



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

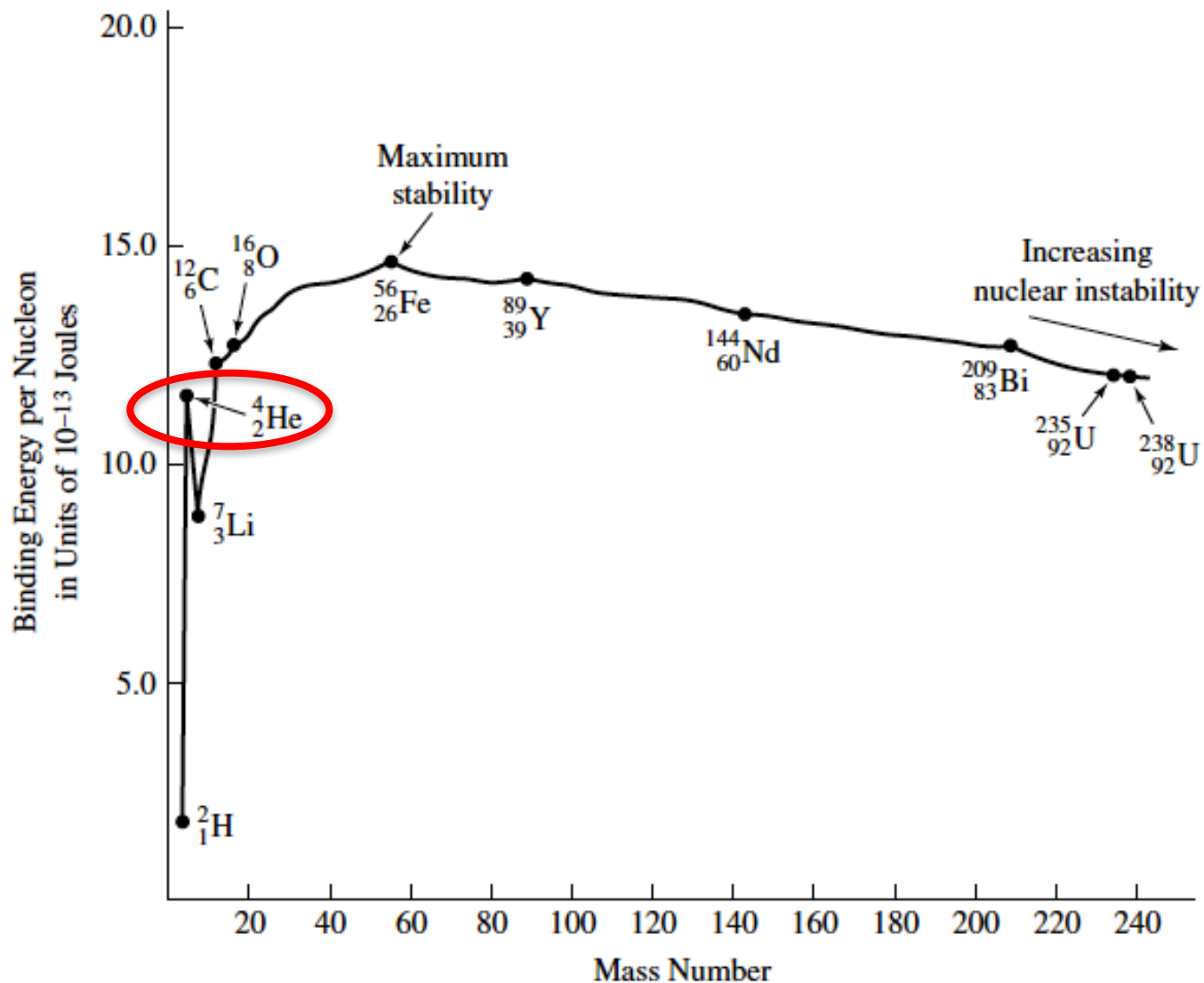





Figure 3.1 Nuclear binding energy curve.

Partículas Atômicas/Subatômicas

TABLE 3.1 SIMPLE ATOMIC PARTICLES

Type	Schematic representation	Charge	Mass*	Chemical symbol [†]
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 $1 \text{ amu} = 1.6606 \times 10^{-24} \text{ g}$.

[†]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

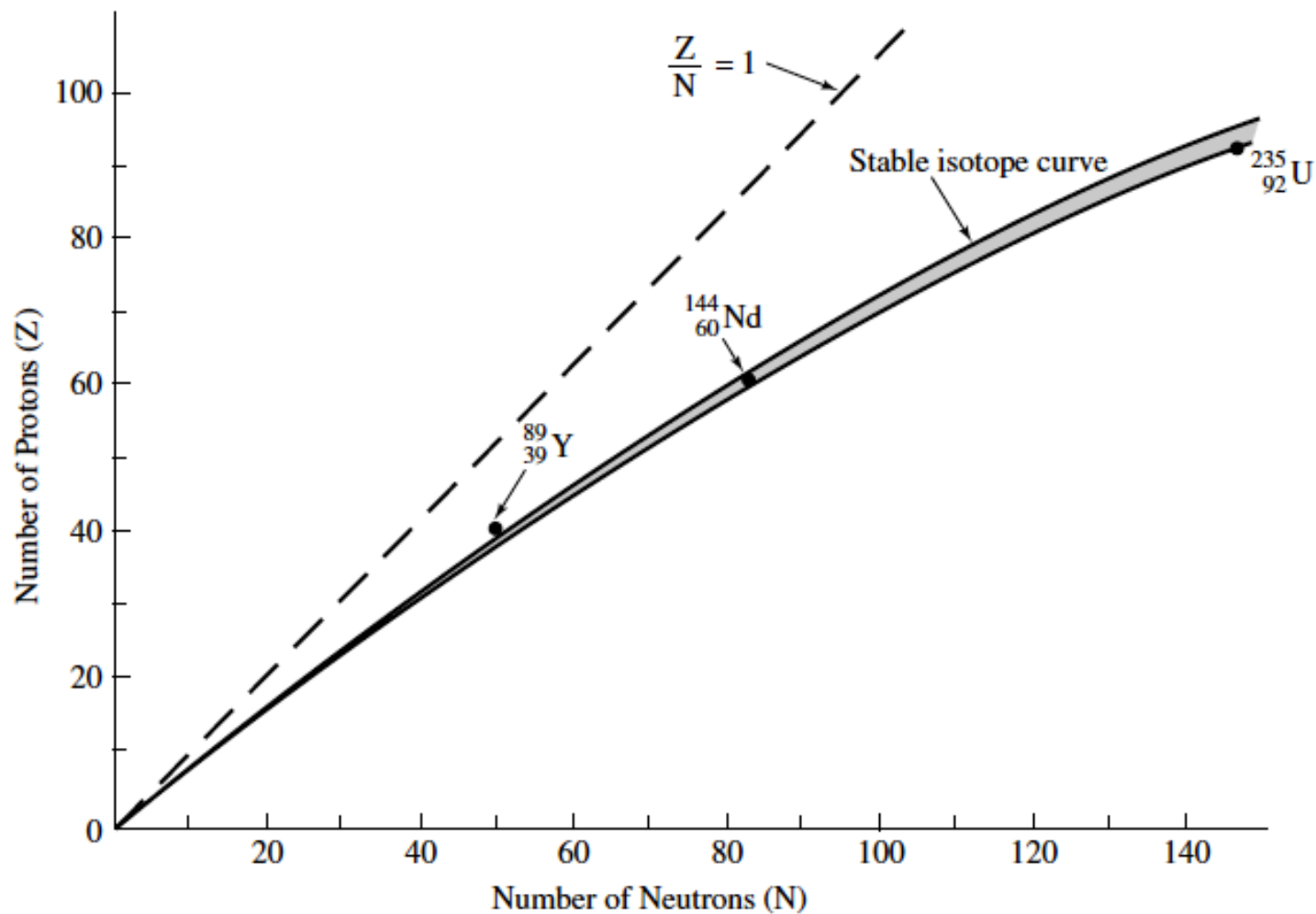
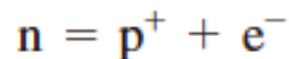


Figure 3.2 The proton-neutron stability curve.

