento radioativo (faixa de MeV – Milhões de elétrons-volt) – “arrancam” elétrons de átomos com os quais interagem = “radiações ionizantes”*



[https://images.moviepilot.com/images/c\\_limit,q\\_auto:good,w\\_600/hulk-2003-movie-review-lab-accident-bruce-banner-eric-bana-gamma-radiation-why-it-was-a-mistake-to-change-the-hulk-s-origin-story-for-the-b-jpeg-218422/from-hulk-2003.jpg](https://images.moviepilot.com/images/c_limit,q_auto:good,w_600/hulk-2003-movie-review-lab-accident-bruce-banner-eric-bana-gamma-radiation-why-it-was-a-mistake-to-change-the-hulk-s-origin-story-for-the-b-jpeg-218422/from-hulk-2003.jpg)

<http://i.imgur.com/qu0f1.jpg>

# Efeitos da radiação

**TABLE 3.3** PATHS OF ENERGETIC PARTICLES IN BIOLOGICAL TISSUE

Type of radiation	Range in biological tissue*	Relative biological effectiveness <sup>†</sup>
alpha	0.005 cm	10–20
beta	3 cm	1
gamma	~20 cm	1

Some hazardous radioactive isotopes

Element	Type of radiation	Half-life	Site of concentration
$^{239}_{94}\text{Pu}$	alpha	24,360 years	Bone, lung
$^{90}_{38}\text{Sr}$	beta	28.8 years	Bone, teeth
$^{131}_{53}\text{I}$	beta, gamma	8 days	Thyroid
$^{137}_{55}\text{Cs}$	beta, gamma	30 years	Whole body

\*For a 6 Mev particle.

<sup>†</sup>Accounts for the fact that cell damage increases as the density of the damage sites increases.



## Radiação Alfa ( $\alpha$ )

- *Partículas - dano intenso num alcance curto;*
- *Blindadas facilmente (0,05 mm em tecido biológico) – radiação alfa externa é menos perigosa;*
- *Inalação de poeira ou ingestão de radioisótopos emissores alfa – grande chance de danos (câncer);*
- *Radioisótopos com decaimento rápido são mais perigosos!*

*Urânio (meia vida longa) – Radônio (meia vida curta)*



## Radiação Beta ( $\beta$ )

- *Partículas - Dano menor mas num alcance maior;*
- *Blindadas menos facilmente (3 cm em tecido biológico) – radiação beta externa é perigosa;*



## Radiação Gama ( $\gamma$ )

- *Radiação eletromagnética - Dano intenso num alcance longo;*
- *Blindagem difícil (20 cm em tecido biológico) – radiação gama é extremamente perigosa;*



## Nêutrons

- *Interagem ionizando ou com os núcleos, gerando radioisótopos;*
- *Decaimento espontâneo (meia-vida de 12 min) – só são perigosos na vizinhança de seus emissores;*



# Exposição à radiação

- *Menor a meia vida do radioisótopo = maior a exposição;*
- *Desintegrações radioativas medidas em Curies (Ci)*  
*1 Ci =  $3,7 \times 10^{10}$  desintegrações/s;*
- *Exposição é medida em diversas unidades:*

*roentgen (R) = Radiação que gera 1 unidade eletrostática de cargas negativas e positivas em 1 cm<sup>3</sup> de ar;*

*rad = quantidade de radiação que deposita 100 ergs de energia em 1g de material*

*rem (roentgen-equivalent-man) = quantidade de radiação que gera o mesmo efeito biológico em 1 pessoa que 1 R de raios X.*

*gray = rad e sievert = 100 rem*

# Exposição à radiação

**TABLE 3.4 AVERAGE ANNUAL EXPOSURE (1990) TO RADIATION FOR PEOPLE IN THE UNITED STATES**

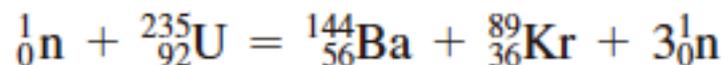
Source of radiation	Dose (mrem)	Percent of total dose
<b>Natural</b>		
Radon gas	200	55
Cosmic rays	27	8
Terrestrial (radiation from rocks and soil other than radon)	28	8
Inside the body (naturally occurring radioisotopes in food and water)	39	11
<b>Total natural</b>	<b>294</b>	<b>82</b>
<b>Artificial</b>		
<b>Medical</b>		
X-rays	39	11
Nuclear medicine	14	4
Consumer products (building materials, water)	10	3
<b>Other</b>		
Occupational (underground miners, x-ray technicians, nuclear plant workers)	<1	<0.03
Nuclear fuel cycle	<1	<0.03
Fallout from nuclear weapons testing	<1	<0.03
Miscellaneous	<1	<0.03
<b>Total artificial</b>	<b>64</b>	<b>18</b>
<b>Total natural plus artificial</b>	<b>358</b>	<b>100</b>

*Source:* National Council on Radiation and Measurement (1990). (Washington, DC: National Academy Press).

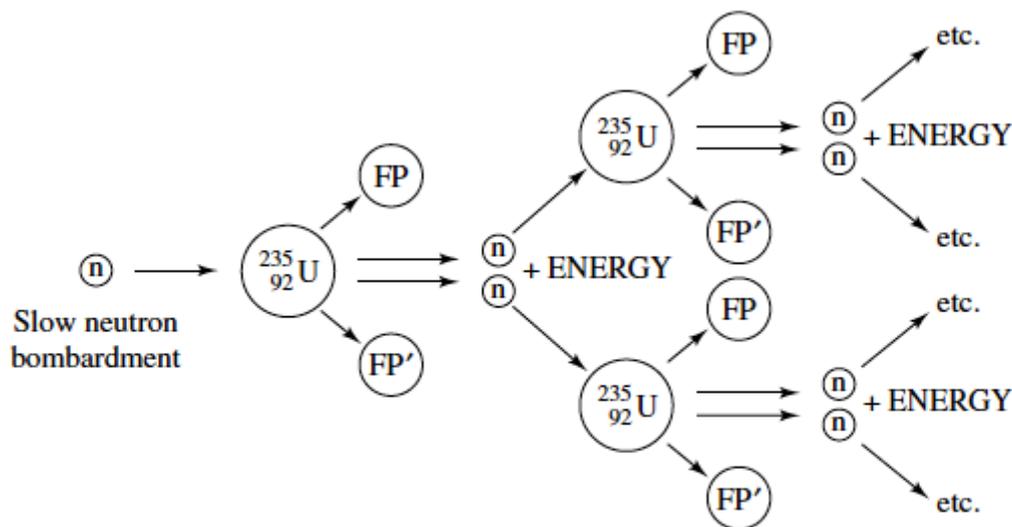


# Fissão Nuclear

*Fissão libera enorme quantidade de energia, mas é rara – induzida por nêutrons*



*Nêutrons emitidos podem gerar reação em cadeia – depende da quantidade do radioisótopo = massa crítica*



