

Jaderná energetika

- atom je tvořen z atomového jádra a elektronového obalu
rozměry – atom $\approx 10^{-10}$ m, jádro $\approx 10^{-14}$ m
elektronový obal – chemické vlastnosti
jádro – hmotnost, radioaktivita
- jádro nese elektrický náboj $+Ze_0$, kde Z je atomové číslo atomu
- jádro je složeno z Z protonů a N neutronů (nukleony)
působí na sebe jadernými silami (silná interakce)
- celkový počet nukleonů v jádře udává hmotnostní číslo A

$$A = Z + N$$

- značení atomů (jader) ${}^A_Z X$
- nuklidy, izotopy např. ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$ (D), ${}^3_1\text{H}$ (T) nebo ${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$,
- stabilní jádra, radioaktivní jádra
- objev atomového jádra

Vlastnosti atomového jádra

- poloměr atomového jádra

$$R = r_0 A^{\frac{1}{3}},$$

kde $r_0 = (1,3 \pm 0,2) \times 10^{-15}$ m

udává vzdálenost od středu jádra, kde začínají převládat coulombovské síly nad jadernými silami
jádra mají konstantní hustotu jaderné hmoty

- hmotnost atomového jádra

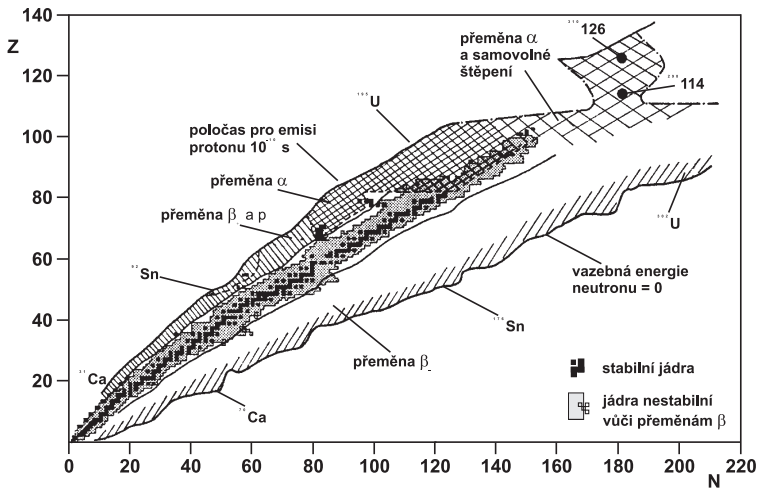
$$m_x = m_{ax} - Zm_e$$

Hmotnosti atomů lze určit pomocí hmotnostní spektroskopie.