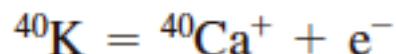


Decaimento Beta (β)

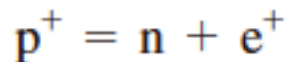
- *Excesso de nêutrons = conversão de nêutron em próton e ejeção de elétron ("raios beta");*



- *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)*

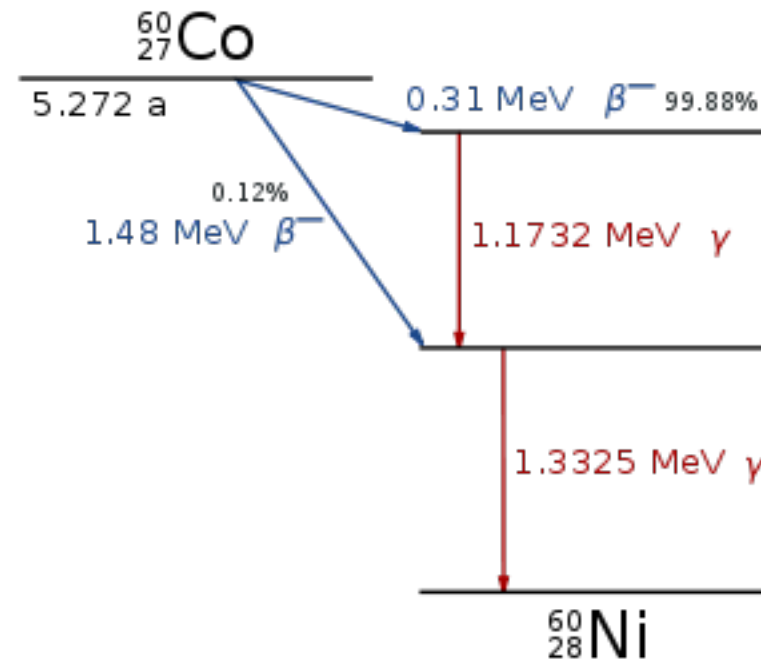


Decaimento Alfa (α)

- *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)*

Decaimento Gama (γ)

- *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}U	4.5×10^9
^{235}U	7.0×10^8
^{232}Th	1.4×10^{10}
^{87}Rb	4.9×10^{10}
^{40}K	1.3×10^9

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



Seqüência de Decaimentos

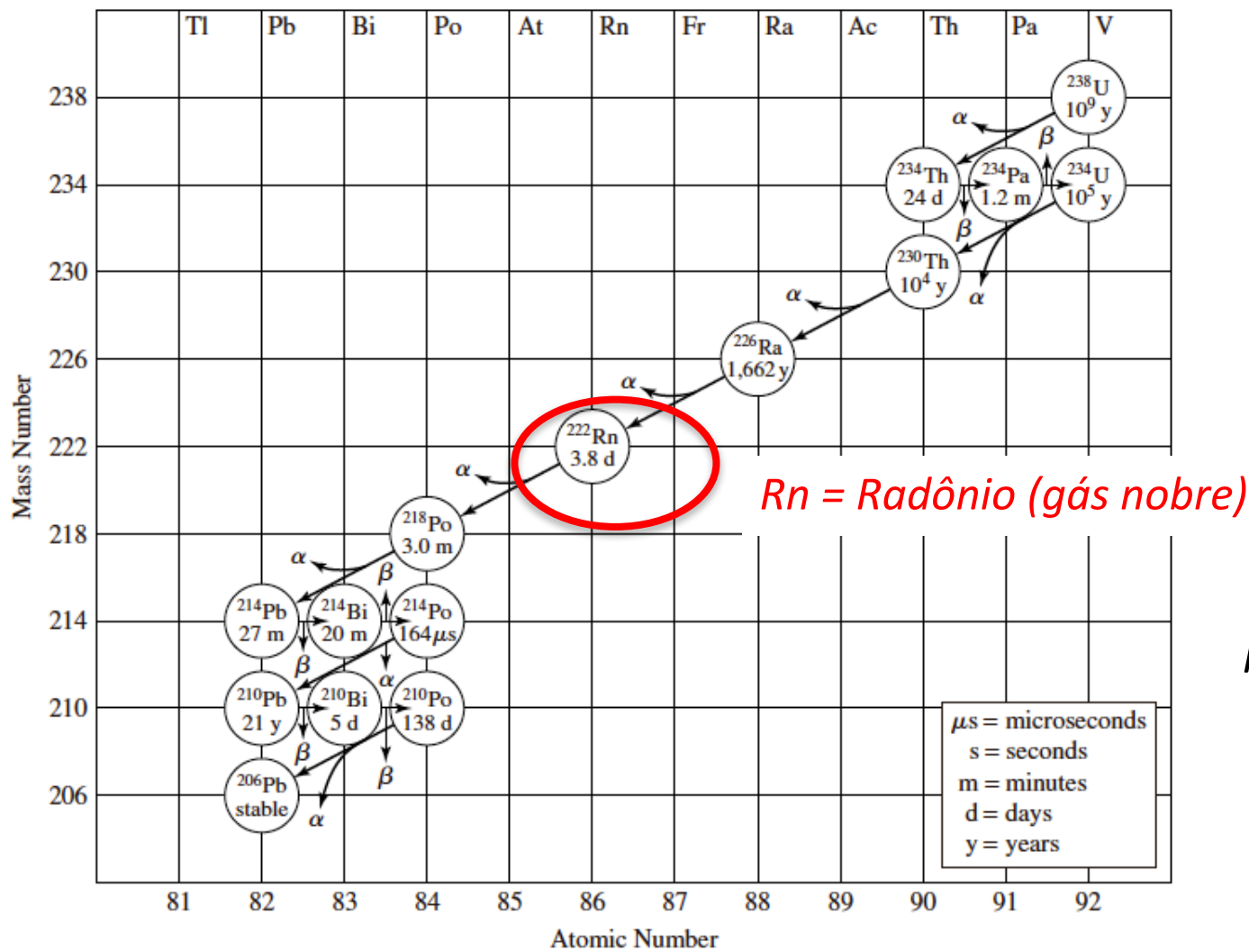


Figure 3.3 Uranium-238 decay chain through lead-206. The half-lives of isotopes are given in the circles.



Efeitos da radiação

Radiação α , β ou γ 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

<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 [†]
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.

[†]Accounts for the fact that cell damage increases as the density of the damage sites increases.



Radiação Alfa (α)

- *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 (β)

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



Radiação Gama (γ)

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



Efeitos da radiação

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 cm³ 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

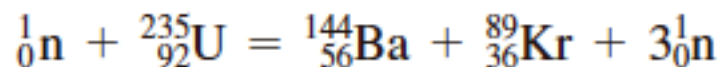
Source of radiation	Dose (mrem)	Percent of total dose
Natural		
Radon gas	200	55
Cosmic rays	27	8
Terrestrial (radiation from rocks and soil other than radon)	28	8
Inside the body (naturally occurring radioisotopes in food and water)	39	11
Total natural	294	82
Artificial		
Medical		
X-rays	39	11
Nuclear medicine	14	4
Consumer products (building materials, water)	10	3
Other		
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
Total artificial	64	18
Total natural plus artificial	358	100

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

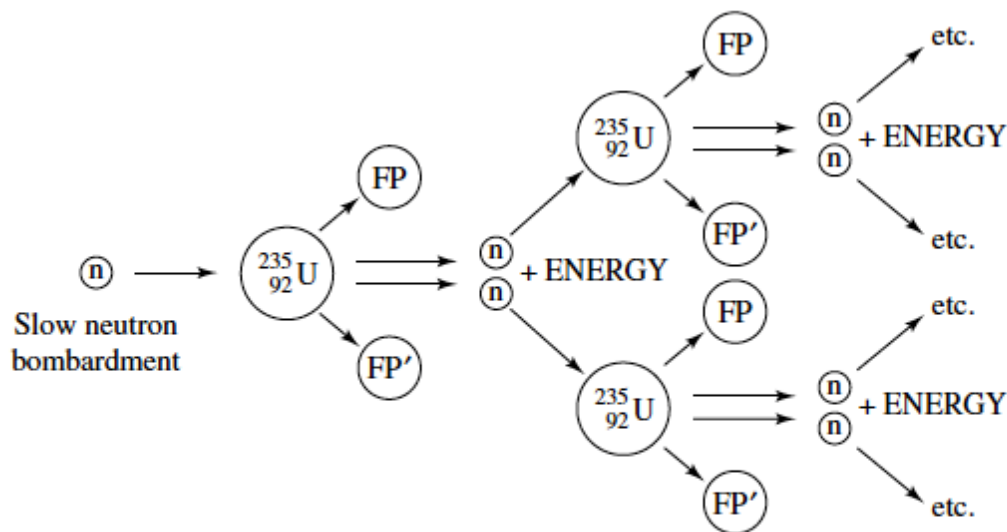


Figure 3.4 Chain reaction induced with thermal (slow) neutrons (FP and FP' represent various fission products).