**Figure 3.4** Chain reaction induced with thermal (slow) neutrons (FP and FP' represent various fission products).



# Fissão Nuclear

*Reação nuclear sustentada = massa crítica*

*urânio-235 = 15 kg*

*plutônio-239 = 4,4 kg*

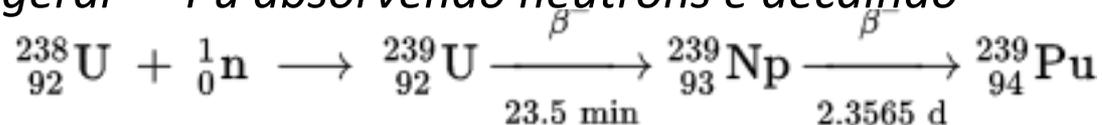
*Refletores de nêutrons podem diminuir esses valores*

*Explosão nuclear de fissão = massa supercrítica*

*Produtos de fissão são radioativos também!*

*Urânio natural:*

*$^{238}\text{U} = 99,274\%$  (meia vida  $4 \times 10^9$  anos – decaimento alfa para  $^{234}\text{Th}$ )  
pode gerar  $^{239}\text{Pu}$  absorvendo nêutrons e decaindo*



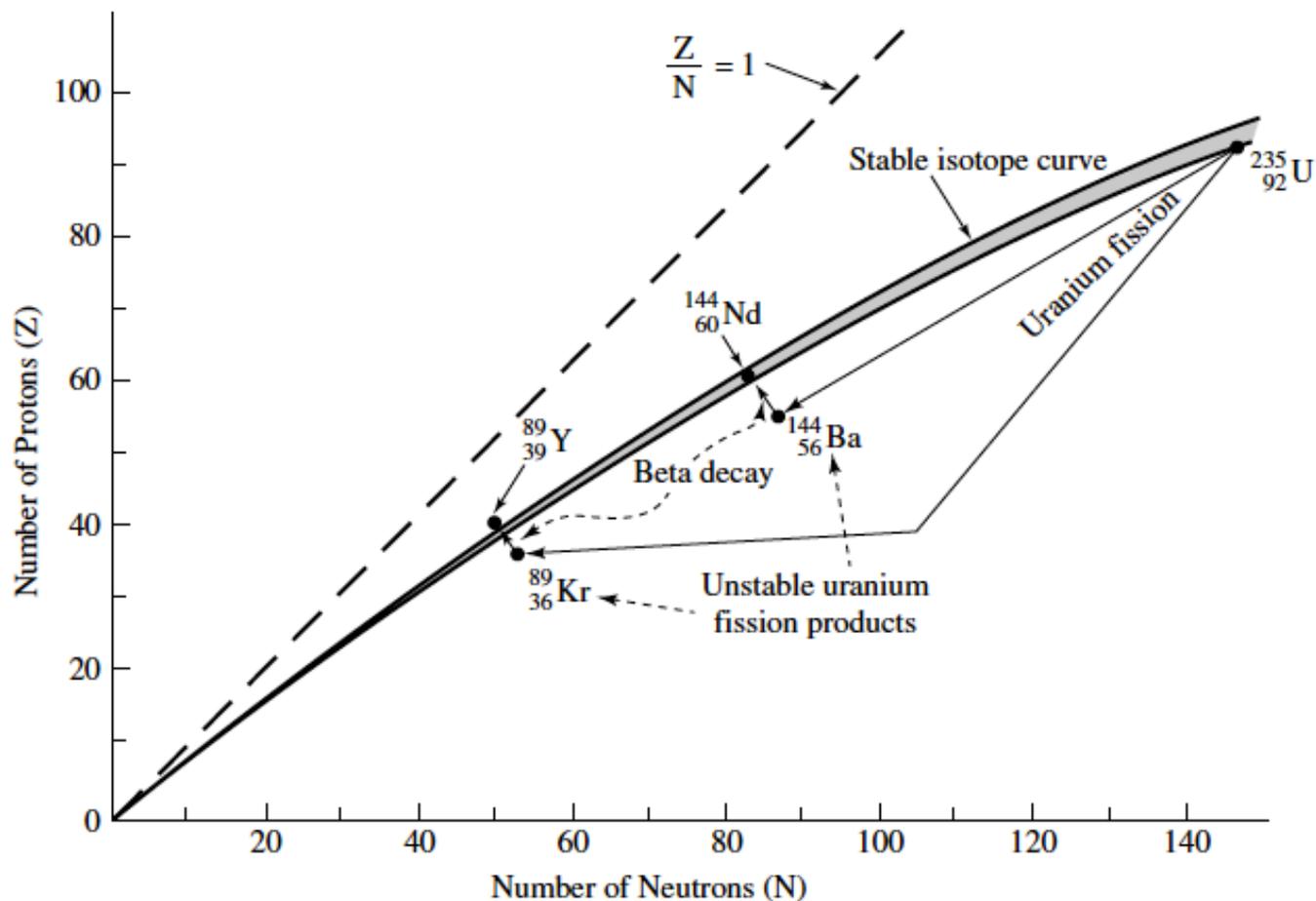
*$^{235}\text{U} = 0,720\%$  (meia vida  $7 \times 10^8$  anos – decaimento alfa para  $^{231}\text{Th}$ ) – Físsil*

*$^{234}\text{U} = 0,005\%$  (meia vida  $2 \times 10^5$  anos – decaimento alfa para  $^{230}\text{Th}$ )*



# Fissão Nuclear

*Produtos de fissão são radioativos também!*



**Figure 3.5** Proton-neutron ratio for stable isotopes formed via beta emission [beta particles ( $\beta^-$ ) are high-energy electrons emitted by the reaction:  $(^1_0\text{n}) \rightarrow \text{proton } (^1_1\text{p}^+) + \beta^-$ ].