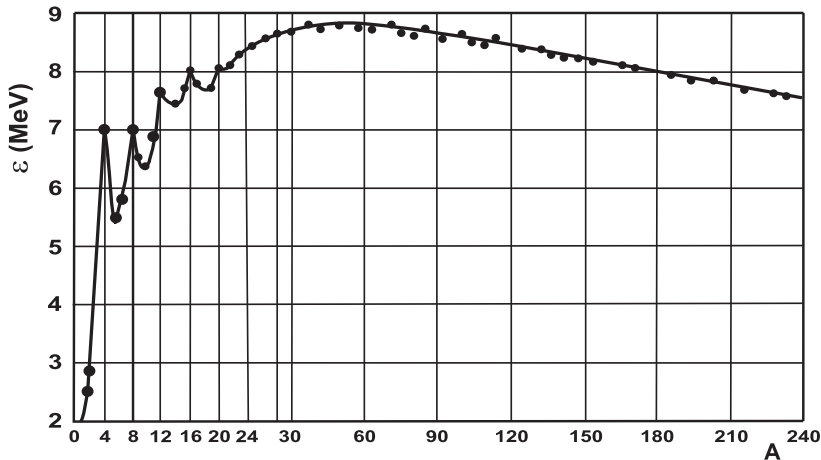
- vazebná energie atomového jádra

$$E_V(A, Z) = (Zm_p + Nm_n - m_x)c^2$$

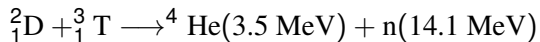
Oblast stability jader



Vazebná energie jader vztažená na jeden nukleon

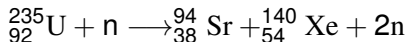


slučování lehkých jader – termojaderná fúze



projekt ITER

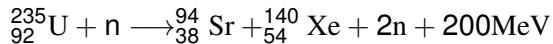
štěpení těžkých jader



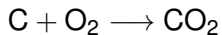
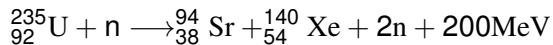
jaderné reaktory

Kolik energie získáme při rozštěpení jednoho jádra ?

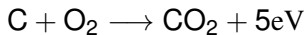
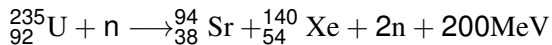
štěpení těžkých jader



štěpení těžkých jader



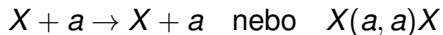
štěpení těžkých jader



vlastnosti jaderných sil

- 1 jaderné síly jsou krátkodosahové (dosah 10^{-14} m),
na malých vzdálenostech odpudivé, na větších přitažlivé
- 2 jaderné síly se jeví nasycené
- 3 jaderné síly jsou nábojově nezávislé
- 4 jaderné síly jsou spinově závislé

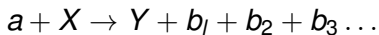
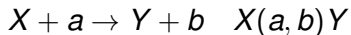
- pružný rozptyl



- nepružný rozptyl

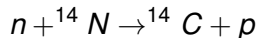


- prostá reakce

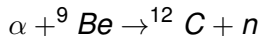


Příklady

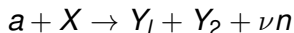
- v zemské atmosféře díky kosmickému záření (převážně protony) probíhají jaderné reakce, např.



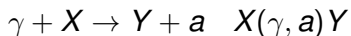
- zdroj neutronů



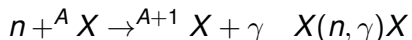
- štěpení jader



- tříštění jader
- fotojaderná reakce



- γ – záchyt



účinný průřez σ

má rozměr plochy, jednotky jsou m^2 , resp. $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$

čím větší je účinný průřez, tím větší je pravděpodobnost dané reakce

dále zavádíme celkový účinný průřez

$$\sigma_t = \sum \sigma_i$$

a pravděpodobnost i -tého druhu srážky je

$$P = \frac{\sigma_i}{\sigma_t}$$

Energie γ -fotonů potřebná k rozštěpení nuklidu

nuklid	prahová energie E_t [MeV]
^{232}Th	5,9
^{233}U	5,5
^{235}U	5,75
^{238}U	5,85
^{239}Pu	5,5

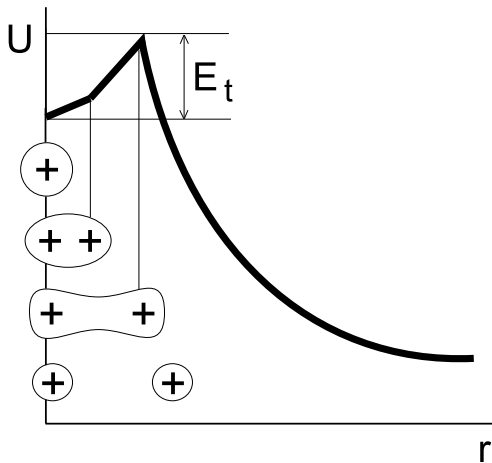
Energie vazby neutronu ve složeném jádře

nuklid	energie vazby [MeV]
^{233}Th	4,79
^{234}U	6,84
^{236}U	6,55
^{239}U	4,80
^{240}Pu	6,53

