Elektrárny
B1M15ENY

Jaderné elektrárny

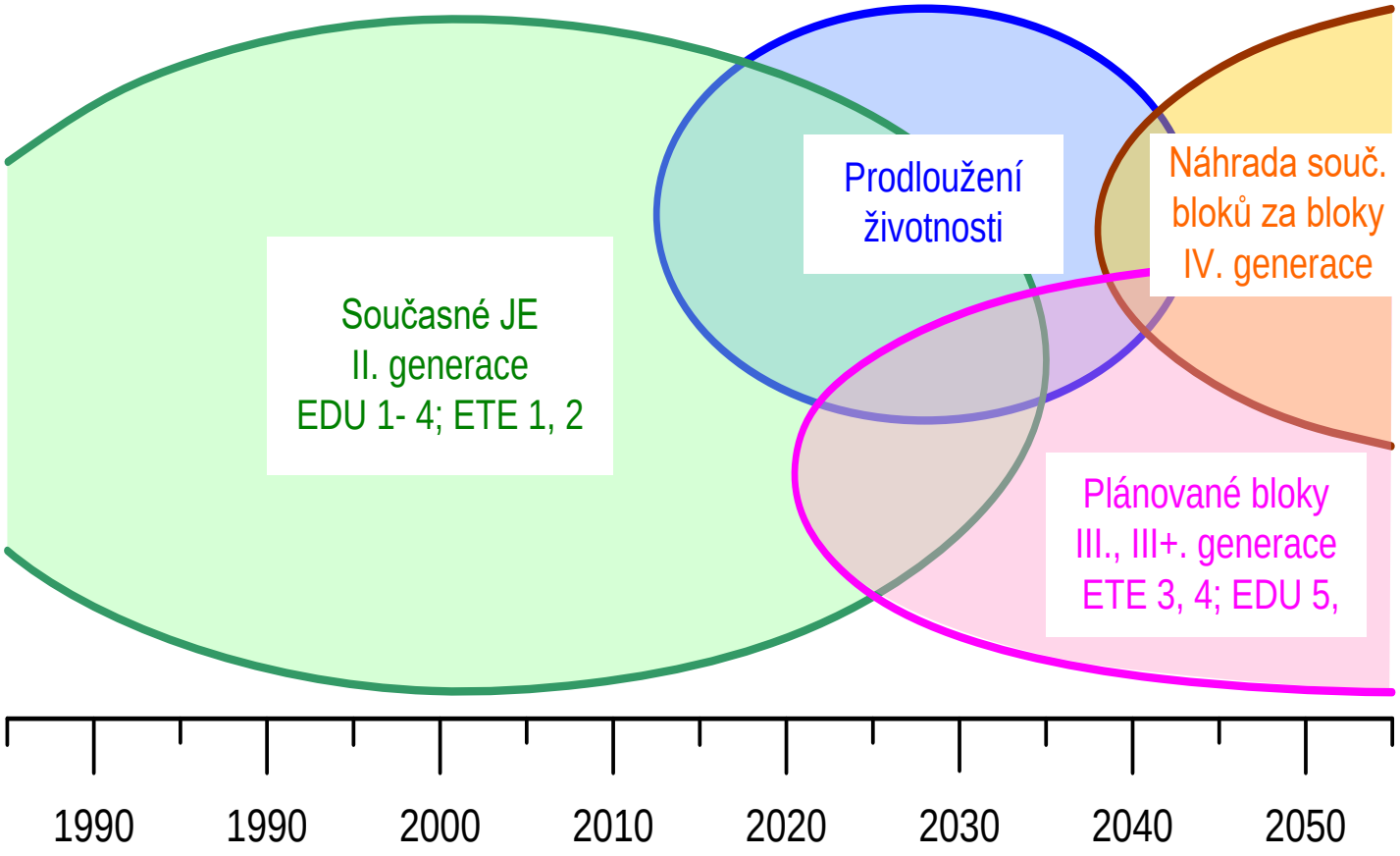
Stanislav Bouček

boucek@fel.cvut.cz

Katedra elektroenergetiky

ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická
Technická 2, 166 27 Praha 6

Předpokládaný rozvoj našich jaderných elektráren



Jaderné elektrárny – specifika JE

- **„Palivo“ pro výrobu tepla na určité období (kampaň) je prakticky ve všech jaderných elektrárnách umístěno v reaktoru, oproti kontinuální dodávce zvenku u tepelných elektráren.**
- **Při štěpných reakcích vznikají radioaktivní izotopy s různě dlouhými poločasy rozpadu, tzn., že s palivem, ani se zařízením, které se nacházelo v okolí štěpné reakce, nelze volně nakládat několik desítek až milionů let a po celou tuto dobu musí být zabezpečeno proti úniku škodlivého záření a možnému zneužití.**
- **V jaderných reaktorech nelze skokem přerušit vývin tepla, neboť i po "odstavení" reaktoru, dochází v aktivní zóně k reakcím (rozpadům), doprovázeným vývinem tepelné energie. Např. tlakovodní reaktory produkují ještě minutu po odstavení víc jak 1% původně generované tepelné energie. To je např. u reaktoru v elektrárně Temelín 30MW$_t$, které je potřeba bezpečně odvést tak, aby nedošlo k varu chladiva, přehřátí palivových elementů v aktivní zóně a porušení jejich pokrytí spojeným s únikem radioaktivního materiálu.**

Jaderné elektrárny – specifika JE

- **Koncentrace energie v palivu na jednotku hmotnosti je v jaderných elektrárnách podstatně vyšší. Z 1kg hnědého uhlí vyrobí tepelná elektrárna asi 1 kWh elektrické energie. Jaderná elektrárna s tlakovodními reaktory vyrobí z 1 kg jaderného paliva přibližně 1 GWh, tj. asi 10^6 krát více. Srovnáme-li množství vytěžené horniny, jsou tyto poměry vzhledem k nízkému obsahu uranu v rudách podstatně mírnější, přesto opět vypovídají ve prospěch jaderných elektráren. Na jednotku vyrobené energie je třeba pro tepelné elektrárny vytěžit řádově 10 až 100krát více horniny (včetně hlušiny) než pro jaderné.**
- **Odvod zbytkového tepla po odstavení reaktoru lze zpravidla provést jen prostřednictvím tepelných výměníků. To je jeden z důvodů proč je v jaderných elektrárnách více chladících smyček (okruhů ve kterých se předává teplo z reaktoru směrem k turbínám). Tímto opatřením se podstatně zvyšuje spolehlivost odvodu tepla z reaktoru při poruše na technologickém zařízení chladícího okruhu.**

Jaderné elektrárny – specifika JE

- **Během kampaně reaktoru, tj. provozu s jednou vsázkou, se mění struktura paliva - snižuje se obsah štěpitelné složky (tzv. vyhořívání). Tento stav je s ohledem na povolené rozsahy regulačních, řídících a bezpečnostních orgánů reaktoru nutné průběžně kompenzovat množstvím absorbátoru v aktivní zóně.**
- **Poměrně strmé teplotní spády mezi palivem a chladivem, s tím spojená možnost poškození palivových elementů nebo jejich pokrytí a úniku radioaktivních štěpných produktů.**
- **Technicky, technologicky i ekonomicky náročnější palivový cyklus, tj. cesta paliva od těžby až po ukládání nebo přepracování vyhořelých palivových článků.**
- **Absence škodlivin CO_2, NO_X a SO_2 vypouštěných do ovzduší**.