# Reatores Nucleares

Reator de água "leve" pressurizada: usa normalmente Urânio enriquecido (3-4,5%  $^{235}\text{U}$ ) – (com  $\text{D}_2\text{O}$  pode-se empregar urânio não enriquecido)

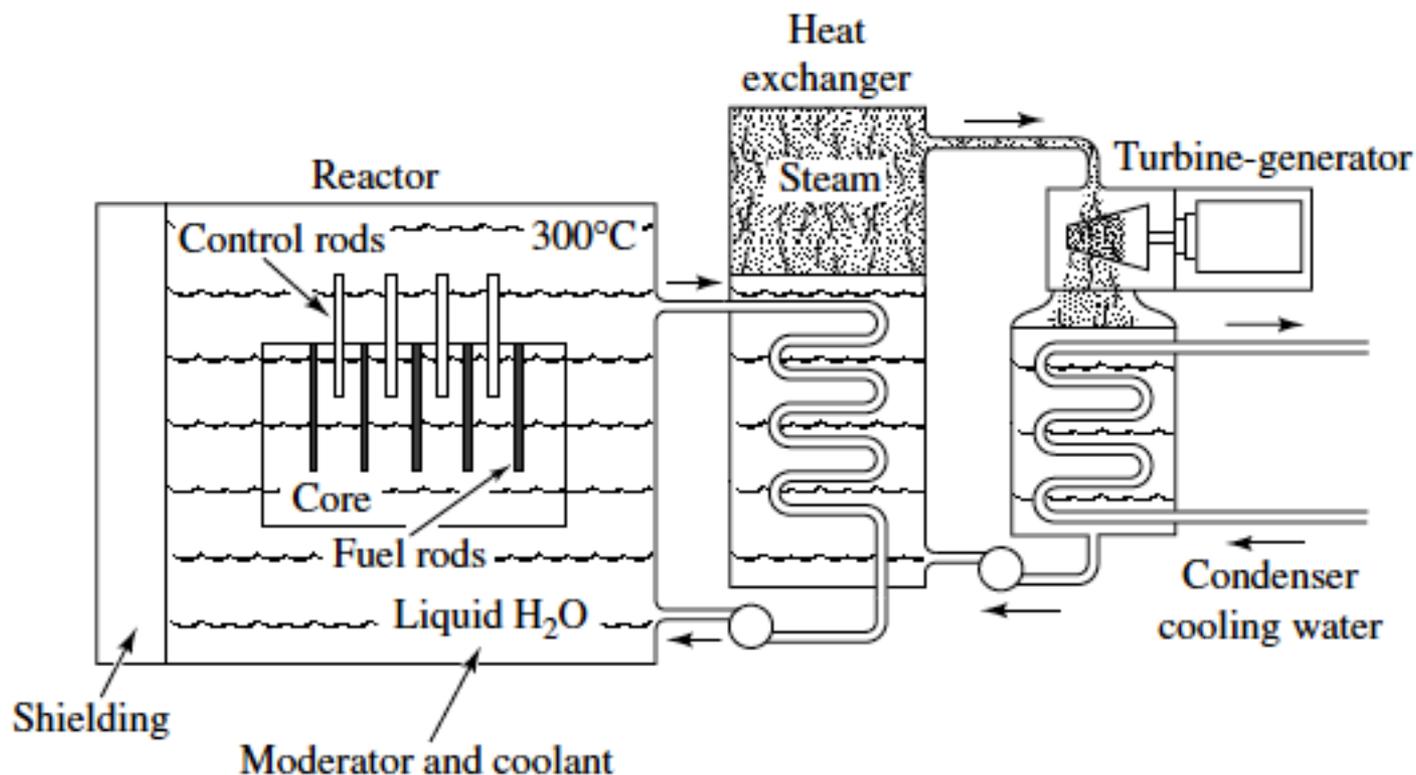


Figure 3.6 Pressurized light-water reactor.

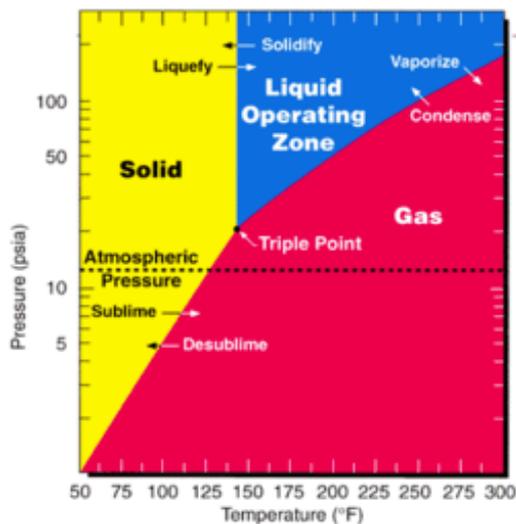


# Enriquecimento de Urânio

- *Mineração do Urânio e separação como óxido ("yellow cake")*



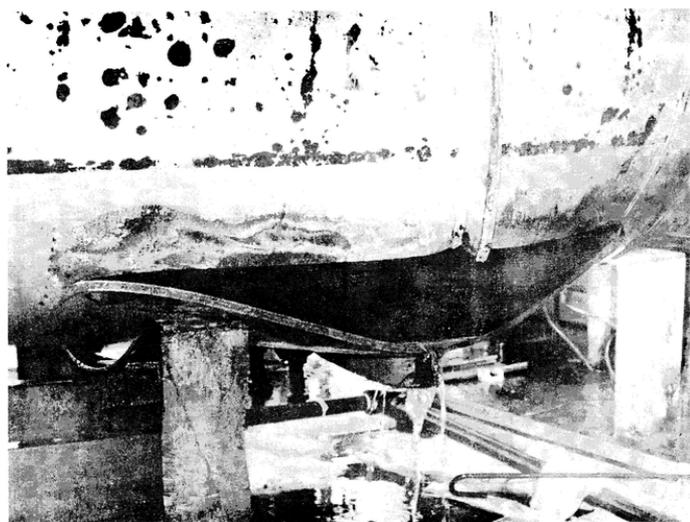
- *Conversão a  $UF_6$  ( $PE = 56,5^\circ C$  – Sublima)*





# Enriquecimento de Urânio

- *Conversão a  $UF_6$  (PE = 56,5°C – Sublima)*



- *Separação física (difusão múltiplas etapas, centrifugação múltiplas etapas, etc)*



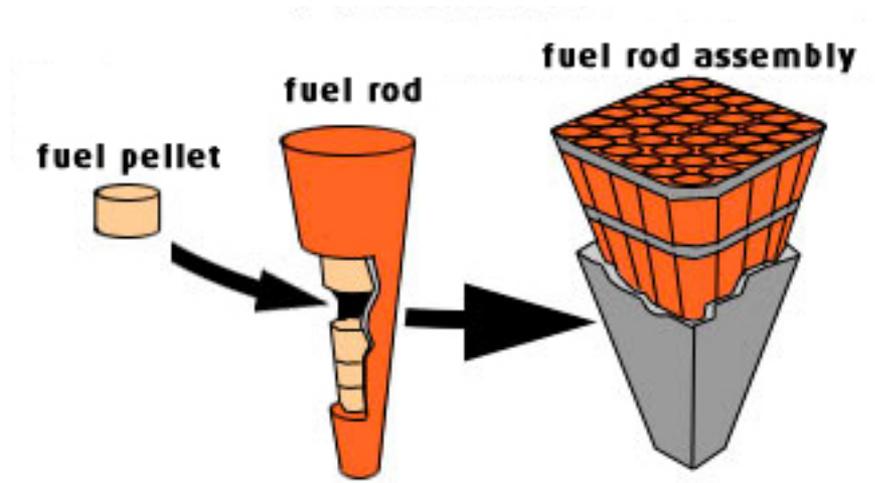
[https://en.wikipedia.org/wiki/Uranium\\_hexafluoride](https://en.wikipedia.org/wiki/Uranium_hexafluoride) e [https://en.wikipedia.org/wiki/Enriched\\_uranium](https://en.wikipedia.org/wiki/Enriched_uranium)  
[https://science.energy.gov/~media/nbl/pdf/price-lists/SDS/SDS-Uranium\\_Hexafluoride\\_UF6.pdf](https://science.energy.gov/~media/nbl/pdf/price-lists/SDS/SDS-Uranium_Hexafluoride_UF6.pdf)