Fissão Nuclear

Reação nuclear sustentada = massa crítica

urânio-235 = 15 kg

plutônio-239 = 4,4 kg

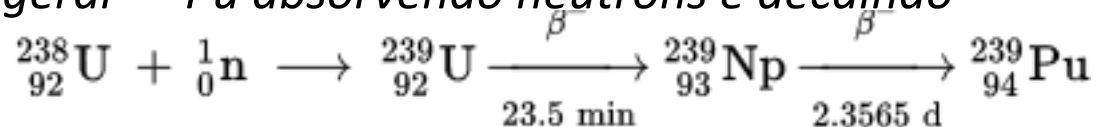
Refletores de nêutrons podem diminuir esses valores

Explosão nuclear de fissão = massa supercrítica

Produtos de fissão são radioativos também!

Urânio natural:

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



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

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



Fissão Nuclear

Produtos de fissão são radioativos também!

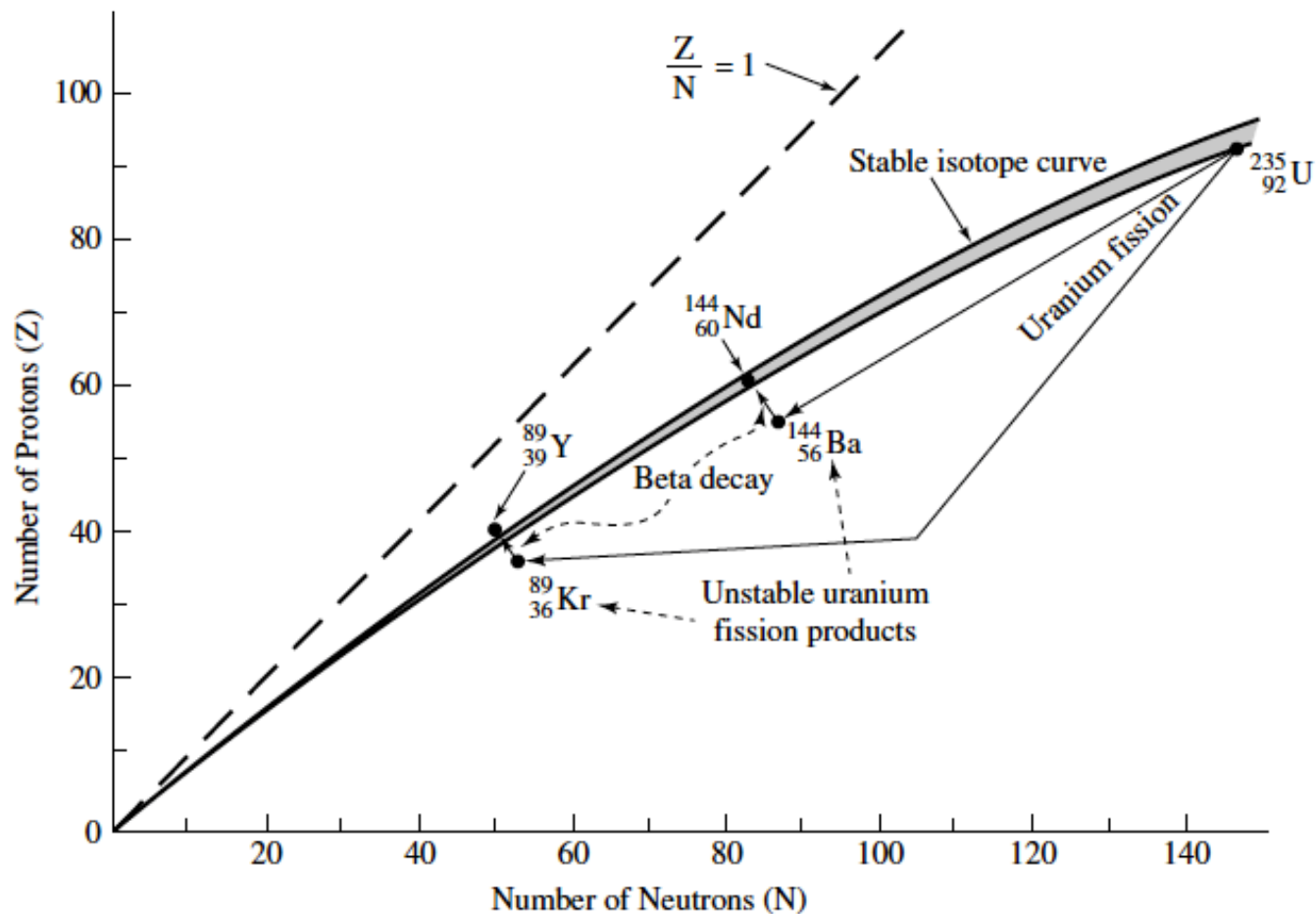


Figure 3.5 Proton-neutron ratio for stable isotopes formed via beta emission [beta particles (β^-) are high-energy electrons emitted by the reaction: $(^1_0\text{n}) \rightarrow \text{proton } (^1_1\text{p}^+) + \beta^-$].



Reatores Nucleares

Reator de água "leve" pressurizada: usa normalmente Urânio enriquecido (3-4,5% ^{235}U) – (com D_2O pode-se empregar urânio não enriquecido)