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

Atomové jádro

- Atomové jádro - střed atomu (průměr jádra je řádově 10^{-15} až 10^{-14}m). Vyjma atomu vodíku H2 je složeno z neutronů a protonů.
- Neutron - bez elektrického náboje
- Proton má jednotkový (elementární) el. náboj $e = 1{,}60219\ 10^{-19}$ C.
- Nukleony – souhrnný název pro protony a neutrony.
- Hmotnostní (nukleonové) číslo A - součet protonů a neutronů v jádře.
- Atomové (protonové) číslo Z - počet protonů v atomovém jádře.
- Neutronové číslo N - počet neutronů v jádře.

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

Hmotnostní číslo určuje fyzikální vlastnosti příslušného prvku; atomové, chemické vlastnosti prvku a pořadí v periodické tabulce.

Zápis: $^{A}_{Z}X$, A X, XA. (např. $^{235}_{92}U$, 235 U, U235).

Atomová jednotka hmotnosti - u (1u = 1 / 12 klidové hmotnosti neutrálního atomu nuklidu uhlíku C12 v základním stavu).

$$1\ u = 1{,}6605655\ \ 10^{-27}\ kg$$

Klidové hmotnosti základních částic:

proton	1,67265 10^{-27} kg	1,007277 u
neutron	1,67495 10^{-27} kg	1,008665 u
elektron	9,10953 10^{-31} kg	0,000548 u

Izotopy – prvky mající stejná atomová čísla Z, ale odlišná hmotnostní čísla A (stejný počet protonů v jádře (v základním stavu i elektronů v obalu), ale odlišný počet neutronů, mají tedy shodné chemické, ale rozdílné fyzikální vlastnosti.

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

Síly působící v oblasti atomového jádra.

Nejdůležitějšími silami jsou síly elektrostatické (Coulombovy) a jaderné síly. Gravitační síly mezi nukleony jsou prakticky zanedbatelné.

***Elektrostatické síly*. Působí na nukleony s elektrickým nábojem, řídí se Coulombovým zákonem. Jsou přibližně 10^{35} až 10^{36} krát větší než síly gravitační. V atomovém jádře, kde vzdálenosti mezi kladně nabitými protony jsou řádově do 10^{-15} m, působí jako poměrně silné odpudivé síly. Celková velikost elektrostatických sil závisí na počtu protonů i neutronů v jádře a na jejich vzájemném poměru. S rostoucím počtem neutronů (obecně i nukleonů) v jádře klesá poměrná elektrostatická síla vztažená na jednotlivé protony.**

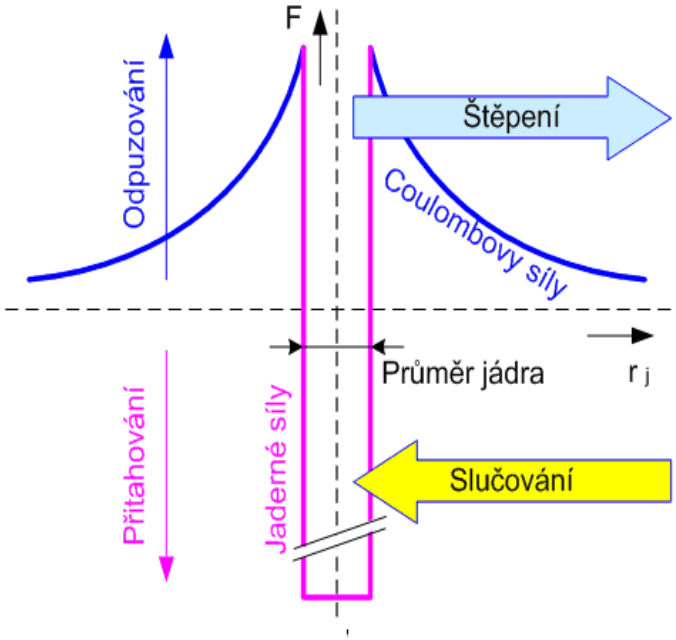
Jaderné elektrárny - fyzikální základy

Jaderné síly **(Jaderné interakce). Nezávisí na elektrickém náboji. Celkově jsou o dva až tři řády větší než síly elektrostatické. V jaderné fyzice se zpravidla uvažuje existence dvou jaderných sil - slabé a silné.**

Slabé jaderné síly**. Řídí procesy radioaktivního rozpadu jader, např. rozpad neutronů v jádře na proton, elektron a elektronové antineutrino. Jejich dosah je řádově 10^{-16} m. Jsou slabší než síly elektrostatické, ale přibližně 10^{25} krát silnější než síly gravitační.**

Silné jaderné síly**. Mají omezený dosah, řádově 10^{-15} m. Působí pouze do vzdálenosti odpovídající rozměrům atomového jádra, potom klesají k nule. V oblasti jádra jsou silami přitažlivými o 13 řádů silnějšími než slabé jaderné síly. Právě díky jim je drženo atomové jádro pohromadě.**

Jaderné elektrárny - fyzikální základy



Zidealizovaný průběh součtu jaderných a elektrostatických sil v závislosti na vzdálenosti od pomyslného středu jádra nám ukazuje oblast o poloměru menším než 10^{-15} m kde převládají silné jaderné síly. Výslednice sil zde tvoří tzv. potenciálovou jámu. Její poloměr je v některé odborné literatuře uváděn jako definice poloměru jádra. Za hranicí tohoto poloměru prakticky vymizí potenciál přitažlivé jaderné síly a zůstává jen elektrostatická Coulombova síla asymptoticky klesající k nule.

Chceme-li jádro rozdělit musíme překonat silné jaderné síly a naopak při skládání jádra musíme překonat odpudivé síly a dostat nukleony do oblasti působení silných jaderných sil.

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

***Jaderné reakce*. Jadernými reakcemi nazýváme přeměnu atomového jádra vnějším působením elementárních částic nebo jiného jádra. Přeměnou jádra je myšleno vyslání částice z jádra, rozštěpení či roztříštění jádra a změna energetických hladin nukleonů.**
Částice způsobující nejčastěji jadernou reakci jsou: protony, neutrony, alfa částice, deuterony a fotony.