# Barras de Combustível



<https://i.imgur.com/ci3GXYa.jpg>



<https://i.imgur.com/EmTT9Jn.jpg>



<http://www.neimagazine.com/uploads/newsarticle/4198959/images/451868/large/nuclear-fuel-rods.jpg>



# Reactores Nucleares

Reator "breeder" ("regenerador")

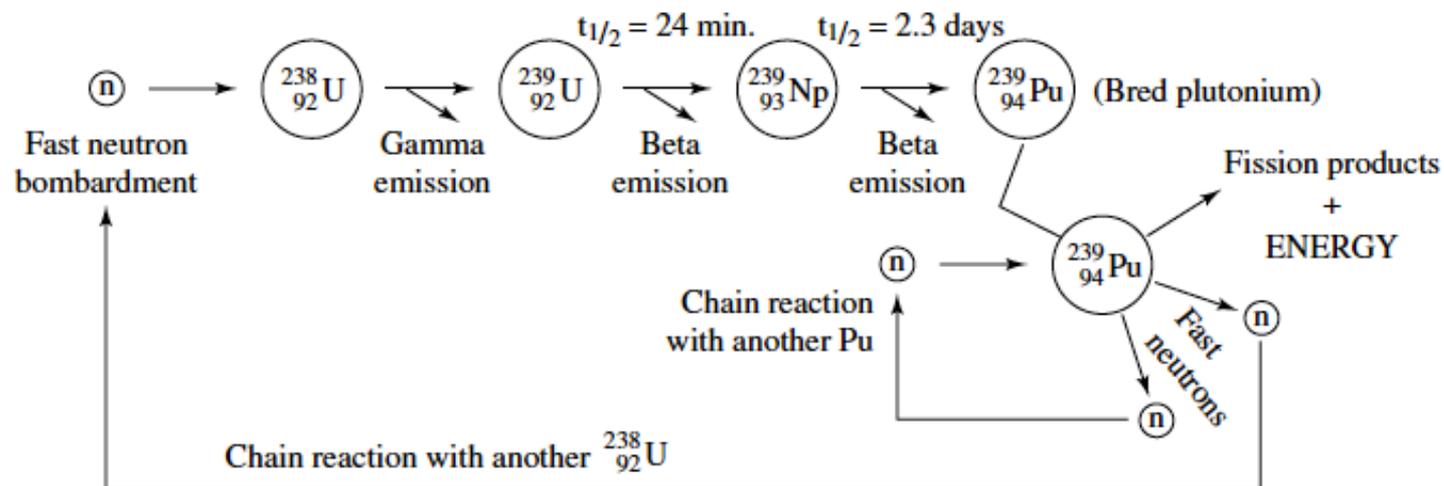


Figure 3.7 Production of Pu-239 from U-238 bombarded with fast neutrons.



# Reatores Nucleares

Reator "breeder" ("regenerador") a sódio líquido / nêutrons rápidos (vs. "térmicos")