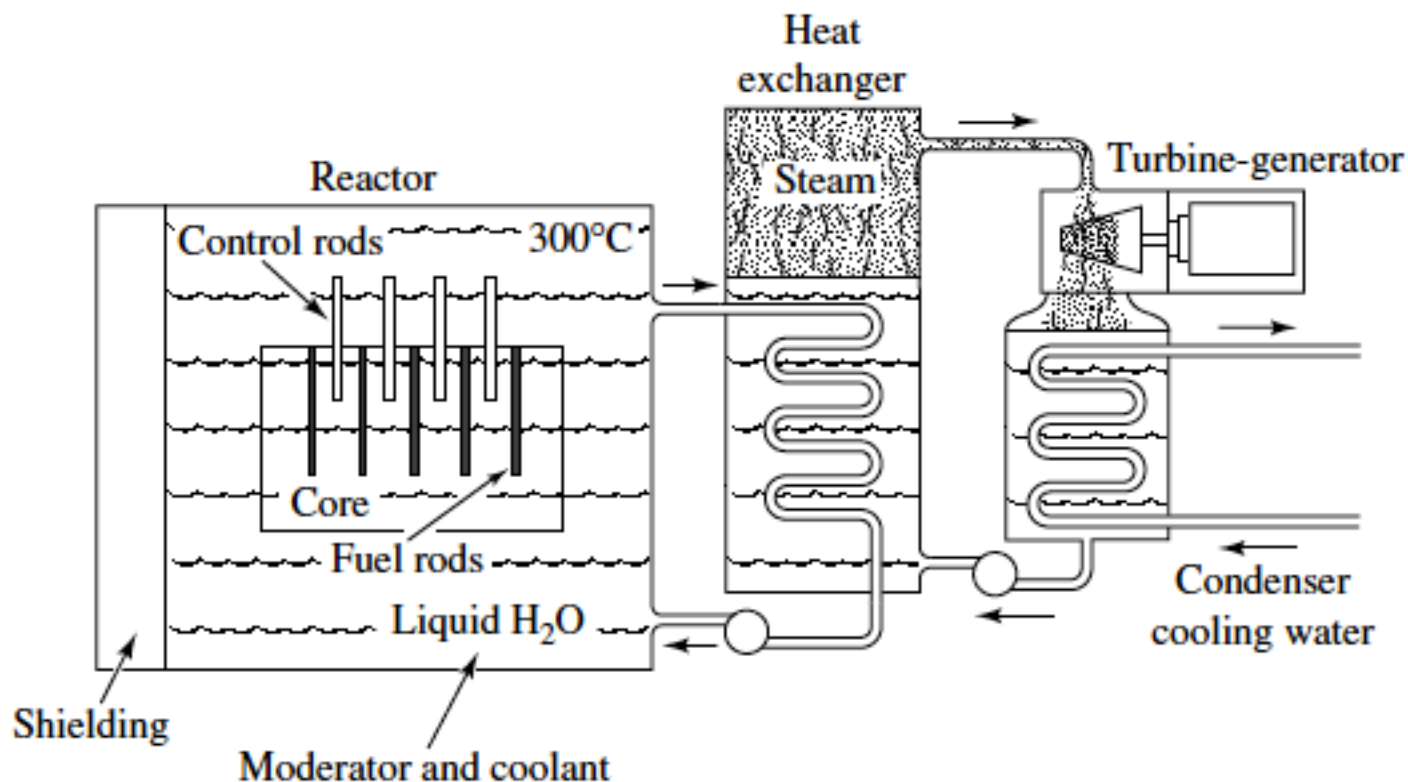


Figure 3.6 Pressurized light-water reactor.

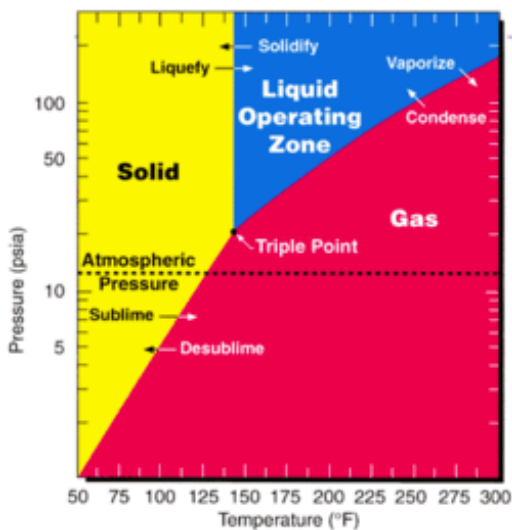


Enriquecimento de Urânio

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



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

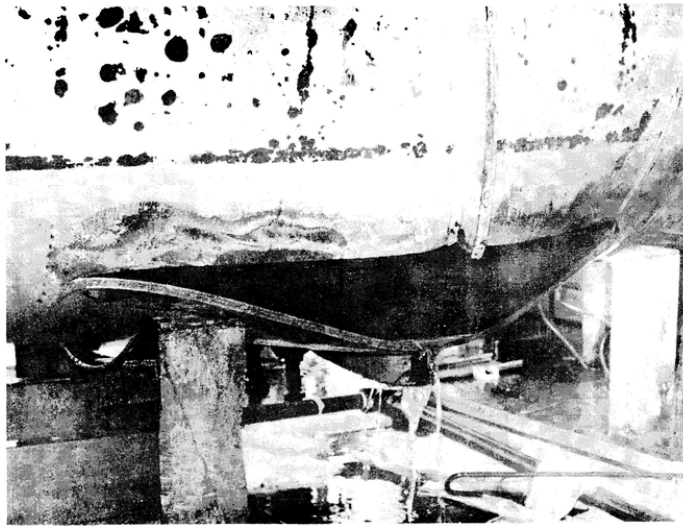


https://en.wikipedia.org/wiki/Uranium_hexafluoride https://en.wikipedia.org/wiki/Enriched_uranium

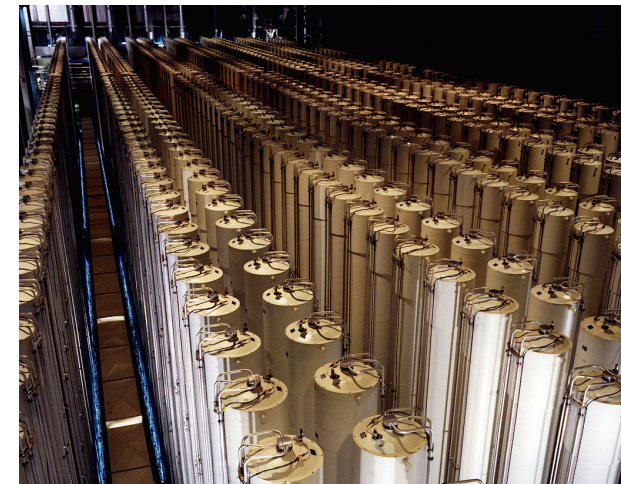


Enriquecimento de Urânio

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



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



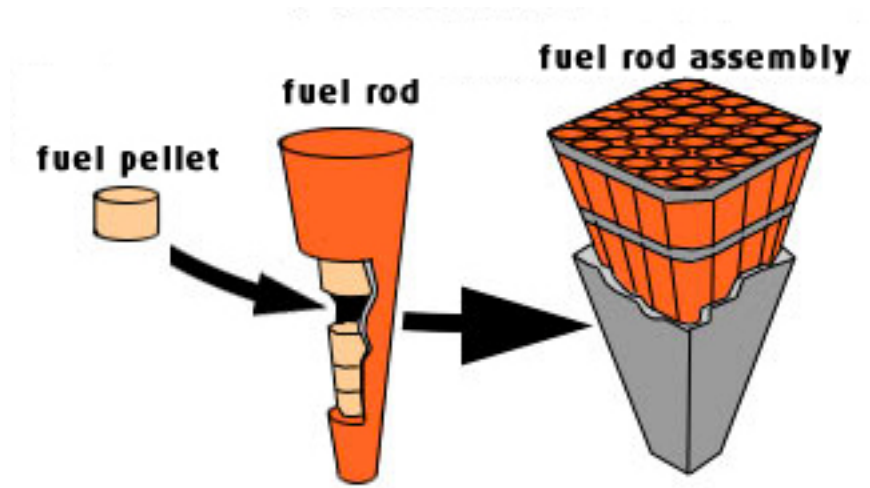
https://en.wikipedia.org/wiki/Uranium_hexafluoride e https://en.wikipedia.org/wiki/Enriched_uranium
https://science.energy.gov/~media/nbl/pdf/price-lists/SDS/SDS-Uranium_Hexafluoride_UF6.pdf



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")

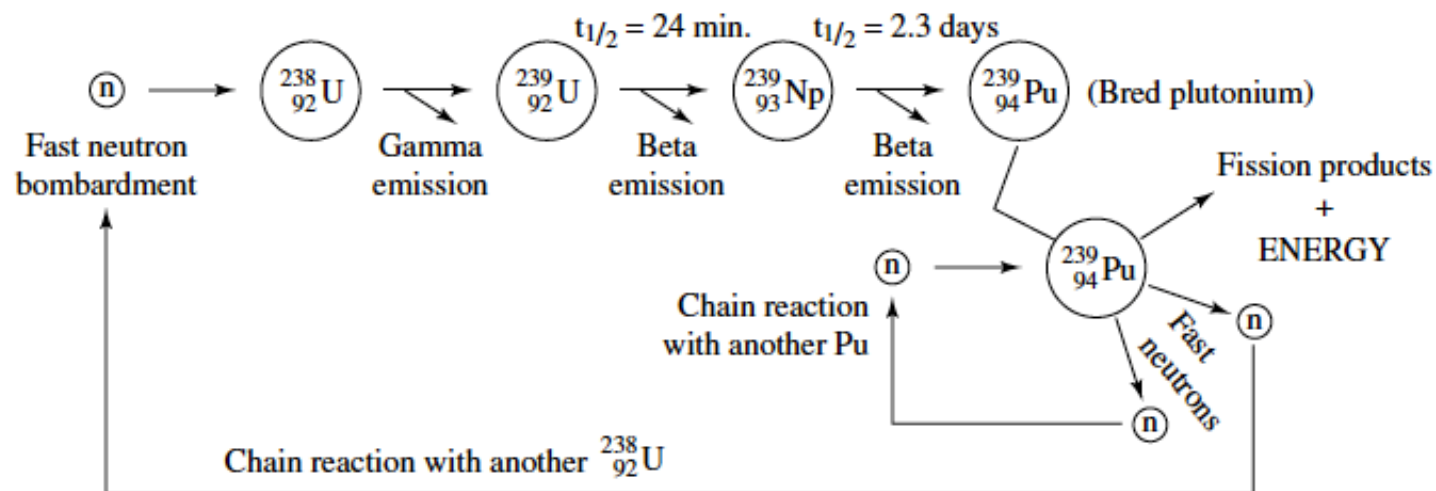


Figure 3.7 Production of Pu-239 from U-238 bombarded with fast neutrons.