Štěpení neutrony

- ^{233}U , ^{235}U a ^{239}Pu se štěpí neutrony s libovolnou kinetickou energií
- ^{232}Th a ^{238}U se štěpí jen neutrony s kinetickou energií vyšší než 1 MeV
- v přírodě se však vyskytuje ^{232}Th a ^{238}U

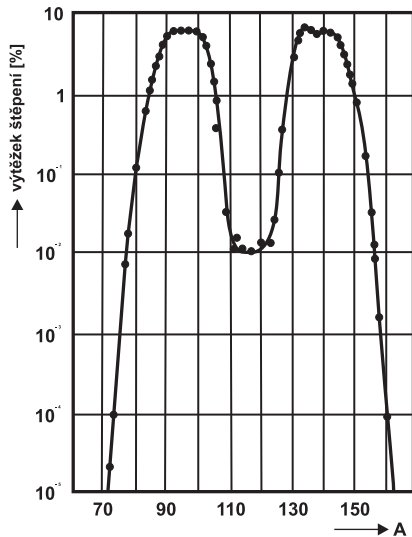
Model štěpení



Průměrná bilance energie při štěpení ^{235}U

částice	energie [MeV]
fragmenty štěpení	$166,2 \pm 1,3$
neutrony	$4,8 \pm 0,1$
okamžité γ -fotony	$8,0 \pm 0,8$
β -částice produktů štěpení	$7,0 \pm 0,3$
γ -záření produktů štěpení	$7,2 \pm 1,1$
antineutrino	$9,6 \pm 0,5$
celkem	$202,8 \pm 0,4$

Výtěžky produktů štěpení



Výtěžky produktů štěpení

vzniká 40 různých párů fragmentů štěpení
v rovnovážném stavu je 25% produktů štěpení prvky ze skupiny
vzácných zemin, 16% Kr + Xe, 15% Zr, 12% Mo, 6,5% Cs

Průměrný počet neutronů vznikajících při štěpení

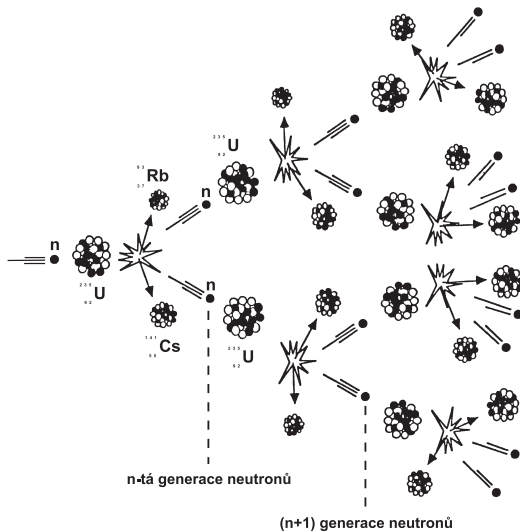
nuklid	počet neutronů ν
^{233}U	2.49
^{235}U	2.42
^{239}U	2.90
^{239}Pu	2.93

štěpení tepelnými neutrony

Energie neutronů vznikajících při štěpení

energie neutronů pohybuje v rozmezí od 0,05 MeV do 10 MeV
střední energie 2 MeV
nejpravděpodobnější energie 0,7 MeV

Model štěpení pro $^{235}_{92}\text{U}$



samoudržující se reakce: větvení \times ztráty
při štěpení vzniká průměrně více než jeden druhotný neutron

ztráty nositele procesu:

- únik částice mimo hranice látky
- absorpce částice bez emise druhé

$$k = \frac{n_{i+1}}{n_i}$$

$k < 1$	podkritický stav	reakce zaniká
$k = 1$	kritický stav	množství uvolněné energie je konstantní
$k > 1$	nadkritický stav	lavinovité šíření

použití: jaderný reaktor, aktivní zóna

doba života volného neutronu $\sim 10^3$ s

neutronový cyklus u jad. reaktoru s tepelnými neutrony $\leq 10^{-3}$ s

únik neutronů je dán geometrií aktivní zóny

pro objem nekonečných rozměrů: multiplikační koeficient k_0

je-li $k_0 > 1$, pak lze najít takovou geometrii, kdy

$$k = k_0 \omega = 1$$

ω - podíl neutronů pokračujících v reakci ku celkovému počtu neutronů

k - kritické rozměry (\Rightarrow kritický objem, kritické množství)