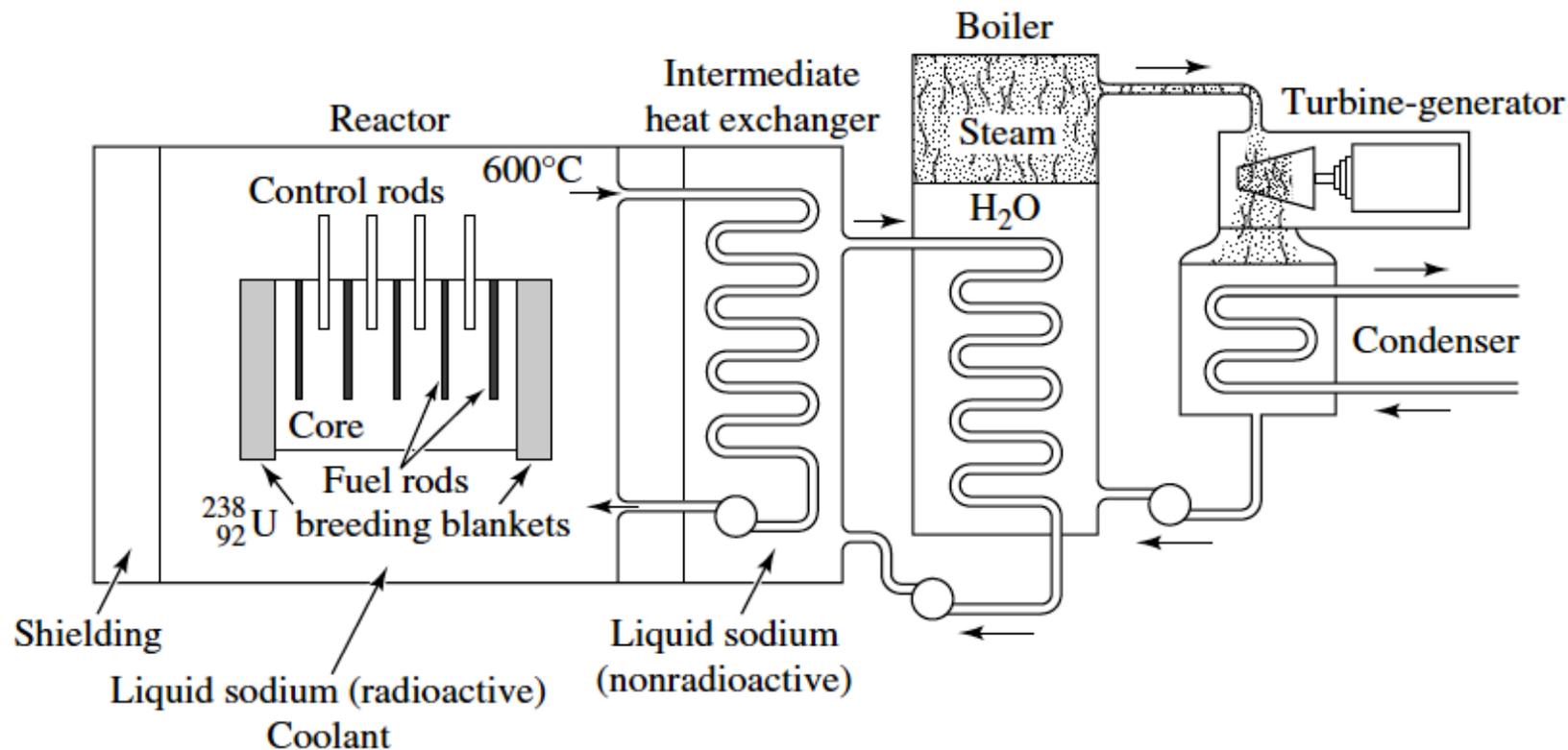
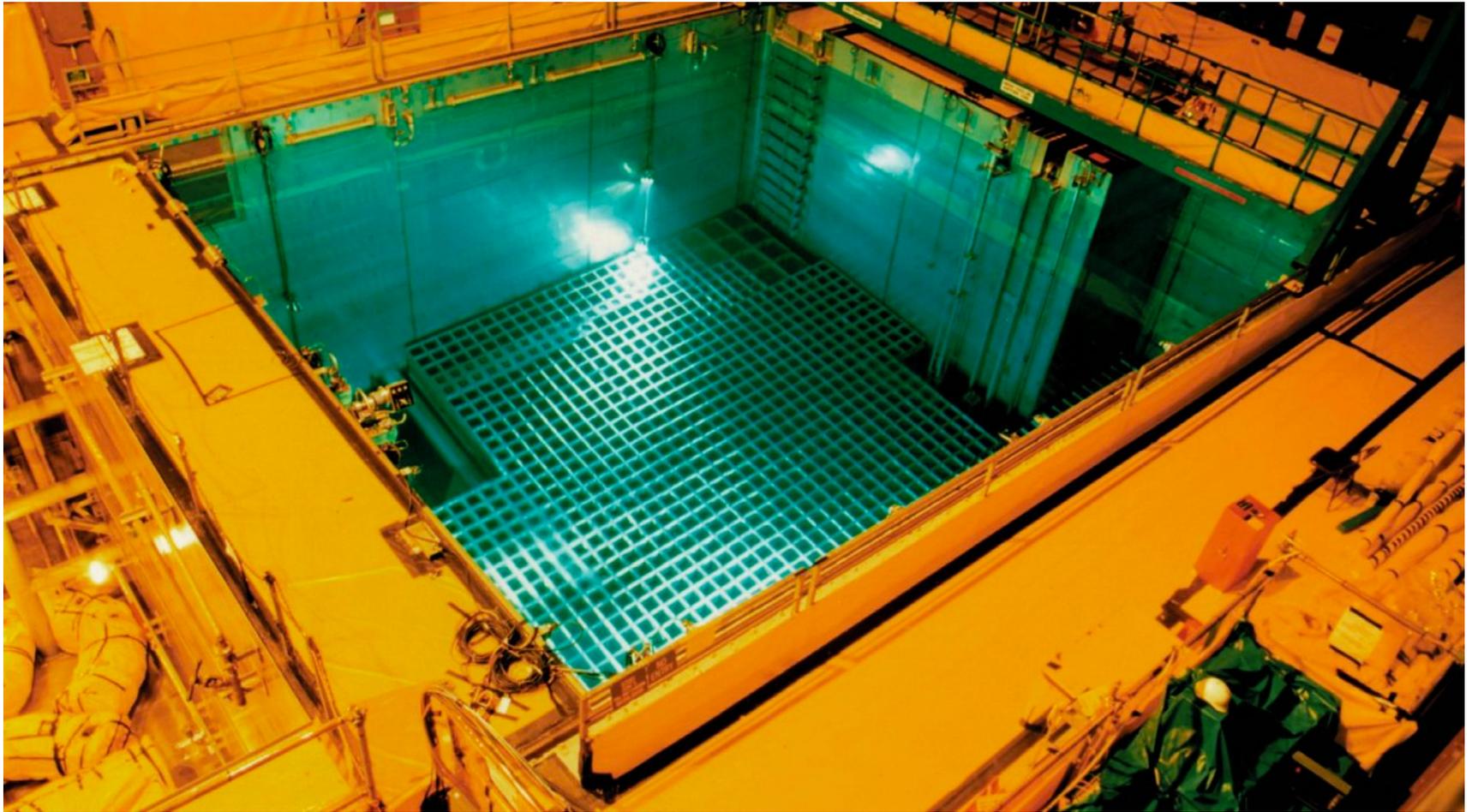


Figure 3.8 Liquid sodium breeder reactor.