Reatores Nucleares

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

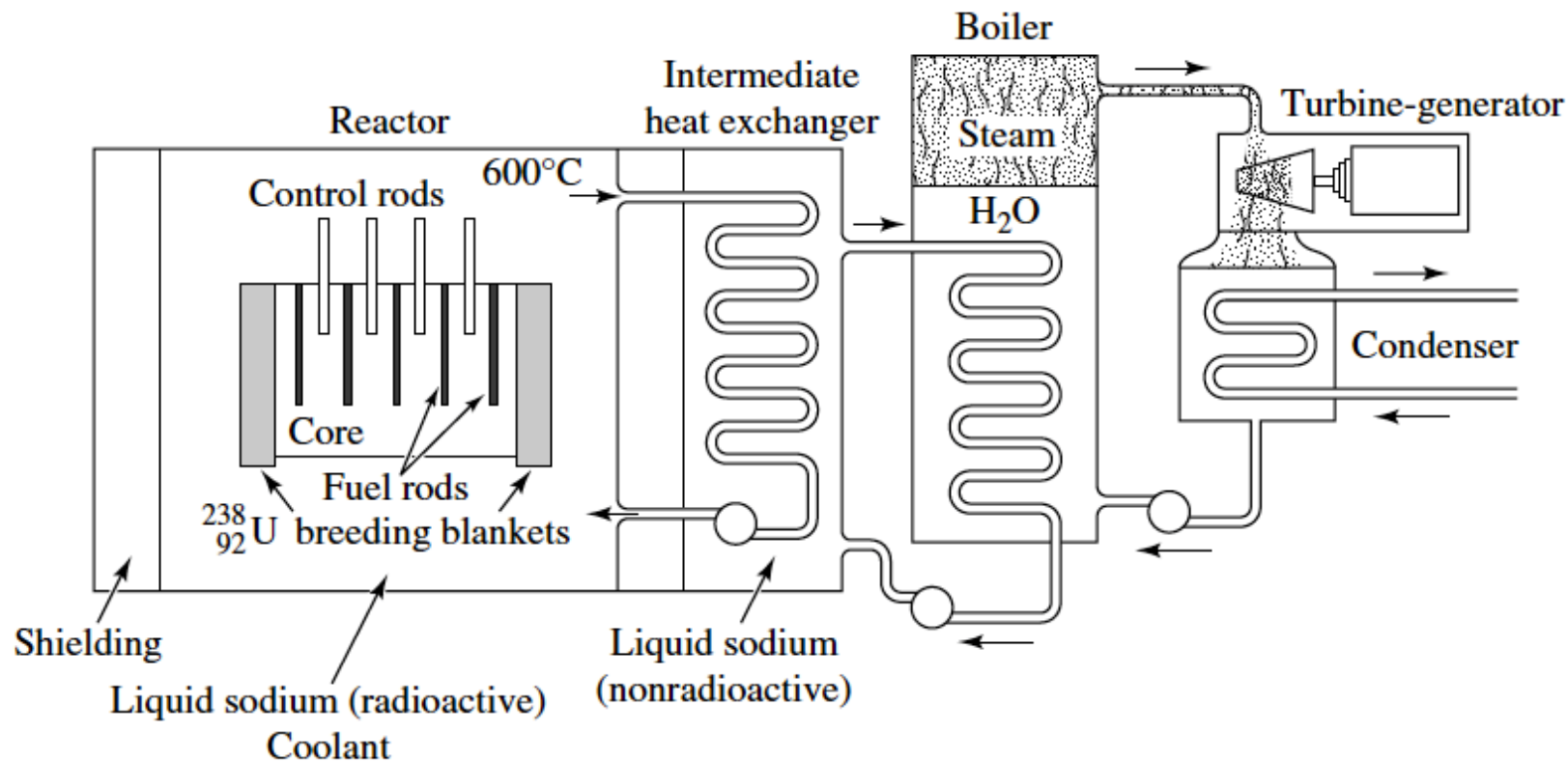
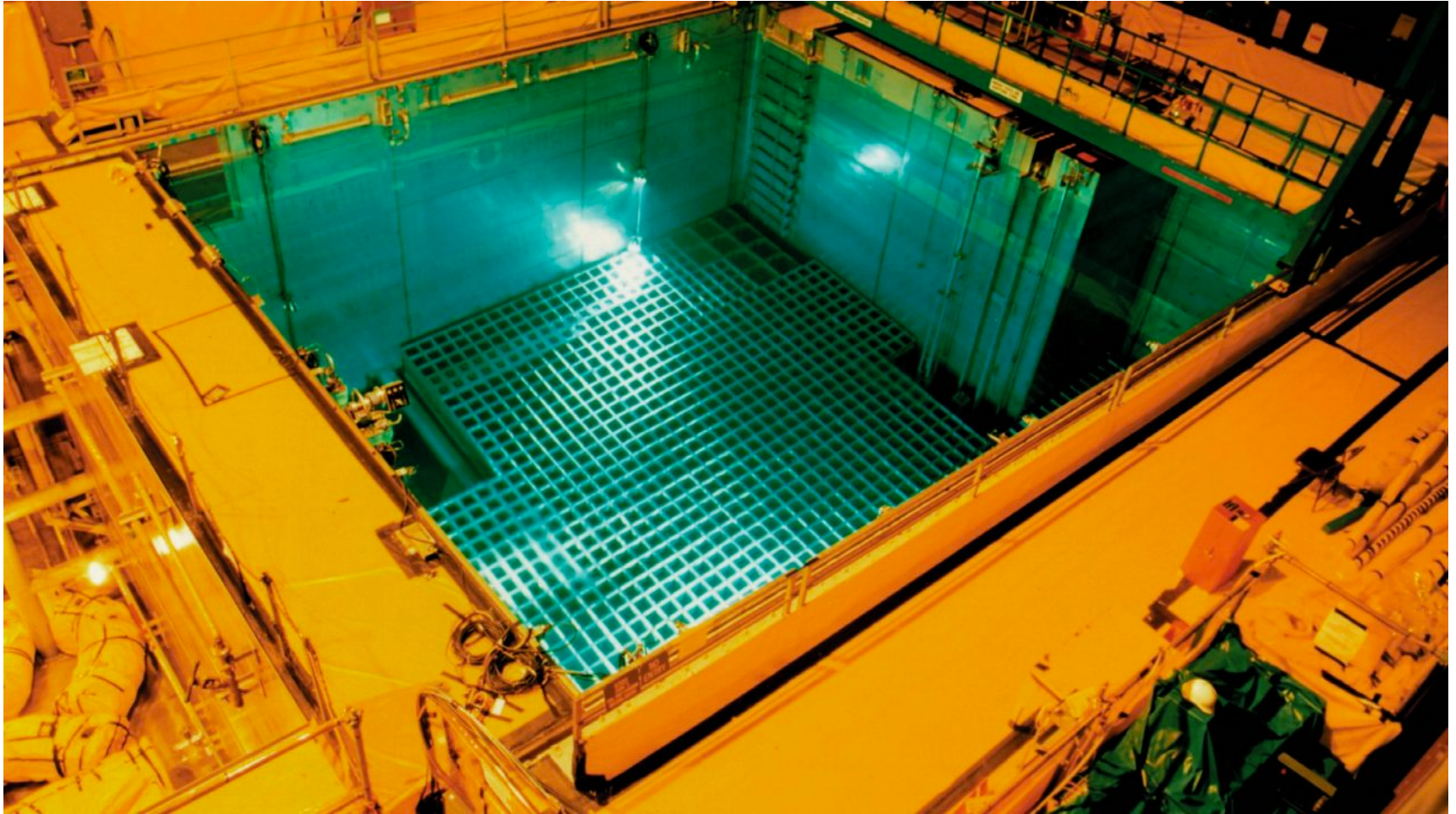


Figure 3.8 Liquid sodium breeder reactor.