příklad multiplikativního koeficientu

doba neutronového cyklu: τ

n neutronů, \Rightarrow za dobu τ vznikne kn neutronů

přírůstek je $kn - n$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n(k-1)}{\tau}$$

$$n(t) = n_0 \cdot e^{\frac{k-1}{\tau}t}$$

pro jaderný reaktor $\tau = 10^{-3}$ s

pro $k = 1,01$ vzroste za 1 s počet neutronů 20 000 krát

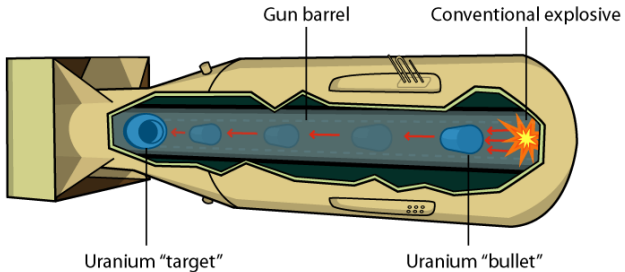
\Rightarrow **nepřípustné**

čisté štěpné materiály ^{235}U , ^{239}Pu : $\tau \sim 10^{-8}$
pro $k = 1,1$ jeden neutron způsobí za $6 \mu\text{s}$ 10^{26} štěpení
energie uvolněná při výbuchu 1 kg uranu odpovídá 20 kt TNT
použití reflektorů sníží kritickou hmotnost $2 - 3 \times$

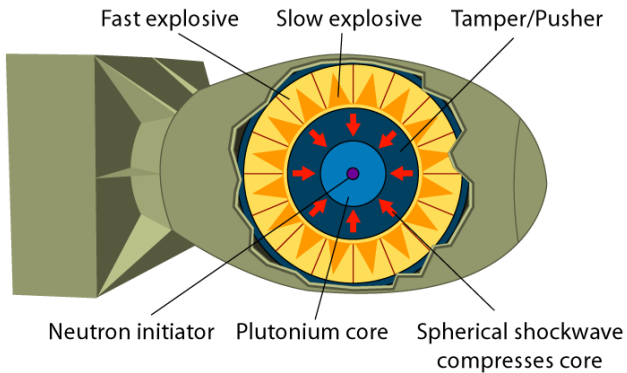
kritické hmotnosti a poloměry pro koule

materiál	m_{kr} [kg]	R_{kr} [cm]
^{233}U	16	6
^{235}U	48	8,5
^{239}Pu	17	6

Atomová bomba vystřelovacího typu



Atomová bomba implosivního typu



Izotopové složení přírodního uranu

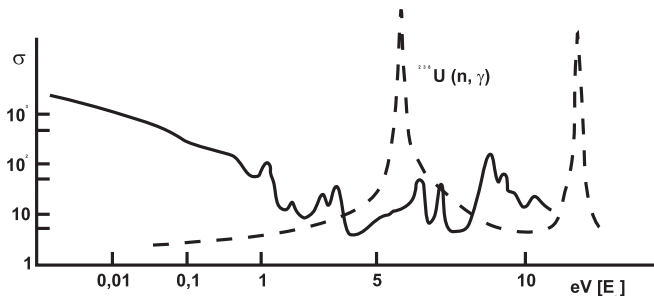
^{238}U	99,28%
^{235}U	0,714%
^{234}U	0,006%

Účinné průřezy pro netrony ($E = 2 \text{ MeV}$)

parciální účinný průřez [b]	^{238}U	^{235}U
σ_f štěpení	0,57	1,32
σ_γ radiační záchyt	0,03	0,05
$\sigma_{n'}$ nepružné srážky	2,3	1,8
σ_n pružné srážky	4,3	4,2
σ_t celkový	7,2	7,37