# Reatores Nucleares

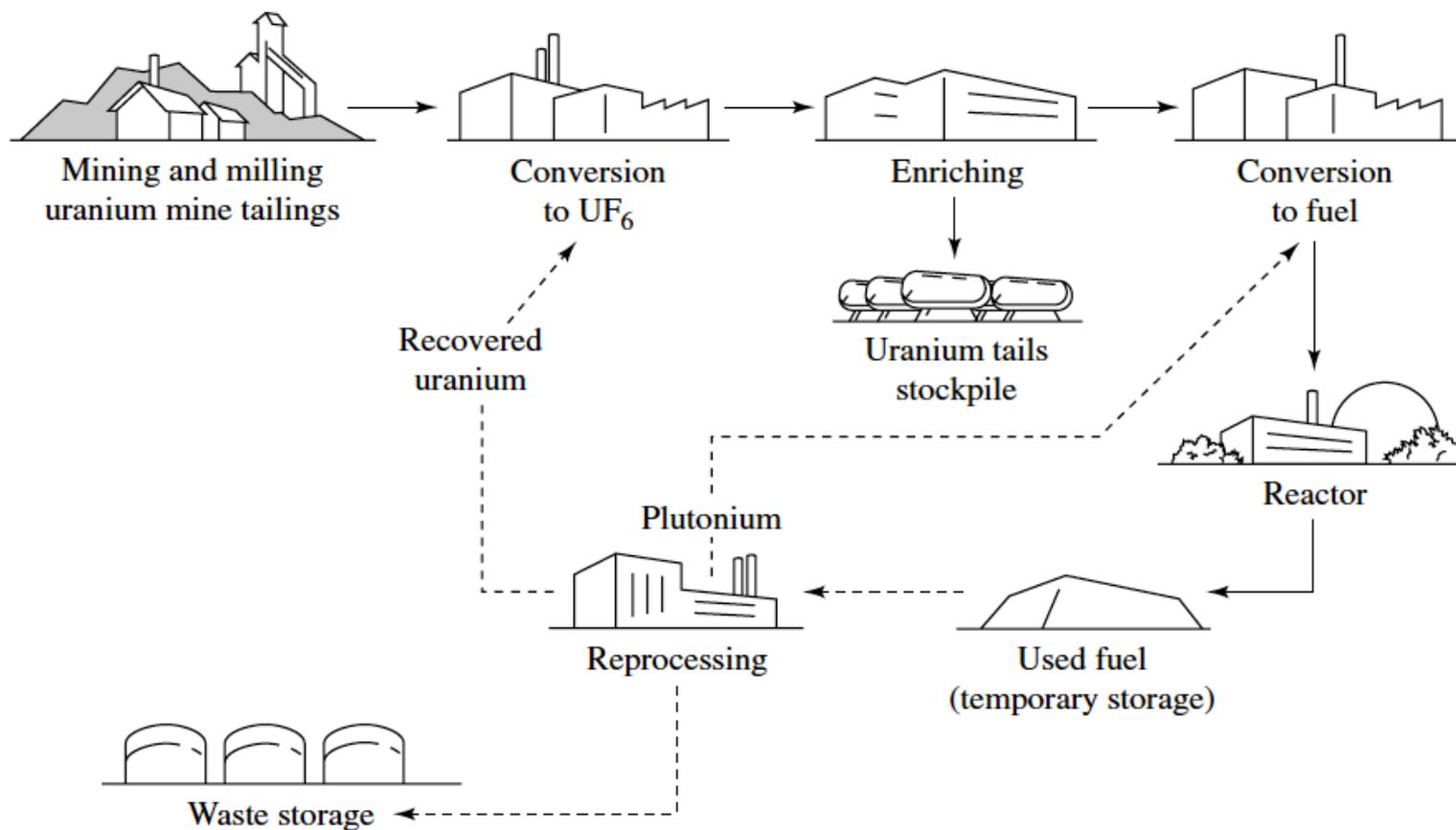
*“piscina” de combustível usado*



[http://www-sciencemag-org.ez67.periodicos.capes.gov.br/sites/default/files/styles/article\\_main\\_large/public/images/San\\_Onofre\\_spent%20fuel.jpg?itok=LCLaiTKk](http://www-sciencemag-org.ez67.periodicos.capes.gov.br/sites/default/files/styles/article_main_large/public/images/San_Onofre_spent%20fuel.jpg?itok=LCLaiTKk)

# Ciclo do Combustível

*Urânio e produtos de fissão e captura de nêutrons/decaimento*



**Figure 3.12** Fuel cycle for the light-water nuclear reactor; dashed lines are not yet part of the U.S. cycle.



# Acidentes de Criticalidade

21/08/1945 (EUA) – Mesma esfera de plutônio revestida por níquel (6,2kg) / tijolos de berílio (carbeto de tungstênio – 236 kg) – 1 morte (28 dias) + 1 exposição (foto mostra simulação com metade dos tijolos)



Figure 41. Plutonium sphere partially reflected by tungsten-carbide blocks.



# Acidentes de Criticalidade

21/05/1946 (EUA) – Mesma esfera de plutônio revestida por níquel (6,2kg) / duas hemisferas de berílio – 1 morte (9 dias) + 7 exposições



Figure 42. Configuration of beryllium reflector shells prior to the accident 21 May 1946.

# Acidentes de Criticalidade

30/09/1999 (Japão) – Solução de nitrato de uranila (enriquecido a 18,8%) = 16,8 kg em uma solução 370 g/L – 2 mortes (82 dias e 210 dias) e 1 exposição

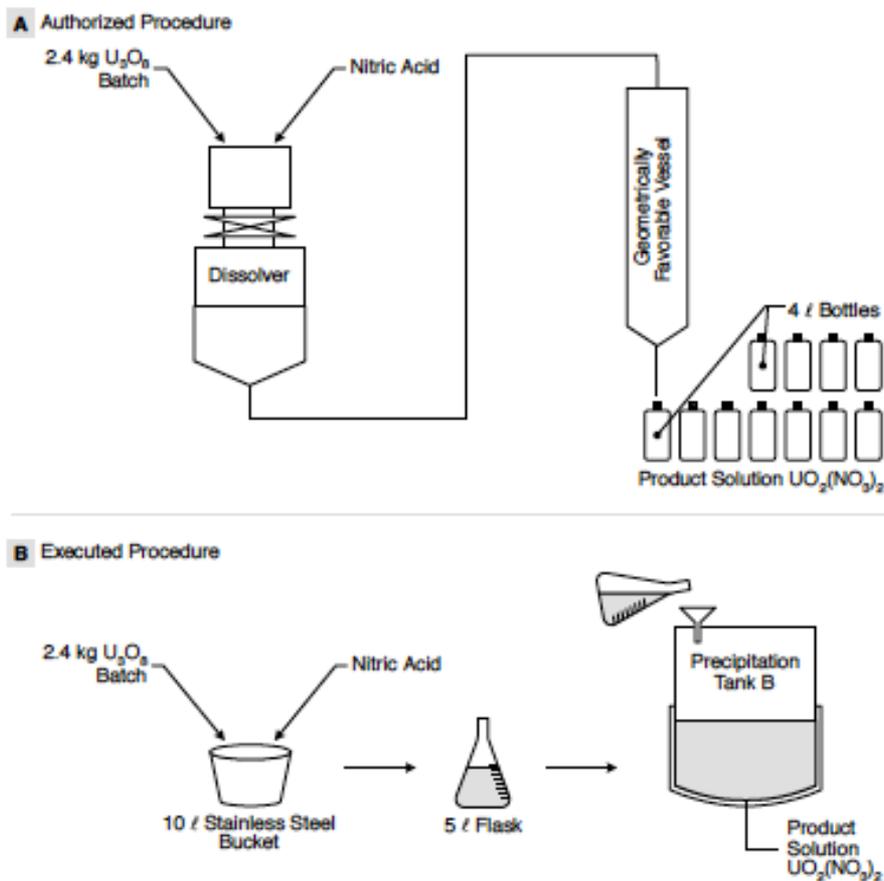
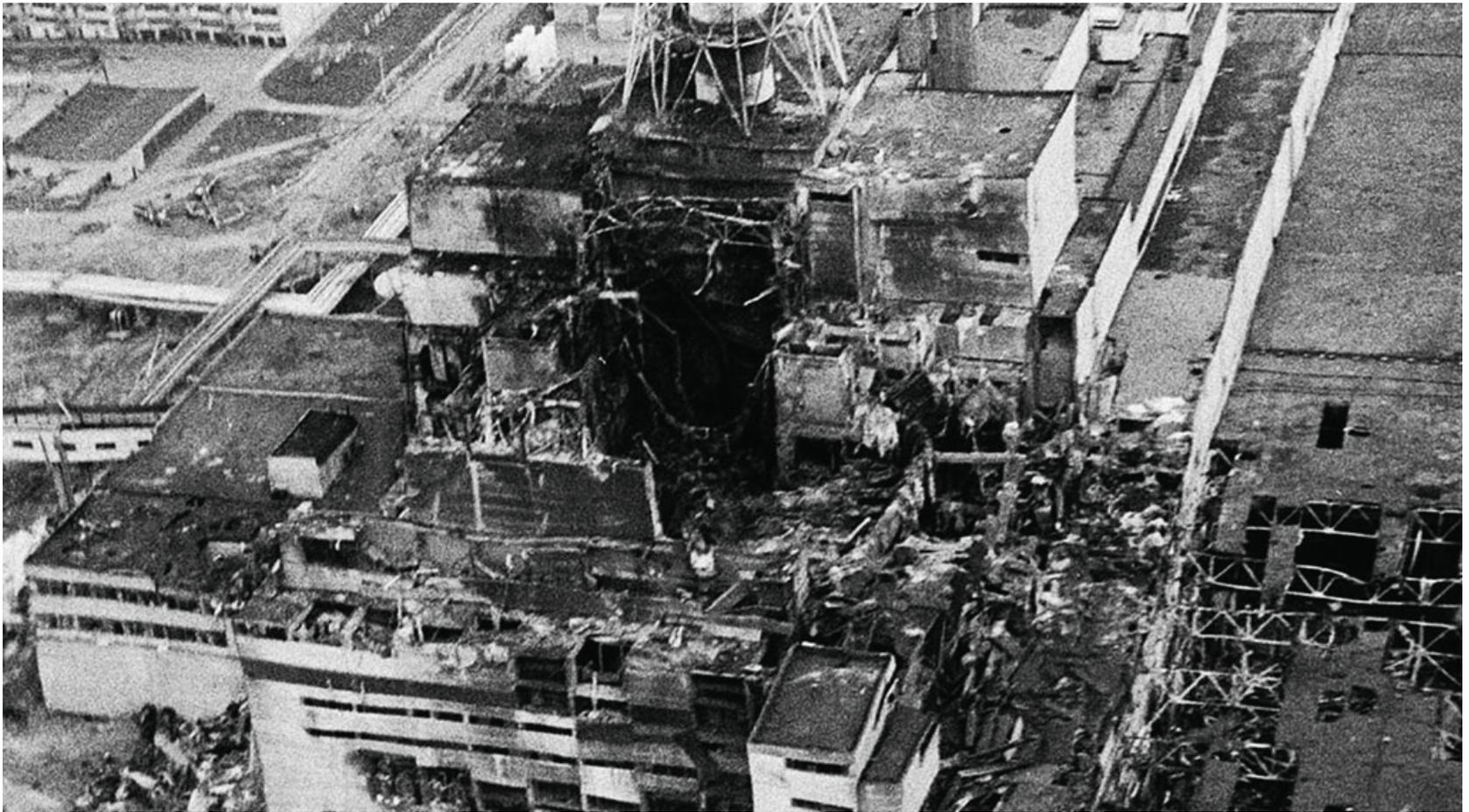