Jaderné reakce jsou poměrně těžko uskutečnitelné, jednak vlivem malých rozměrů terčového jádra (asi 10^{-15} m, kdy v porovnání s rozměry atomu je při ostřelování jádra elementárními částicemi malá pravděpodobnost zásahu), a také proto, že při požadované interakci kladně nabité částice (např. protonu) s kladně nabitým jádrem vzájemně působí velmi intenzívně odpudivé Coulombovy síly.

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

Odpudivá síla je i u elementárních jader vodíku značná a za běžných podmínek nelze tuto jadernou reakci uskutečnit. Lze ji usnadnit zvýšením teploty prostředí na několik milionů stupňů, kdy se kinetická energie jader zvýší tak, že překoná elektrostatické síly a jádra se dostanou do takové blízkosti kde začínají působit silné jaderné síly. Jaderná reakce uskutečněná za těchto podmínek se nazývá *termonukleární.*

Elektrostatické síly nepůsobí na částici bez náboje - neutron. Tomu stačí podstatně nižší energie k uskutečnění jaderné reakce než ostatním částicím. *Neutronové jaderné reakce jsou z hlediska současné energetiky nejdůležitější.* Volné neutrony jsou radioaktivní, rozpadají se exotermicky s poločasem asi 12,8 minut na proton, elektron a anti-neutrino. Podle některých teorií jsou neutron a proton jen dva stavy téže částice, které říkáme nukleon.

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

Neutrony dělíme podle energie kterou získají při jaderných interakcích na:

- ***Tepelné neutrony*** **(termální, pomalé) – o energii do 0,5 eV, rychlost řádově do 104 m/s a teplotu do 6000K. Průměrné hodnoty pro celé spektrum tepelných neutronů jsou však podstatně nižší.**
- ***Rychlé neutrony*** **- mají energii nad 0,5 MeV (asi do 17 MeV), rychlost o řád nižší než rychlost světla a teplotu řádově 1010 K.**
- ***Epitermální neutrony*** **- mají energii ležící mezi hodnotami pro tepelné a rychlé neutrony.**

Neutron v jaderném reaktoru dosahuje okamžitě po štěpení U235 průměrné energie 2 MeV, a pokud není absorbován, klesá jeho energie až o osm řádů na energii tepelných neutronů než dojde k interakci s dalším jádrem U235, nebo k jeho rozpadu.

Vazební energie jádra

Klidová hmotnost jádra atomu všech známých prvků včetně jejich izotopů je menší, než součet hmotností jednotlivých nukleonů. Tento rozdíl se nazývá **hmotnostní schodek** a lze jej vysvětlit pomocí Einsteinova vztahu mezi hmotností a energií. Při vzniku jádra z volných nukleonů *je vykonána kladná práce*, která se projeví *úbytkem celkové energie soustavy*. Stejnou energii, nazývanou **vazební energie jádra,** je třeba *dodat*, chceme-li jádro opět *rozložit na volné nukleony*. Vyšší vazební energie přísluší stabilnějším prvkům.

Pro hmotnostní schodek jádra platí:

$$\Delta m_j = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_j \; [kg]$$

kde Z a N je protonové a neutronové číslo [-]

m_p a m_n jsou klidové hmotnosti protonu a neutronu [kg, u]

m_j je celková hmotnost jádra [kg, u]

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

Vazební energii jádra lze vypočítat z hmotnostního schodku pomocí Einsteinova vztahu:

$$W_{\Delta mj} = \Delta m_j \cdot c^2 \quad [J, kg, ms^{-1}]$$

$$W_{\Delta mj} = 931{,}5 \cdot \Delta m_j \quad [MeV, u]$$

Dosadíme-li v této rovnici za kilogramy a jouly jednotky obvyklé v jaderné fyzice, tj. atomové hmotnostní jednotky (u) a megaelektronvolty (MeV) pro které platí převodní vztahy:

$$1u = 1{,}6605655 \quad 10^{-27}\, kg \quad a \quad 1\ MeV = 1{,}60219 \quad 10^{-13}\, J\ ,$$

dostaneme při rychlosti světla ve vakuu $c = 2{,}997925 \cdot 10^8$ $m.s^{-1}$ jednoduchý vztah určující vazební energii odpovídající hmotnostnímu schodku ve tvaru:

$$W_{\Delta mj} = 931{,}5 \cdot \Delta m_j \quad [MeV, u]$$

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

Podíl vazební energie jádra a hmotnostního (nukleonového) čísla se nazývá **<u>nukleonová vazební energie</u>** – $e_{\Delta mj}$

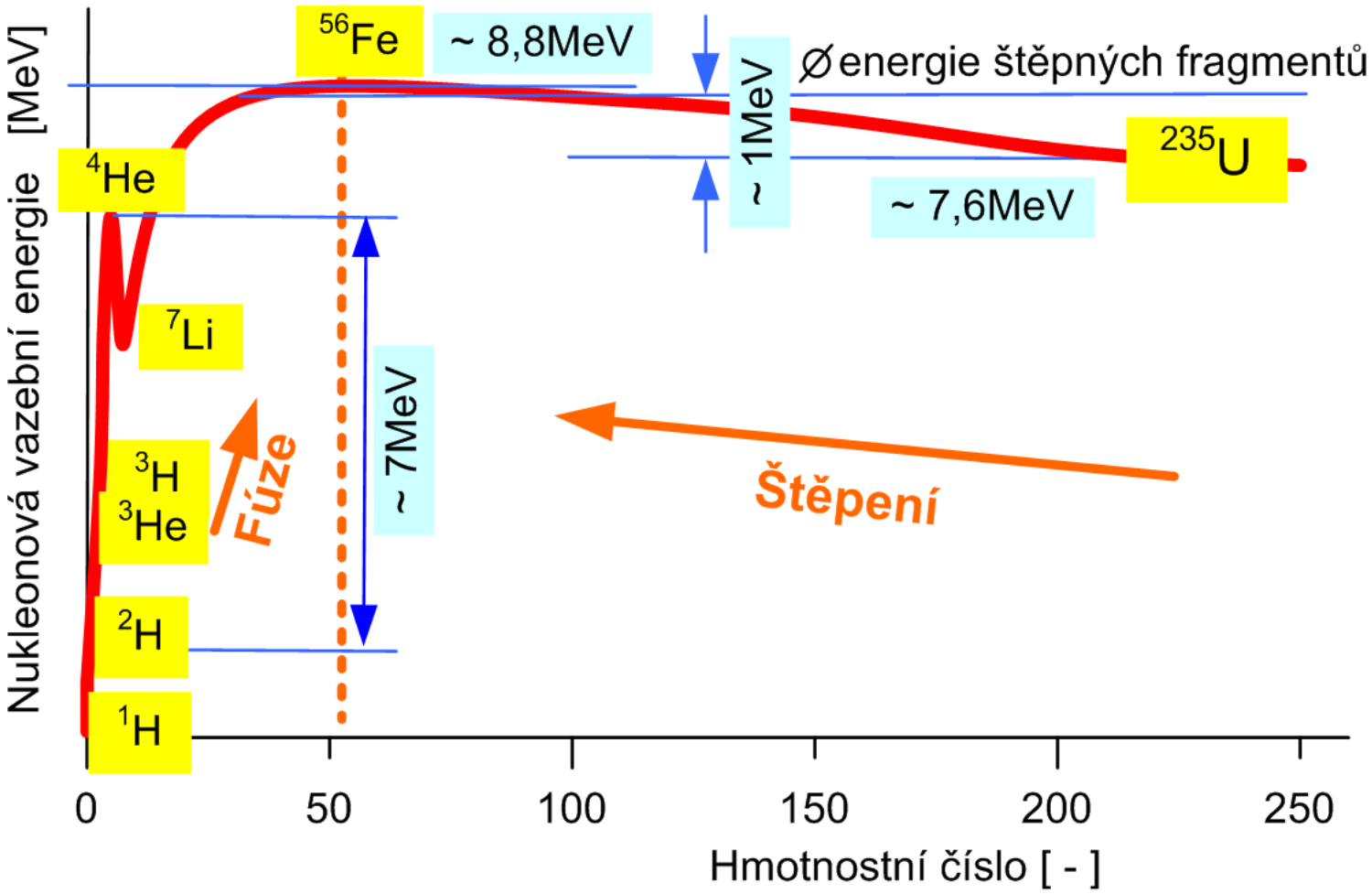
$$e_{\Delta mj} = W_{\Delta mj} / A \quad [MeV]$$