Účinný průřez

účinný průřez σ [m²] 1 barn = 10⁻²⁸ m²



— účinný průřez pro štěpení ^{235}U neutronem

- - účinný průřez pro radiační záchyt neutronu jádrem ^{238}U

Řetězová reakce v jaderném reaktoru

pro klesající energii neutronů:

- pro ^{238}U klesá účinný průřez pro štěpení
- pro ^{235}U stoupá účinný průřez pro štěpení

při malé koncentraci ^{235}U dochází hlavně k radiačnímu záchytu v ^{238}U

$k_0 > 1$ pro $^{235}\text{U} > 5\%$

nebo se použijí moderátory, neutrony se zpomalí dříve než nastane radiační záchyt na ^{238}U

moderátor: např. těžká voda (D_2O , lze dosáhnout $k > 1$ i pro neobohacený uran), Be, grafit, lehká voda
stejně látky jsou dobrými reflektory

Zpomalování neutronů v moderátoru

počet srážek potřebný ke zpomalení neutronů z 2 MeV na 0.025 eV

prvek	hmot. číslo A	ξ	počet srážek ke zpomalení rychlých neutronů
vodík	1	1.000	18
deutrium	2	0.725	25
helium	4	0.425	43
lithium	7	0.268	67
beryllium	9	0.209	86
uhlík	12	0.158	114
kyslík	16	0.120	150
uran	238	0.00838	2172

Zpomalování neutronů v moderátoru

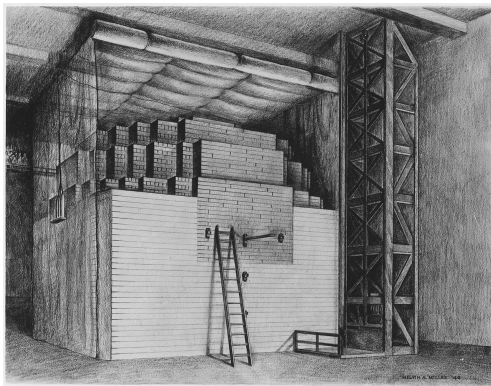
pro popis vlastností moderátoru se zavádí
zpomalovací schopnost $\xi\Sigma_s$ a koeficient moderace $\Sigma_s\xi/\Sigma_a$

moderátor	zpomalovací schopnost [m^{-1}]	koeficient moderace
voda	153	72
těžká voda	37	5670
helium ¹	1.6×10^{-3}	83
beryllium	17	159
uhlík	6.4	192

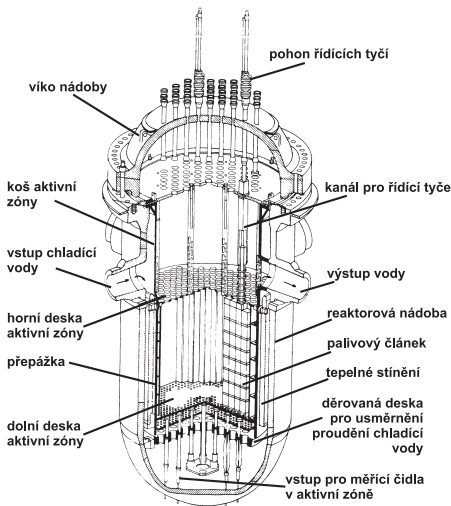
¹ při normálním tlaku a teplotě

Chicago Pile 1

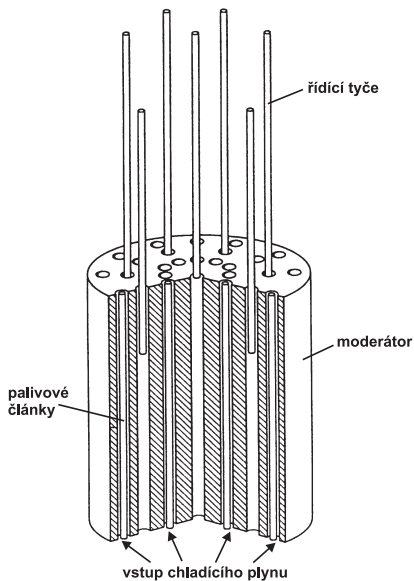
první jaderný reaktor Chicago Pile 1 byl spuštěn 2.12. 1942