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=LCLAI TKk

Ciclo do Combustível

Urânio e produtos de fissão e captura de nêutrons/decaimento

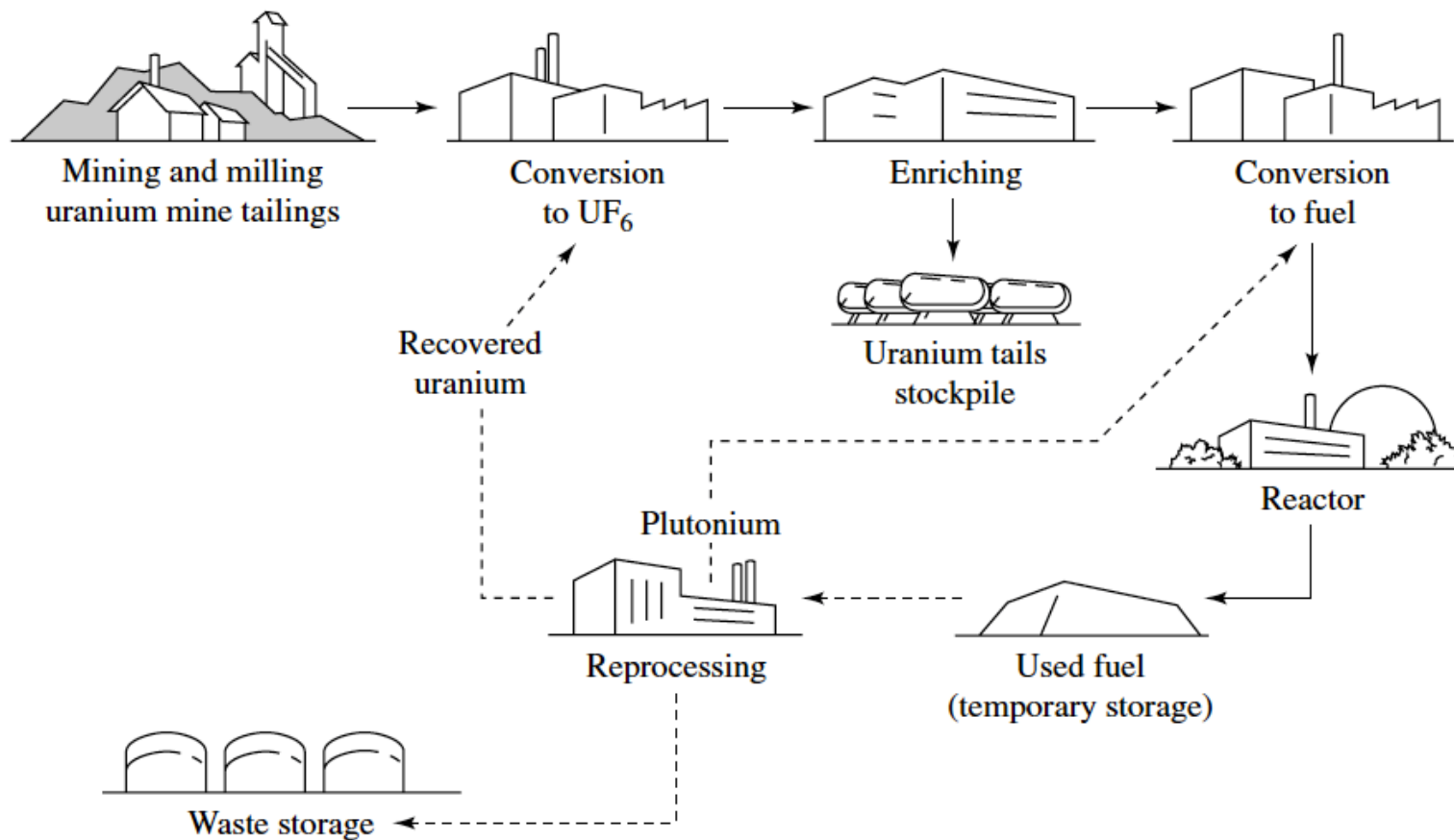


Figure 3.12 Fuel cycle for the light-water nuclear reactor; dashed lines are not yet part of the U.S. cycle.



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)

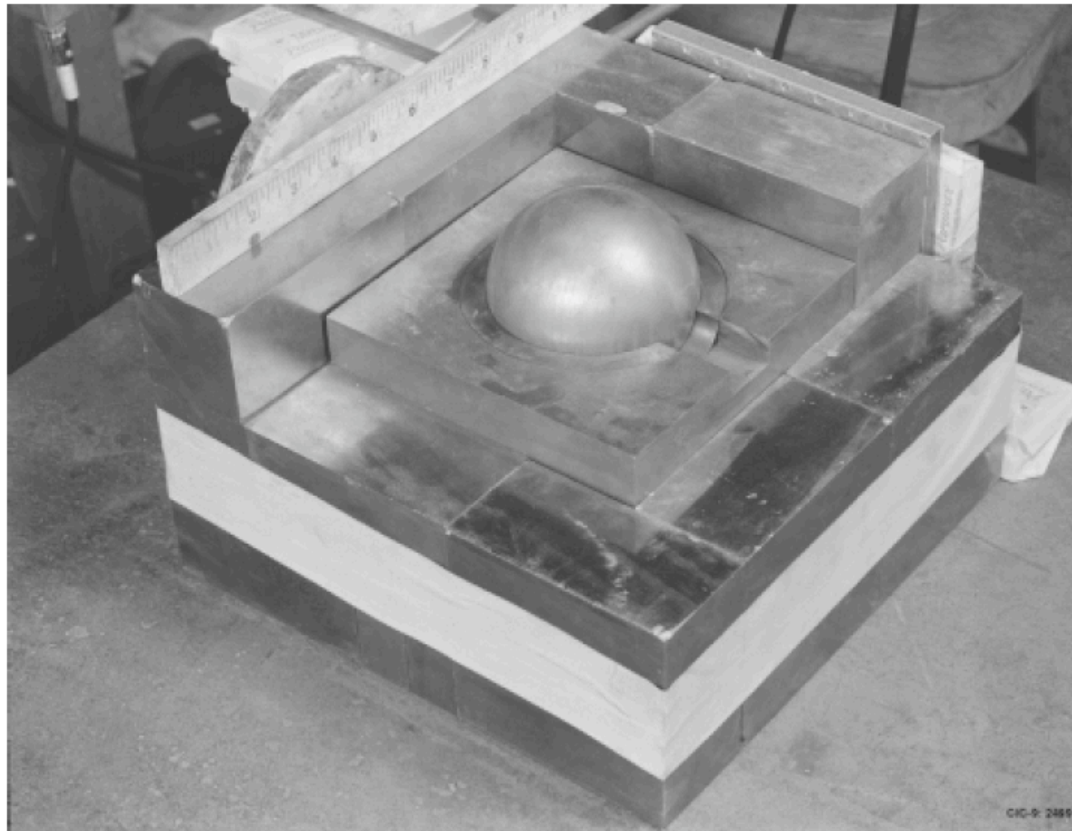


Figure 41. Plutonium sphere partially reflected by tungsten-carbide blocks.