Nukleonová (též střední nebo průměrná) **vazební energie** není konstantní. Přibližně do hodnoty A = 20 prudce stoupá s velkým rozptylem hodnot, v úseku mezi A = 30 a A = 150 je téměř plochá s maximem okolo A = 60 kde $e_{\Delta mj}$ = 8,8 MeV a pak s rostoucím A pozvolna klesá k hodnotě $e_{\Delta mj}$ = 7,6 MeV.

Bude-li součet vazebních energií nově vzniklých jader větší, než vazební energie původních, lze touto reakcí získat energii. Při štěpení jádra s vazební energií $W_{\Delta mj}$ na dva odštěpky s vazebními energiemi jader $W_{\Delta mj1}$ a $W_{\Delta mj2}$, resp. s nukleonovými vazebními energiemi $e_{\Delta mj1}$ a $e_{\Delta mj2}$, se uvolní energie v MeV:

$$W_š = W_{\Delta mj1} + W_{\Delta mj2} - W_{\Delta mj} = e_{\Delta mj1} \cdot A_1 + e_{\Delta mj2} \cdot A_2 - e_{\Delta mj} \cdot A$$

Jaderné elektrárny – poměrná vazební energie



Pravděpodobnost neutronových jaderných reakcí.

Neutron (obecně částice) procházející vrstvou látky může vyvolat některou z jaderných reakcí. Je-li látka i proud neutronů homogenní, lze popsat vzniklé reakce statisticky a veličinám přiřadit jejich střední hodnoty. Typ jaderné reakce způsobené neutronem je závislý především na druhu terčového jádra a na energii neutronu. Míru pravděpodobnosti, že dojde k určité reakci nazýváme *účinný průřez* pro tuto reakci. Účinný průřez můžeme vztáhnout na pomyslnou rovnou desku o síle jednoho jádra, pak má název *mikroskopický účinný průřez*, nebo na jednotku objemu, pak se nazývá *makroskopický účinný průřez.*

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

Mikroskopický účinný průřez má vzhledem k rozměrům jádra velmi malou hodnotu (do $10^{-25}m^2$), proto byla pro mikroskopicky účinný průřez zvolena jednotka $10^{-28}m^2$, dříve zvaná barn. Výraz „mikroskopický účinný průřez“ se v odborné literatuře vzhledem k jeho častějšímu použití (v místech kde nemůže dojít k omylu) zkracuje na účinný průřez.

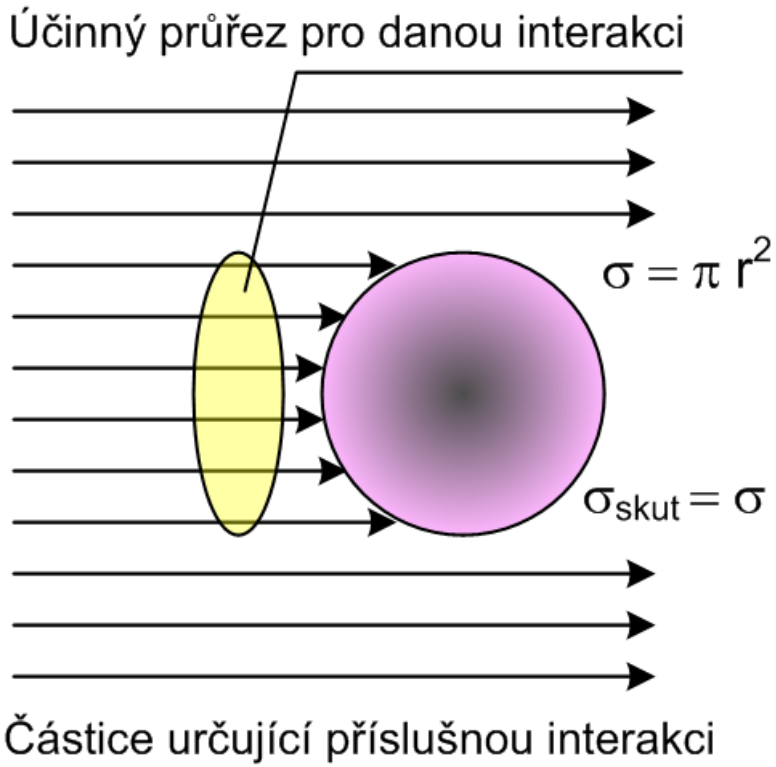
V jaderné energetice jsou nejdůležitějšími účinnými průřezy účinný průřez pro: štěpení, absorpci, zachycení, rozptyl, pružný rozptyl a nepružný rozptyl.