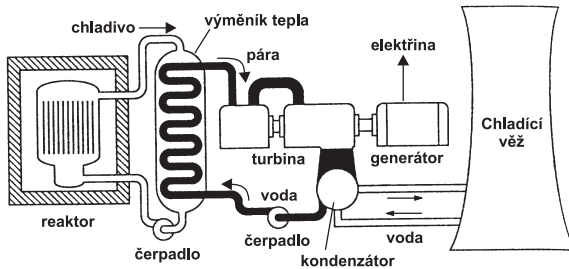
Reaktor moderovaný a chlazený lehkou vodou (VVER, PWR)



Reaktor moderovaný grafitem a chlazený plynem



Jaderná elektrárna



klasifikace jaderných reaktorů

1. podle energií neutronů používaných ke štěpení

- tepelné reaktory
- reaktory s rezonančními neutrony
- rychlé reaktory

klasifikace jaderných reaktorů

2. podle použitých materiálů

chlادivo

Pro odvod tepla z energetických reaktorů se používají některé moderátory - obyčejná a těžká voda, polyfenyly. Pro rychlé reaktory se používají jako chlادiva kapalné kovy jako sodík, draslík nebo jejich eutektická slitina. Jako chlادivo je možno použít plyny, používají se CO_2 nebo He.

klasifikace jaderných reaktorů

moderátor

Reaktor může nebo nemusí mít moderátor. Jako moderátor se nejčastěji používá lehká voda, těžká voda nebo grafit.

klasifikace jaderných reaktorů

Palivo

Jako palivo se používá přírodní uran nebo obohacený uran, obohacení může být slabé – do 5%, střední – do 20% nebo vysoké – do 93%.

Dalším kritériem je volba chemického složení paliva. Používá se kovový uran ve formě vhodné slitiny, oxid uraničitý UO_2 , karbid uranu UC.

klasifikace jaderných reaktorů

3. podle konstrukčního uspořádání
chlazení

Chladivo odvádějící teplo z aktivní zóny je pod vysokým tlakem.

Podle konstrukce rozlišujeme

- reaktor s tlakovou nádobou

Aktivní zóna a celý systém řízení reaktoru je umístěn v tlakové nádobě, která snáší potřebný tlak.

- reaktor kanálového typu

Každý palivový článek je umístěn ve vlastní tlakové trubce.

klasifikace jaderných reaktorů
podle změny skupenství chladiva

Je-li je reaktor chlazen obyčejnou nebo těžkou vodou, může v reaktoru docházet k varu a výrobě páry. V tomto případě mluvíme o varných reaktorech, v opačném případě jde o tlakovodní reaktor.

Označování reaktorů

Označení typu	Plný význam anglicky český pojem
PWR	Pressurized Light Water Moderated and Cooled Reactor tlakovodní lehkou vodou chlazený a moderovaný reaktor
BWR	Boiling Light Water Cooled and Moderated Reactor, varný, lehkou vodou chlazený a moderovaný reaktor
PHWR	Pressurized Heavy Water Moderated and Cooled Reactor tlakovodní těžkou vodou chlazený a moderovaný reaktor
GCR	Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor plynem chlazený, grafitem moderovaný reaktor
LWGR	Light Water Cooled, Graphite Moderated Reactor lehkou vodou chlazený, grafitem moderovaný reaktor
AGR	Advanced Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor pokročilý plynem chlazený, grafitem moderovaný reaktor
FBR	Fast Breeder Reactor rychlý množivý reaktor

Procentuelní zastoupení jednotlivých typů

Označení typu	Podíly dle počtu	Podíly dle výkonu (GW)
PWR	246 (57%)	216,5 (63,6%)
BWR	93 (21,6%)	76,2 (22,4%)
PHWR	33 (7,6%)	18,6 (5,5%)
GCR	21 (4,9%)	3,5 (1,0%)
LWGR	20 (4,6%)	14,9 (4,4%)
AGR	14 (3,2%)	8,4 (2,5%)
FBR	4 (0,9%)	2,0 (0,58%)

Počty reaktorů a jejich podíl na výrobě elektřiny

V roce 2006 bylo celkem 435 reaktorů v komerčním provozu, instalovaný výkon byl 368 GW(e) a bylo vyrobeno 16% celkové roční produkce elektřiny.