Figure 34. Authorized and executed procedures.



# Perigos da Energia Nuclear

## *Chernobyl*





## ”As crianças de Chernobyl” (1991)

<https://youtu.be/zGhphEqmrHU>



# Perigos da Energia Nuclear

## *Fukushima*



# Tritium

*Meia vida de 12,32 anos (decai para Hélio-3)*

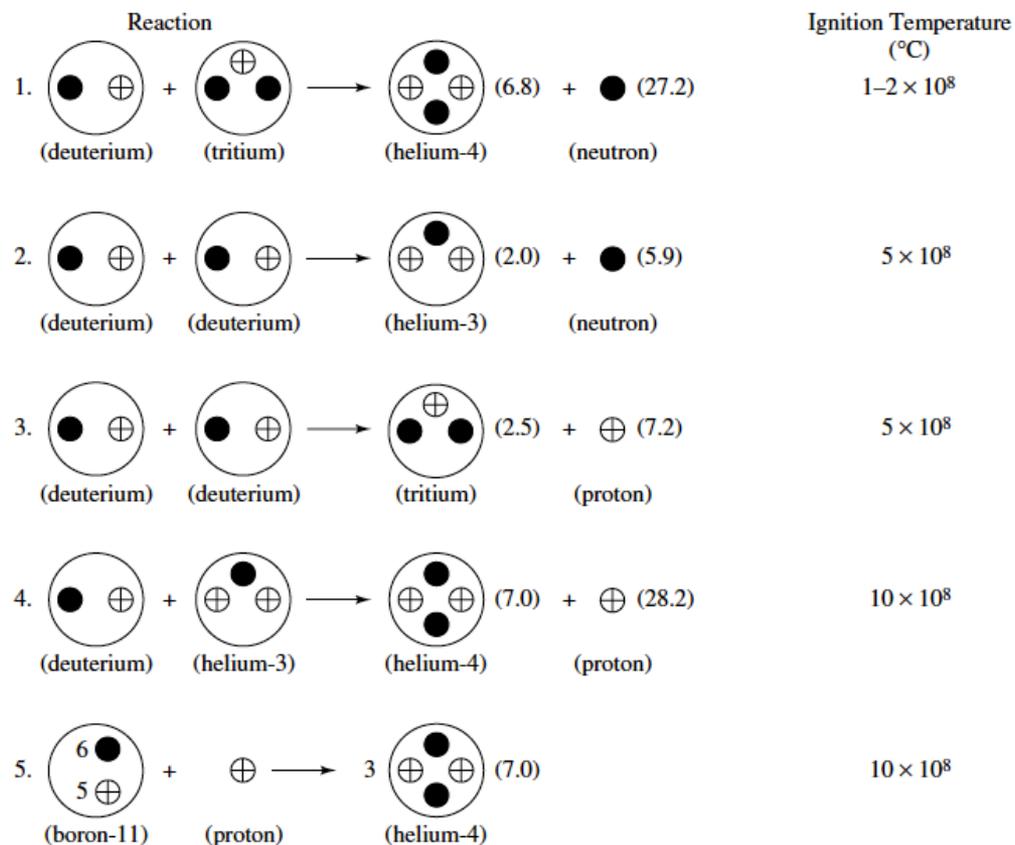
*Produção:*

*Captura de nêutrons por deutério, lítio ou boro*

*Produto de fissão mais raro de U-235, Pu-239, etc*



# Fusão Nuclear



### Breeding of Tritium from Lithium

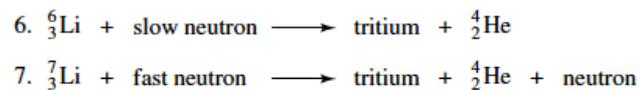


Figure 3.13 Energy producing fusion reactions (numbers in parentheses are the energies of the product particles, in units of 10<sup>7</sup> kJ, obtained from fusion of one gram of reactants).