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

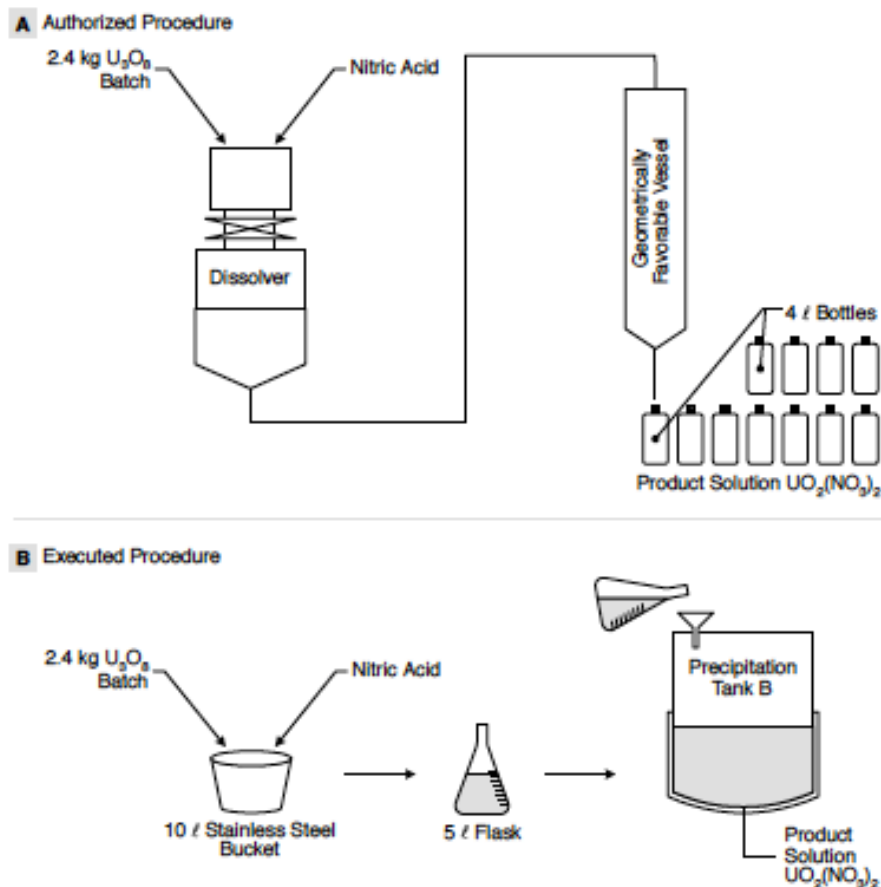
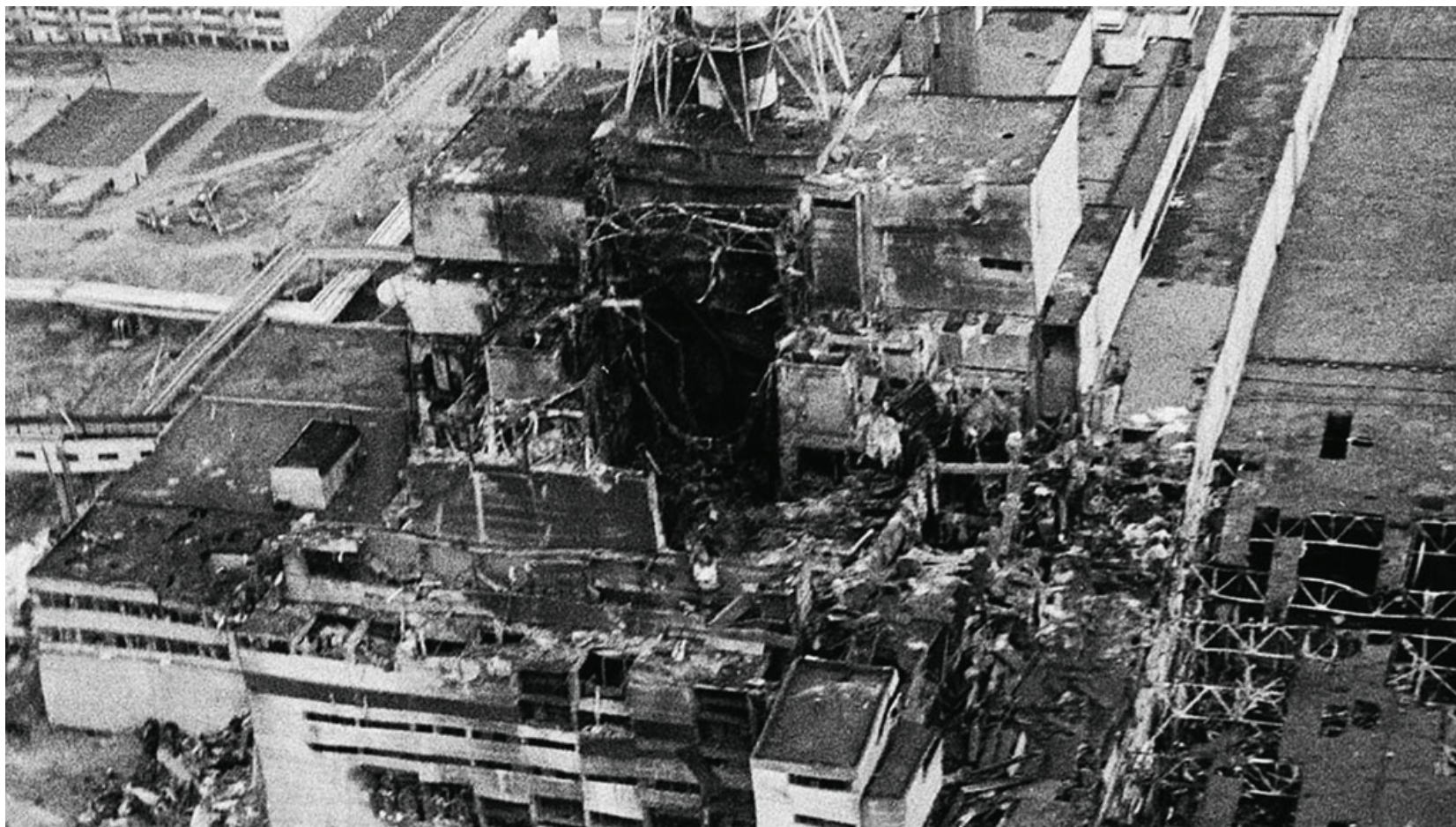


Figure 34. Authorized and executed procedures.



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)

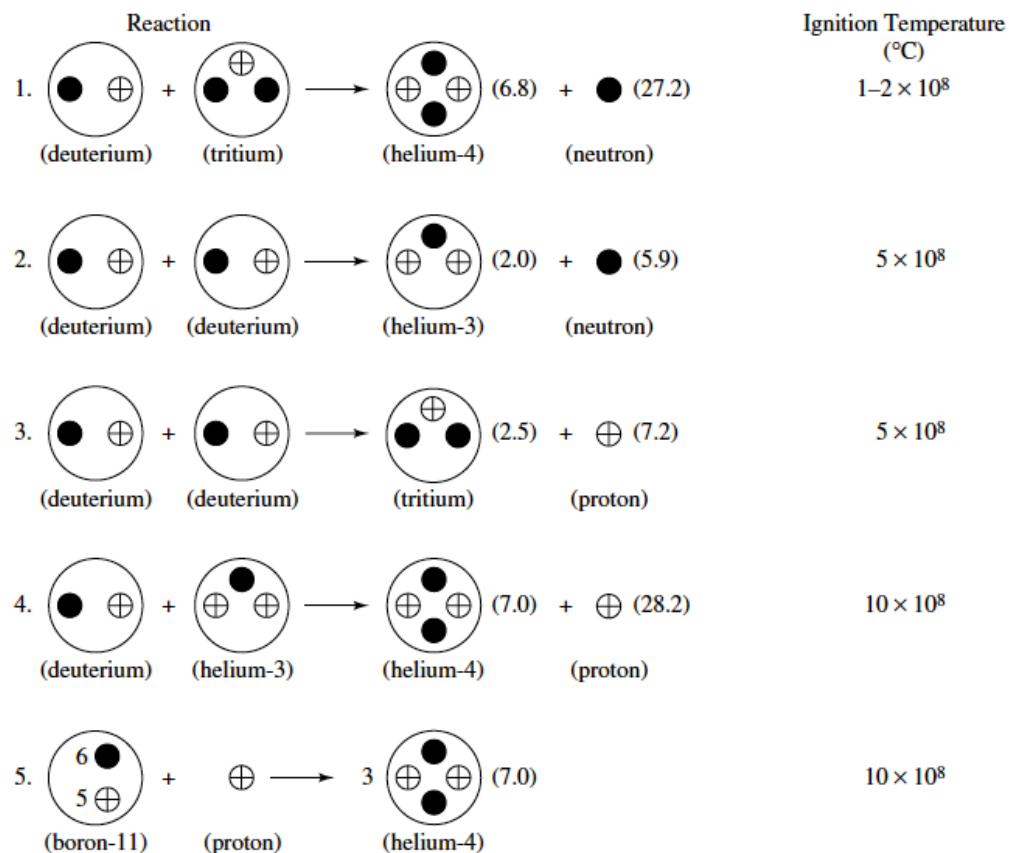
Produção:

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

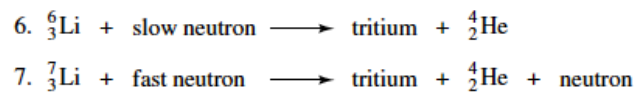


Figure 3.13 Energy producing fusion reactions (numbers in parentheses are the energies of the product particles, in units of 10⁷ kJ, obtained from fusion of one gram of reactants).