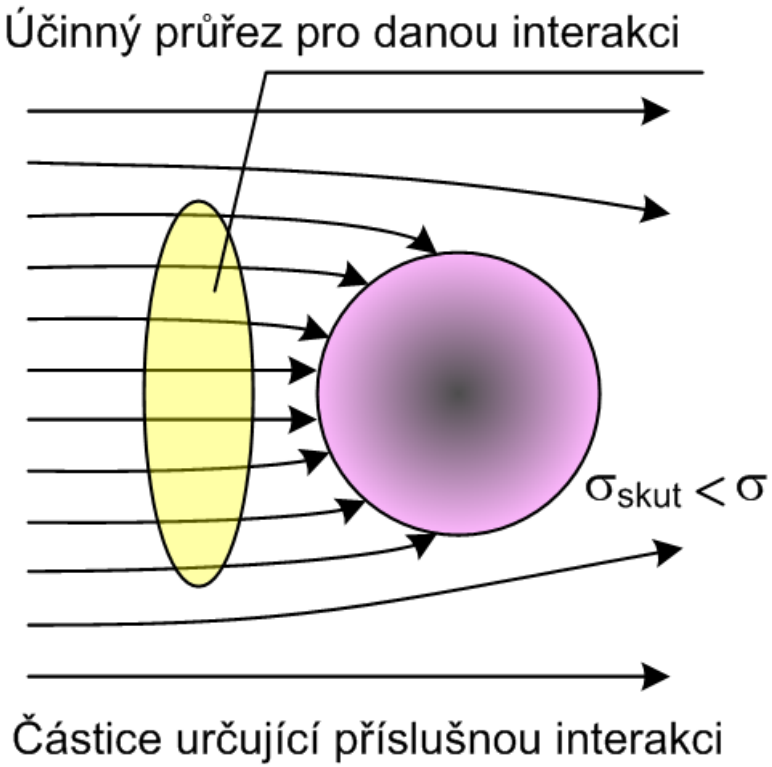
Jednotlivé účinné průřezy se zjišťují experimentálně. U absorpce jsou rozdíly hodnot účinných průřezů vysoké. Kromě závislosti na typu částice a jádra, jsou značně závislé i na energii dopadajícího neutronu. Např. u izotopu U235 je účinný průřez pro štěpení tepelnými neutrony téměř 500 krát vyšší, než pro štěpení rychlými neutrony.

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

Rozdíly absorpčních průřezů jsou podstatné i u izotopů téhož prvku. Např. u izotopu U238 je účinný průřez pro štěpení tepelnými neutrony prakticky nulový. U většiny těžkých prvků závisí účinný průřez pro absorpci (štěpnou i neštěpnou) nepřímoúměrně na jejich rychlosti, resp. na odmocnině z jejich kinetické energie, a to především v oblastech nižších energií. Závislost nemá u většiny těžkých prvků hladký průběh, v tzv. rezonanční oblasti má několik extrémně vysokých špiček zvyšujících účinný průřez pro absorpci (pro její neštěpnou část, respektive účinný průřez pro zachycení) až o tři až čtyři řády. Rezonanční oblast leží při spodní hranici epitermál-ních energií neutronů (0,1 až 5000 eV). Např. u U238 je tato oblast 5 až 2000 eV. Rozdíl hodnot u rozptylu je poměrně malý, pro většinu prvků leží v intervalu (1 až 13) $\cdot 10^{-28}$ m^2.

Jaderné elektrárny - fyzikální základy
Účinný průřez

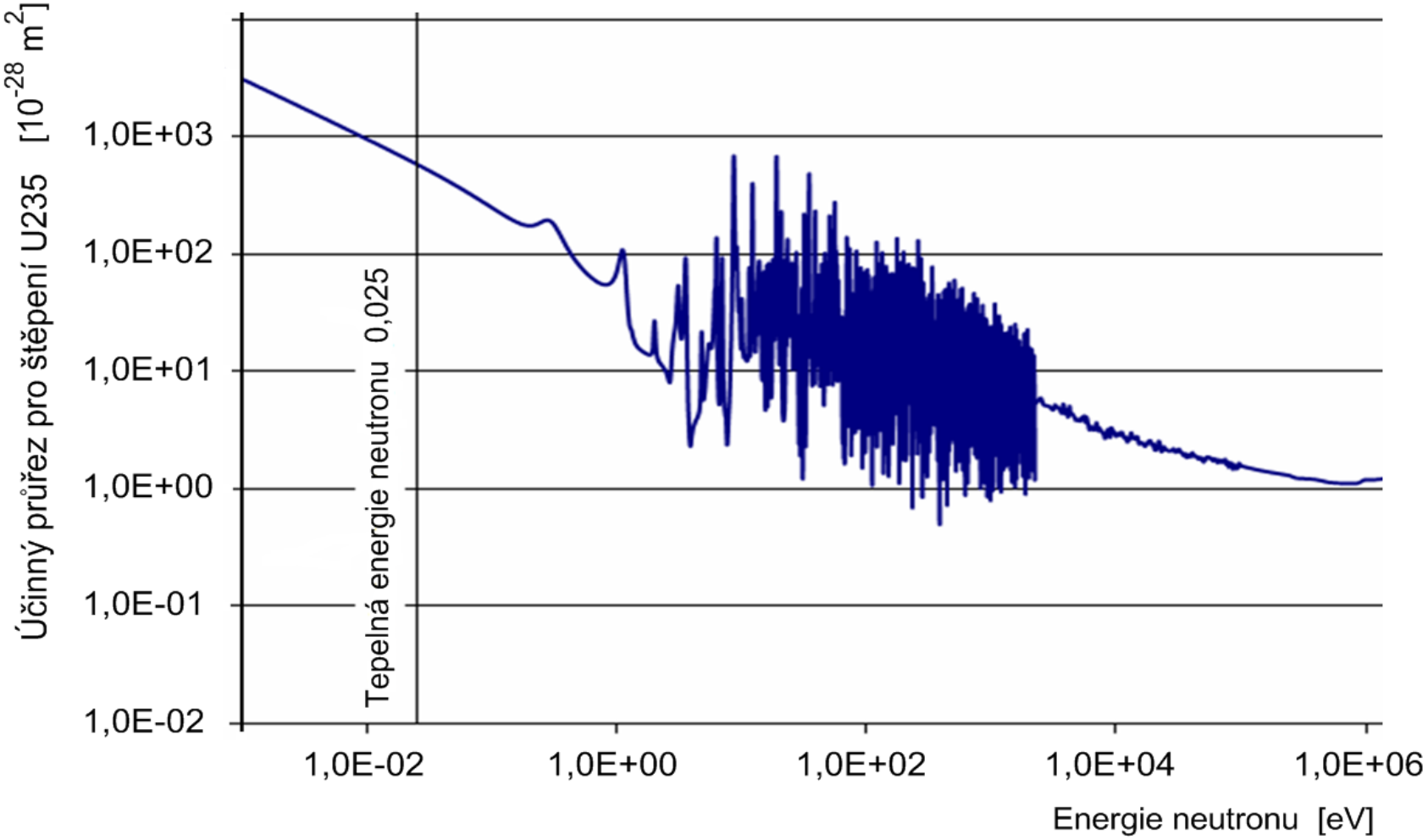




Střední volná dráha λ. **Prochází-li neutronový tok kolmo homogenním prostředím klesá jeho mohutnost exponenciálně s tloušťkou vrstvy. Dráha, respektive síla vrstvy při které poklesne tento tok na 1/e původní hodnoty se nazývá střední volná dráha pro příslušnou interakci. U rozptylu odpovídá střední volná dráha střední vzdálenosti, kterou neutron urazí mezi dvěmi po sobě následujícími srážkami.**