# Fusão Nuclear

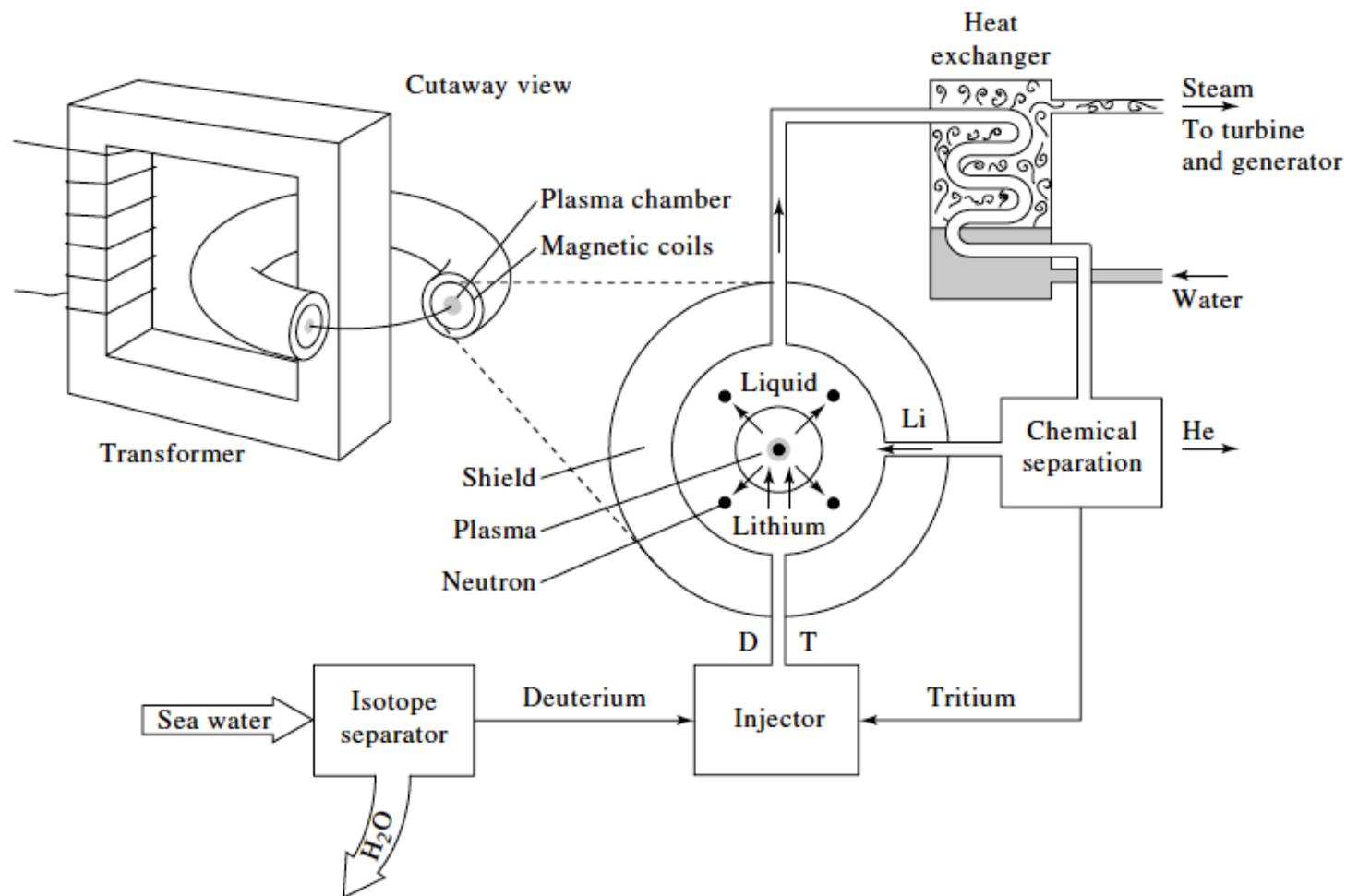
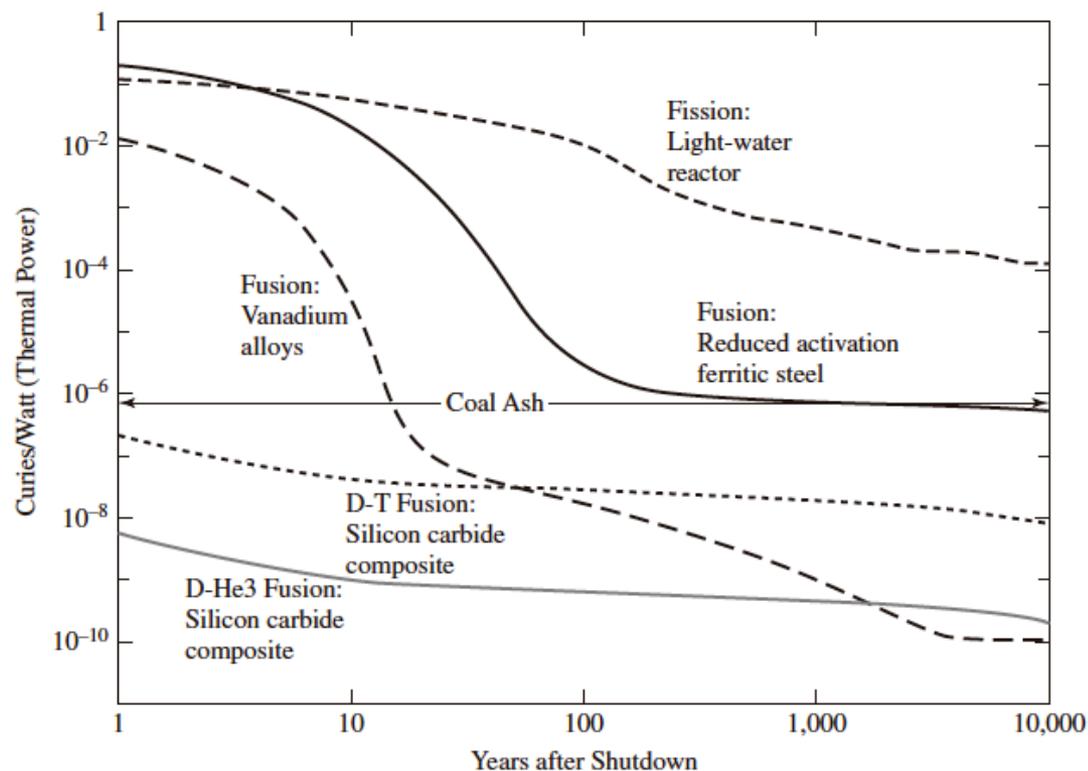


Figure 3.15 Tokamak magnetic-containment fusion using D-T fuel. Source: G. Gordon and W. Zoller (1975). *Chemistry in Modern Perspective* (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley).



# Fusão Nuclear



**Figure 3.14** In a fusion power plant, the materials comprising the vacuum chamber and other components facing the plasma will become radioactive as a result of the energetic neutrons produced in fusion reactions within the plasma. The decrease in radioactivity with time after shutdown is shown for a number of candidate materials for plasma-facing components. The residual radioactivity in these materials is compared with that found in a light-water reactor fission power plant, and with the level of radioactivity released by a typical coal-fired power plant. *Source:* Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton, New Jersey.