V jednotlivých zemích

Francie 78 %

Slovensko 57 %

Belgie 55 %

Švédsko 50 %

Česká rep. 31 %

- jaderný reaktor je zdrojem tepla pro elektrárnu
- musí být zajištěn spolehlivý odvod tepla z reaktoru ve všech provozních a havarijních režimech
- nesmí dojít k tavení paliva či palivových článků
- musí být vyloučena krize varu na všech palivových článcích

Konstrukční materiály jaderných reaktorů

- musí mít pevnost za vysokých teplot, odolnost proti korozi a chemikáliím
- musí mít slabou absorpci neutronů
- musí být radiačně stabilní
radiační růst, zvýšení pevnosti a zkřehnutí, akumulace skryté energie,

Konstrukční materiály jaderných reaktorů

- hliník a jeho slitiny
- zirkonium a jeho slitiny
- hořčík jeho slitiny
- austenitické oceli a slitiny na bázi niklu

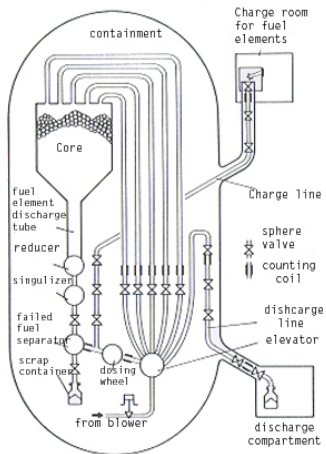
Pomocná zařízení jaderných reaktorů

- systém kompenzace objemu primárního chladiva
- objemová a chemická regulace
- dochlazování reaktoru
- havarijní chladicí systém
- kontejnment

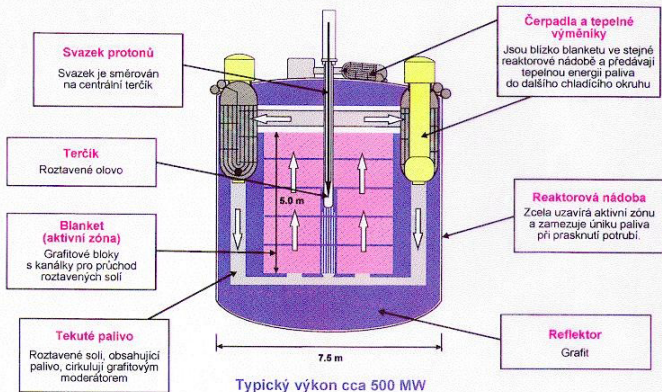
Generace IV projekt nových typů reaktorů

- chlazené plynem
- chlazené vodou
- rychlé reaktory

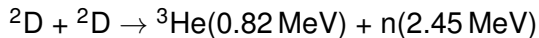
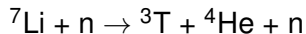
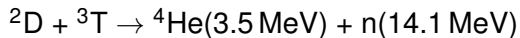
"Oblázkový" reaktor