Podíl střední logaritmické ztráty energie ξ**, a střední volné dráhy pro rozptyl** λ **nazýváme *moderační schopnost*. Tato vlastnost je jedním z kvalitativních měřítek moderátoru. Další důležitou charakteristikou moderátoru je součinitel moderace daný podílem moderační schopnosti a makroskopického účinného průřezu pro absorpci. Součinitel moderace nejlépe vystihuje kvalitu moderátoru z hlediska neutronové bilance v reaktoru, neboť kromě rychlosti moderace zahrnuje i úbytek neutronů při interakcích.**

Jaderné elektrárny - fyzikální základy
Účinný průřez pro štěpení U235 v závislosti na energii neutronu



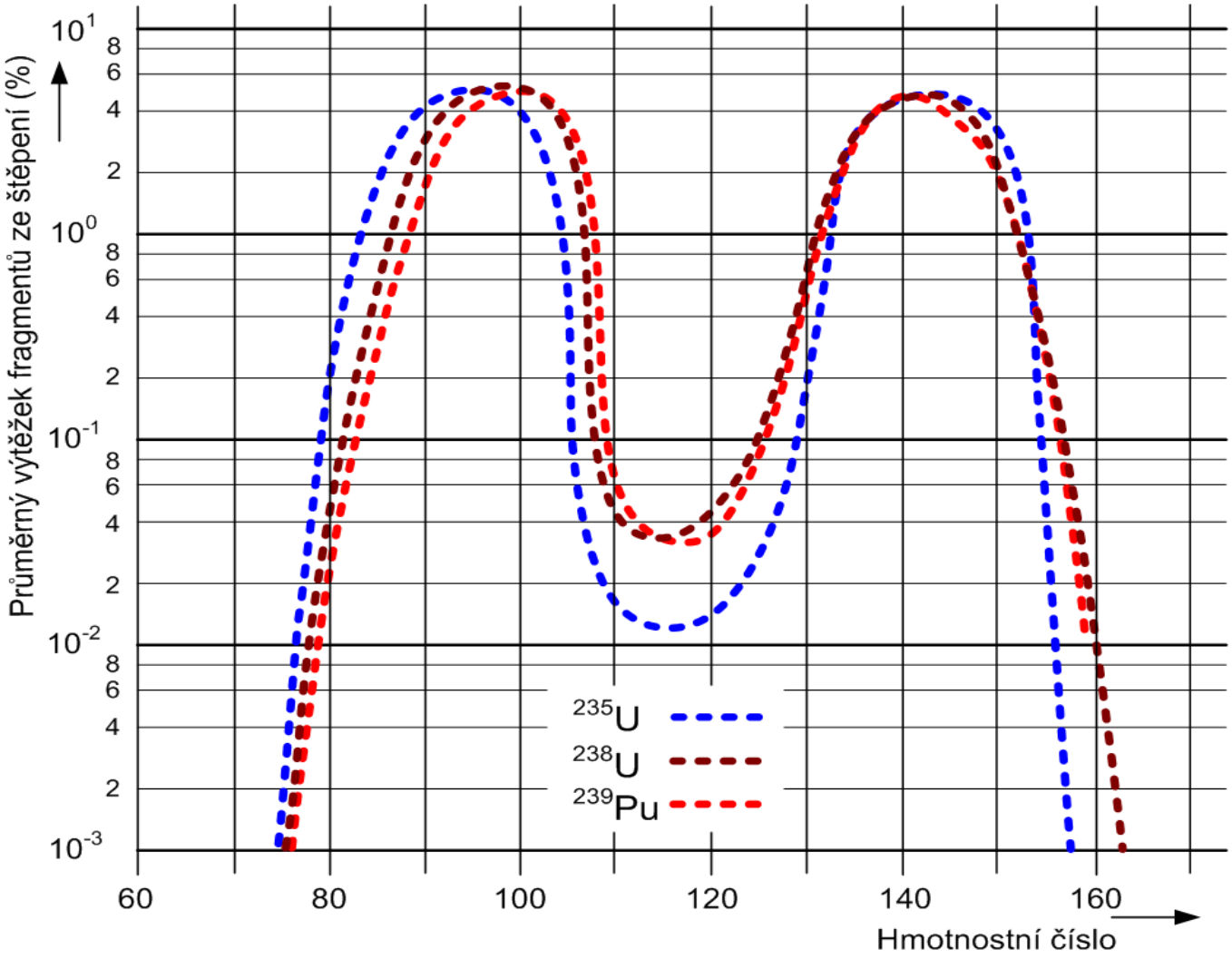
Jaderné elektrárny - fyzikální základy

Štěpení jádra.

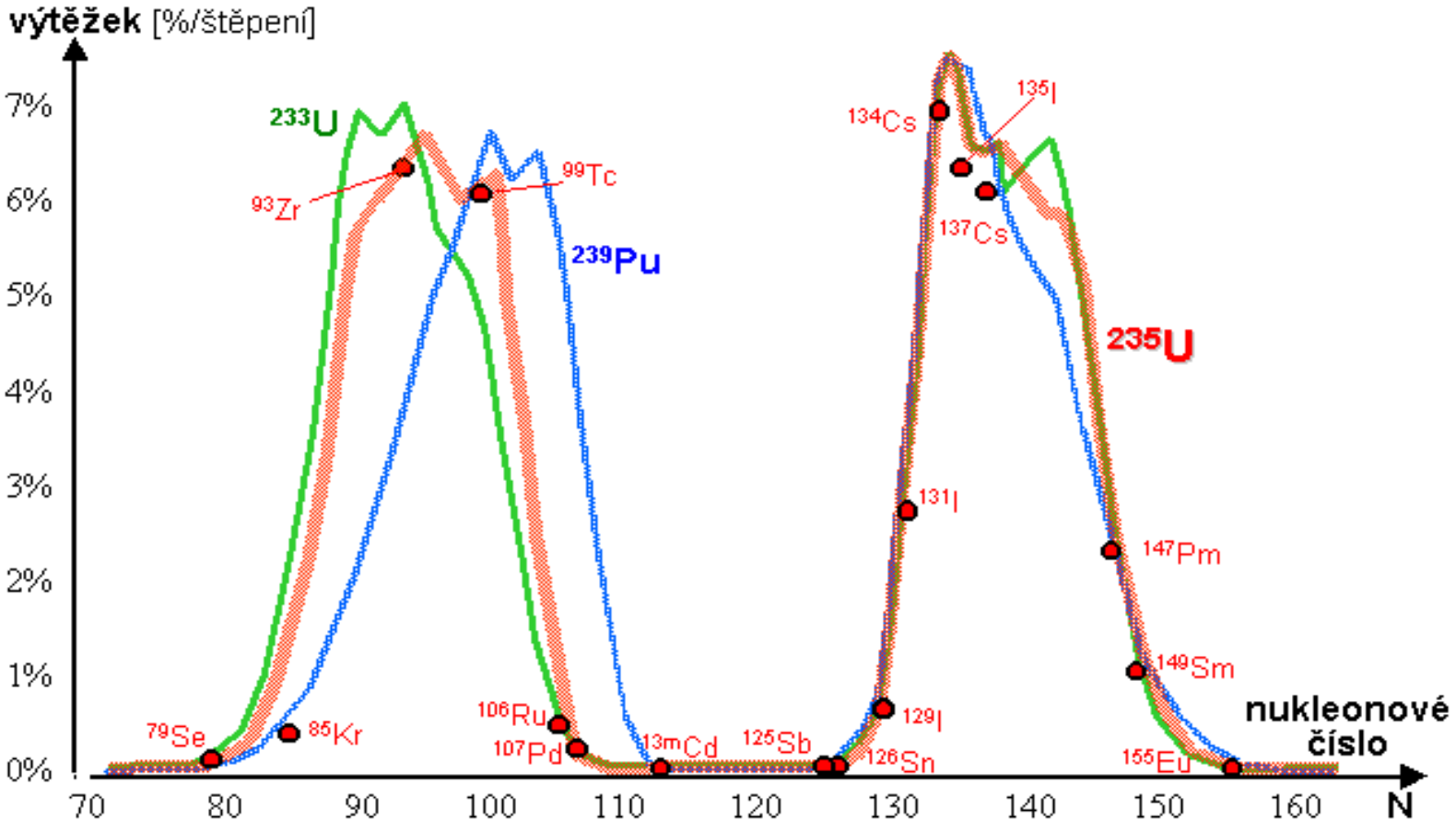
Po zachycení (absorpci) neutronu jádrem se zvýší energie nového složeného jádra o kinetickou energii neutronu a o podstatně vyšší energii vazební (stejnou jako tu, kterou bychom museli jádru dodat, aby nazpět uvolnilo neutron). Vzniklá excitační energie zvýší oscilace nukleonů. Je-li excitační energie vyšší než vazební, nukleony se od sebe více vzdalují a snižují tak působnost silných jaderných sil. Minimální excitační energie potřebná k rozdělení jádra se nazývá kritická energie neutronu pro štěpení .