Fusão Nuclear

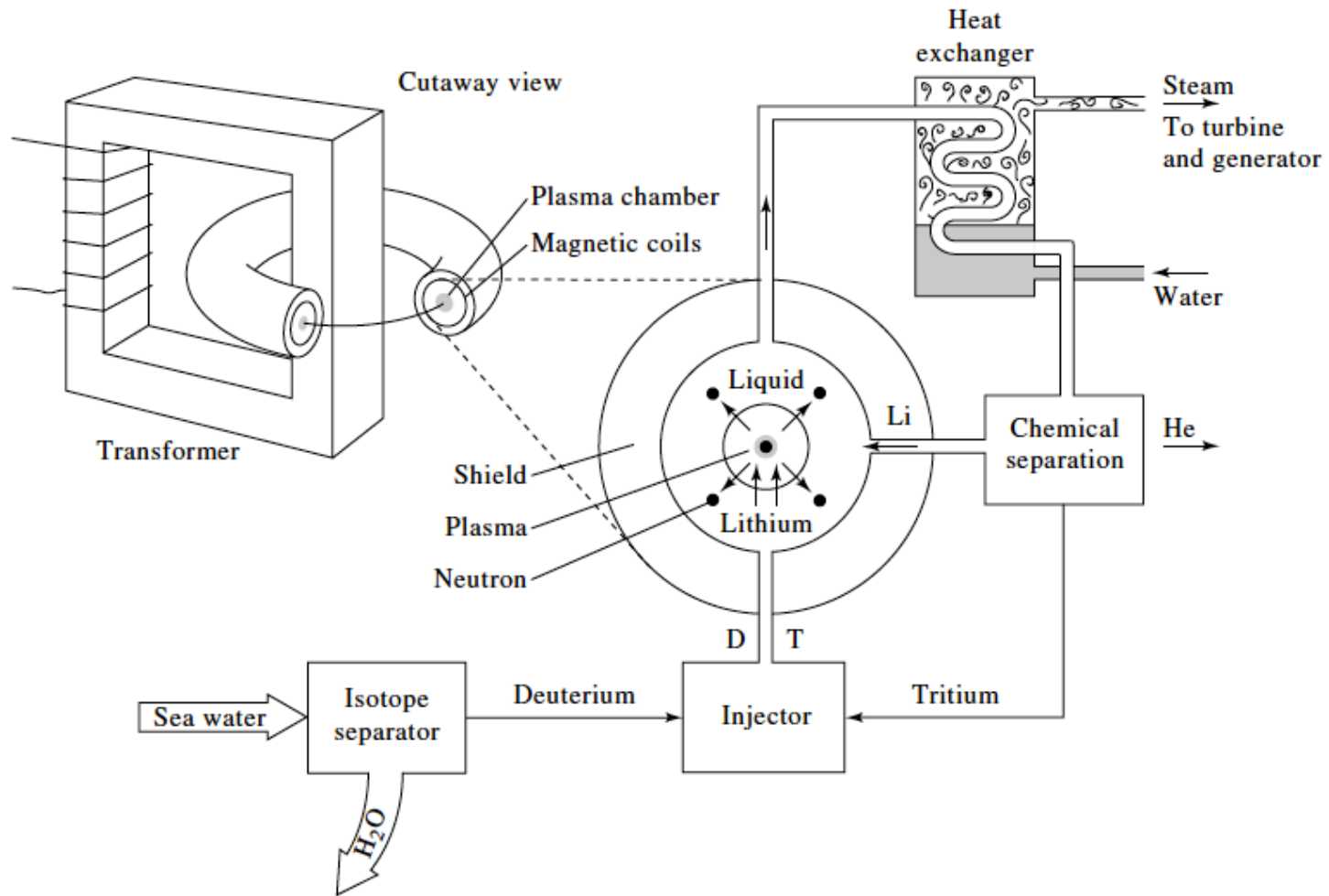


Figure 3.15 Tokamak magnetic-containment fusion using D-T fuel. *Source:* G. Gordon and W. Zoller (1975). *Chemistry in Modern Perspective* (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley).



Fusão Nuclear

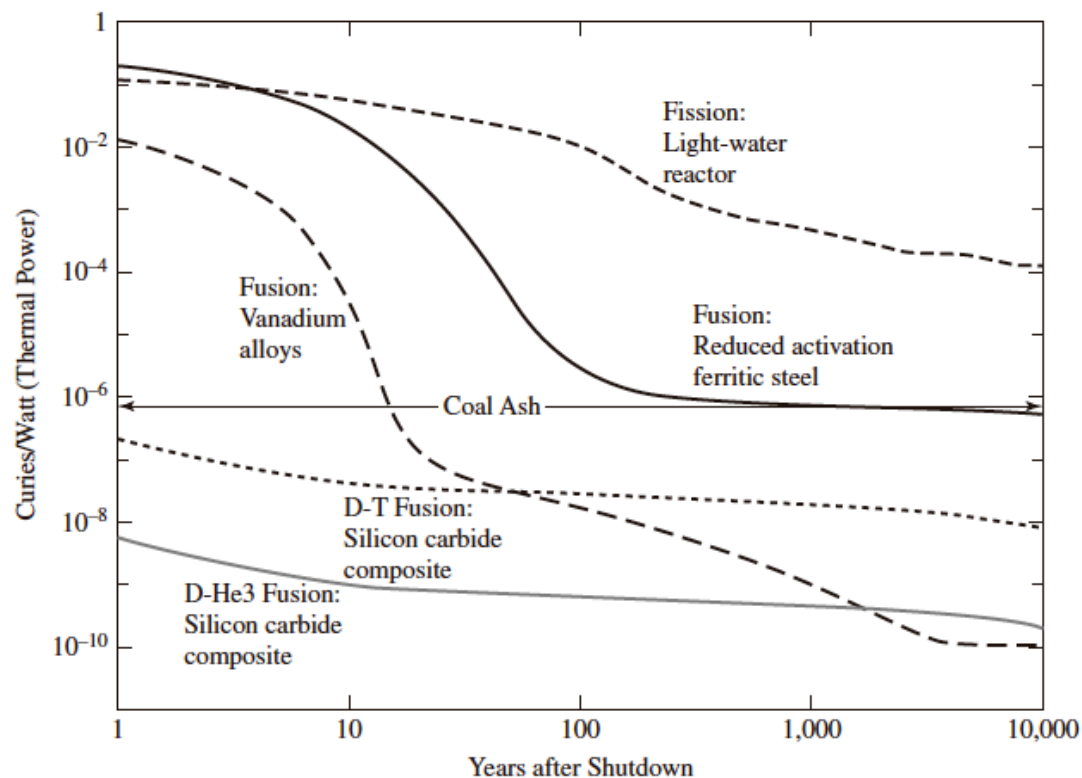


Figure 3.14 In a fusion power plant, the materials comprising the vacuum chamber and other components facing the plasma will become radioactive as a result of the energetic neutrons produced in fusion reactions within the plasma. The decrease in radioactivity with time after shutdown is shown for a number 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.