REAKTOR PRO TRANSMUTACI RA ODPADŮ



Slučování lehkých prvků



$$Q = \frac{P_{\text{fuz}}}{P_{\text{in}}}$$

$$n\tau > 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}$$

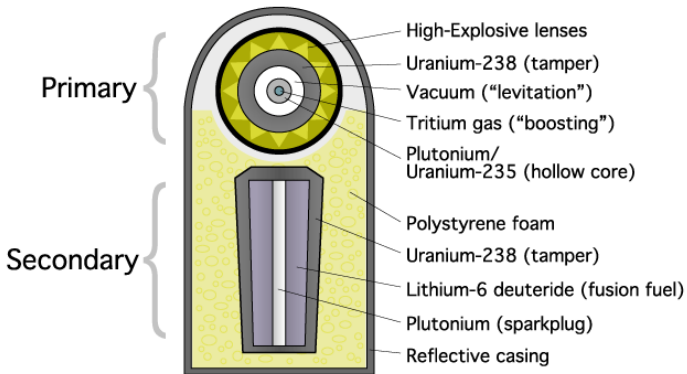
$$T = 200 \text{ MK}$$

metody

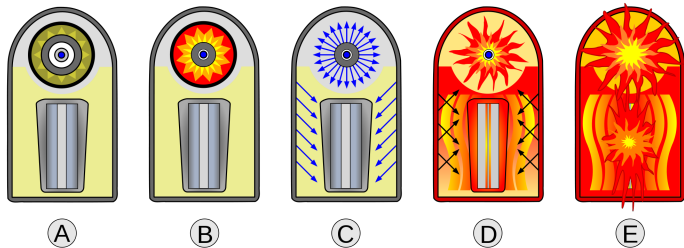
- magnetické udržení
- inerciální fúze

Vodíková bomba

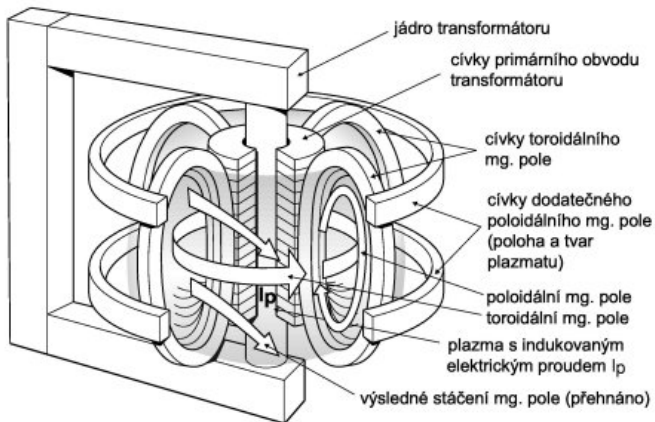
konstrukce vodíkové bomby



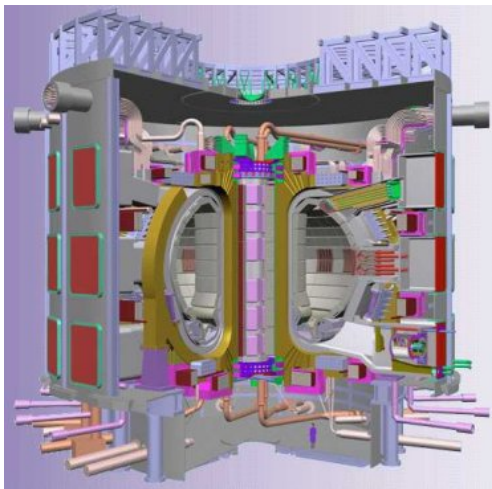
princip vodíkové bomby



Tokamak



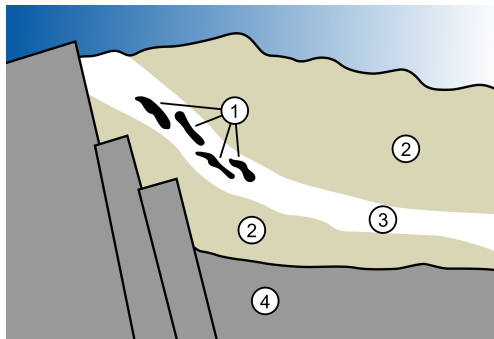
ITER



Přírodní jaderný reaktor v Oklo



Přírodní jaderný reaktor v Oklo



1 – přírodní reaktory, 2 – pískovec, 3 – vrstva rudy, 4 – žula