Vycházíme-li z představy kapkového modelu, dostane vybuzené jádro protáhlý tvar a na vzdálenějších koncích přestanou působit silné jaderné síly a uplatní se jen síly odpudivé, elektrostatické. Pokud se energie nesníží uvolněním částice, nebo gama zářením, a silné jaderné síly nevrátí jádro zpět do kulovitého tvaru, dojde k jeho rozdělení na dva fragmenty a dva až tři volné neutrony. Součet kinetických energií obou fragmentů je asi 165 MeV.

Jaderné elektrárny – průměrný výtěžek ze štěpení



Jaderné elektrárny – průměrný výtěžek ze štěpení



Grafické znázornění závislosti zastoupení štěpných produktů (% výtěžnosti na 1 štěpení) na nukleonovém čísle při štěpení jader uranu-235, plutonia-239 a uranu-233 za účasti tepelných neutronů. Některé důležitější štěpené produkty z ^{235}U jsou vyznačeny kroužky v pozicích, odpovídajících výtěžnosti. (Vojtěch Ullmann)

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

Rozdělení energie mezi oba fragmenty není symetrické a souvisí také s jejich nestejnými hmotnostními čísly a pravděpodobností jejich získání. Nejvyšší pravděpodobnost nabyté energie je v okolí 98 MeV a 66 MeV. Kinetická energie fragmentů je hlavním zdrojem tepelné energie v reaktoru (cca 85 %). Ve fragmentech je zpravidla nadbytek neutronů oproti jejich stabilnímu izotopu. Z nich jsou dva až tři emitovány jako okamžité volné neutrony, v čase řádově 10^{-14} s. Jejich energetické spektrum je v rozmezí 0,1 až 17 MeV. Průměrná energie jednoho neutronu je asi 1,6 až 2 MeV. Některé fragmenty však mají stále ještě dostatek excitační energie a emitují s časovým zpožděním další volný neutron s nižší energií. Tomuto neutronu se říká zpožděný a má velký význam pro regulaci reaktoru, neboť prodlužuje průměrný život jedné generace všech volných neutronů.

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

Časový odstup vzniku zpožděných neutronů od štěpné reakce je závislý na poločasu rozpadu příslušného fragmentu, zpravidla jej rozdělujeme do šesti skupin.
Nutnou podmínkou pro štěpení je, aby kinetická energie neutronu byla vyšší, než rozdíl kritické a vazební energie. Např. u izotopů U233, U235, a Pu239 je kritická energie pro štěpení menší než vazební. Proto stačí k jejich štěpení i nízká energie tepelných neutronů. Naproti tomu u izotopu U238 je vazební energie asi 5,5 MeV a kritická energie asi 7 MeV, proto k jeho štěpení musí mít neutron kinetickou energii vyšší než 1,5 MeV. Tuto reakci tak může vyvolat jen neutron právě vzniklý (rychlý). Účinný průřez U238 je pro štěpení nízký, a pravděpodobnost této reakce je malá. Ale ani u izotopů, kde je kritická energie menší než vazební, nedochází vždy ke štěpení, a přebytečná energie se vyzáří gama zářením. Na příklad po zachycení neutronu jádrem U235 dojde ke štěpení s pravděpodobností asi 85 % .

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

Energie uvolněná při štěpné reakci

Průměrné rozdělení energií z jednoho štěpení uranu U235 je:

jednotky	[10^{-13} J]	[MeV]	[%]
kinetická energie odštěpků	265,0	165,4	83,4
energie volných neutronů	9,6	6,0	3,0
energie okamžitého záření gama	9,6	6,0	3,0
energie neutrin	17,8	11,1	5,6
energie záření gama při rozpadu	8,0	5,0	2,5
energie záření beta při rozpadu	8,0	5,0	2,5
celkem	318,0	198,0	100,0

Z energií uvedených v přehledu nemůže být využita energie neutrin, které nereagují s hmotou a opouštějí aktivní zónu. Také záření gama zachycené v biologickém stínění vyzáří část energie mimo reaktor. Na druhé straně neštěpné interakce neutronů přináší další zisk energie asi 4 MeV na jedno štěpení.

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

Pro U235 a U233 se udává využitelná energie asi 190 MeV, tj. 30,4 · 10-12 J, pro Pu239 asi 199 MeV, tj. 31,9 · 10^{-12} J na jedno štěpení. Teoretický výtěžek energie z jednotky hmotnosti lze tedy vypočítat vynásobíme-li počet atomů štěpitelného prvku v této jednotce využitelnou energií na jedno štěpení.

Jako příklad si uveďme výpočet teoreticky využitelné energie získané rozštěpením 1kg U235. 1 kg U235 obsahuje N_A / A atomů, to je po dosazení Avogadrovy konstanty N_A a hmotnostního čísla A uranu U235:

$$6{,}022 \cdot 10^{26} \;/\; 235 = 2{,}56 \cdot 10^{24} \text{ atomů.}$$

Rozštěpením všech jader U 235 se uvolní energie:

$$W = 2{,}56 \cdot 10^{24} \cdot 30{,}4 \cdot 10^{-12} = 7{,}78 \cdot 10^{13}\ \text{J} \cong 2{,}13 \cdot 10^{7}\ \text{kWh} \cong \underline{900\text{MWd}}$$

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

V přírodním uranu je jen 0,712 % izotopů U 235. Pro některé typy reaktorů se jeho obsah uměle zvyšuje - dochází k tzv. obohacení paliva. V jaderných elektrárnách s tlakovodními reaktory o elektrickém výkonu 1000 MW, je průměrné obohacení paliva ve vsázce kolem 3 % . V takové elektrárně by, při obvyklém vyhoření paliva na 1% a při účinnosti 33%, činila hmotnost samotného paliva v kg při ročním nepřetržitém provozu na jmenovitém výkonu přibližně:

$$(P \cdot t_k \;/\; \eta_e \cdot W_d) \cdot 100 \;/\; \Delta_{ou} =$$

$$= (1000 \cdot 365 \;/\; 0{,}33 \cdot 900) \cdot 100 \;/\; 2 \cong \underline{61{,}5 \cdot 10^3 \text{ kg}}$$

kde:

P - elektrický výkon elektrárny v MW,

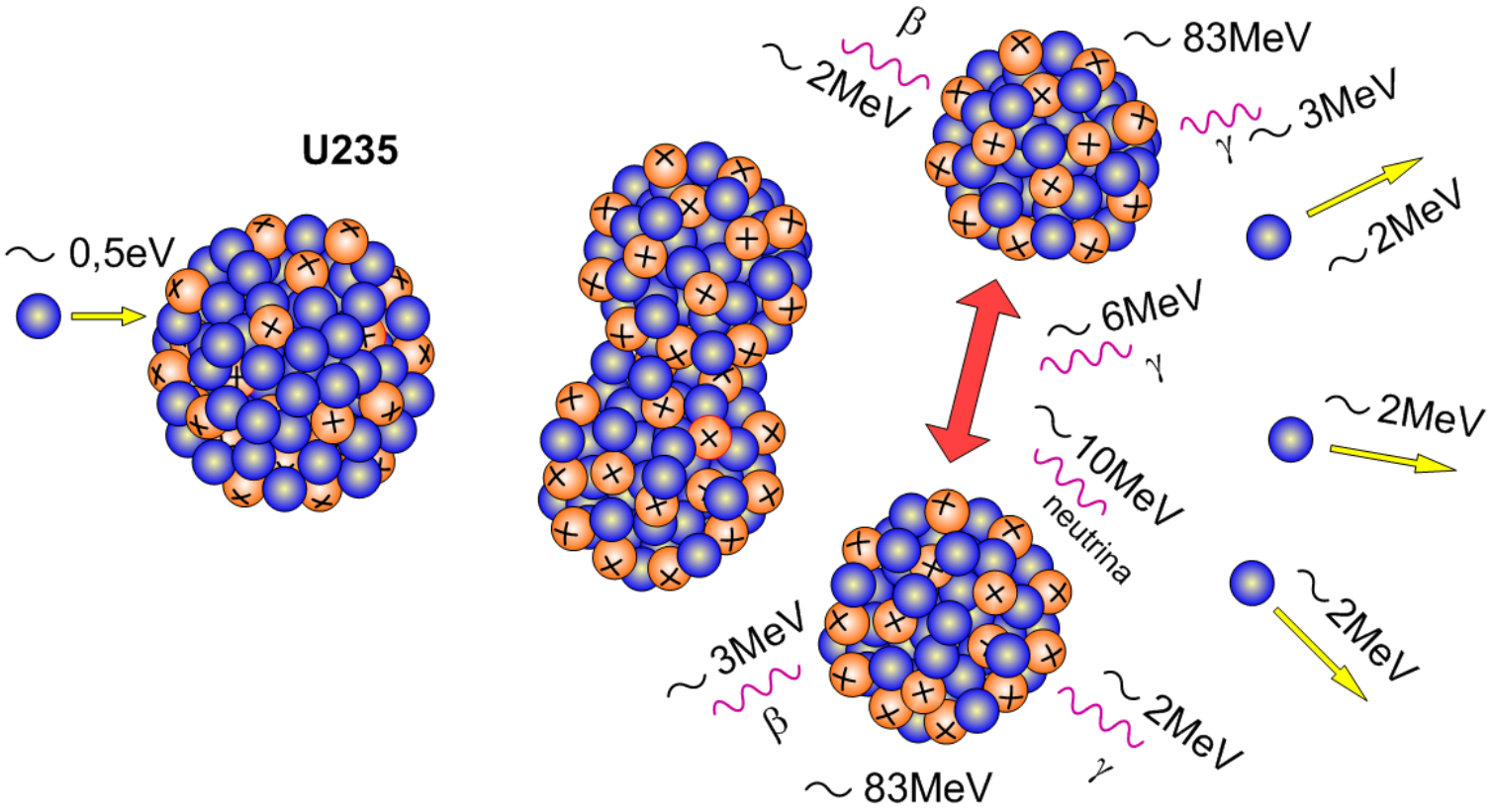
t_k - doba pobytu paliva v reaktoru ve dnech,

η_e - účinnost výroby el. energie,

W_d - vytěžitelná energie z 1 kg paliva v MWd

Δ_{ou} - snížení obohacení paliva v procentech

Jaderné elektrárny - fyzikální základy
Štěpení U235 s průměrně generovanými energiemi



Řetězová reakce

Při jednom štěpení U235 vzniká průměrně 2,5 volných neutronů, každý s energií přibližně 2 MeV. K udržení řetězové reakce musí zůstat pro další štěpení minimálně jeden neutron s energií 1eV a nižší, tzn., že musíme neutronům snížit energii (rychlost) o více jak šest řádů, a přibližně 40% jich zachovat pro následující štěpné reakce. Zbývajících 60% neutronů, které se nepodílí na štěpné reakci, je většina absorbována v palivu, moderátoru, chladivu, v konstrukčních materiálech a záměrně instalovaných absorbátorech

Předpoklad pro udržení řetězové reakce se často vyjadřuje ***multiplikačním činitelem*** „***k***“ (koeficientem násobení neutronů). Je to poměr počtu volných neutronů jedné generace k počtu neutronů předcházející generace.

Multiplikační činitel rozlišujeme podle toho, zda je určen pro nekonečné prostředí, který značíme $\mathbf{k}_\infty$ a používáme uvedený název, nebo pro konečné (reálné) prostředí kde uvažujeme únik neutronů ze soustavy, ten nazýváme ***efektivní multiplikační činitel*** a značíme k_{ef}. Z hlediska rozvoje řetězové reakce mohou nastat tyto případy:

$k_{ef} > 1$ - soustava je ***nadkritická***, počet štěpení exponenciálně stoupá

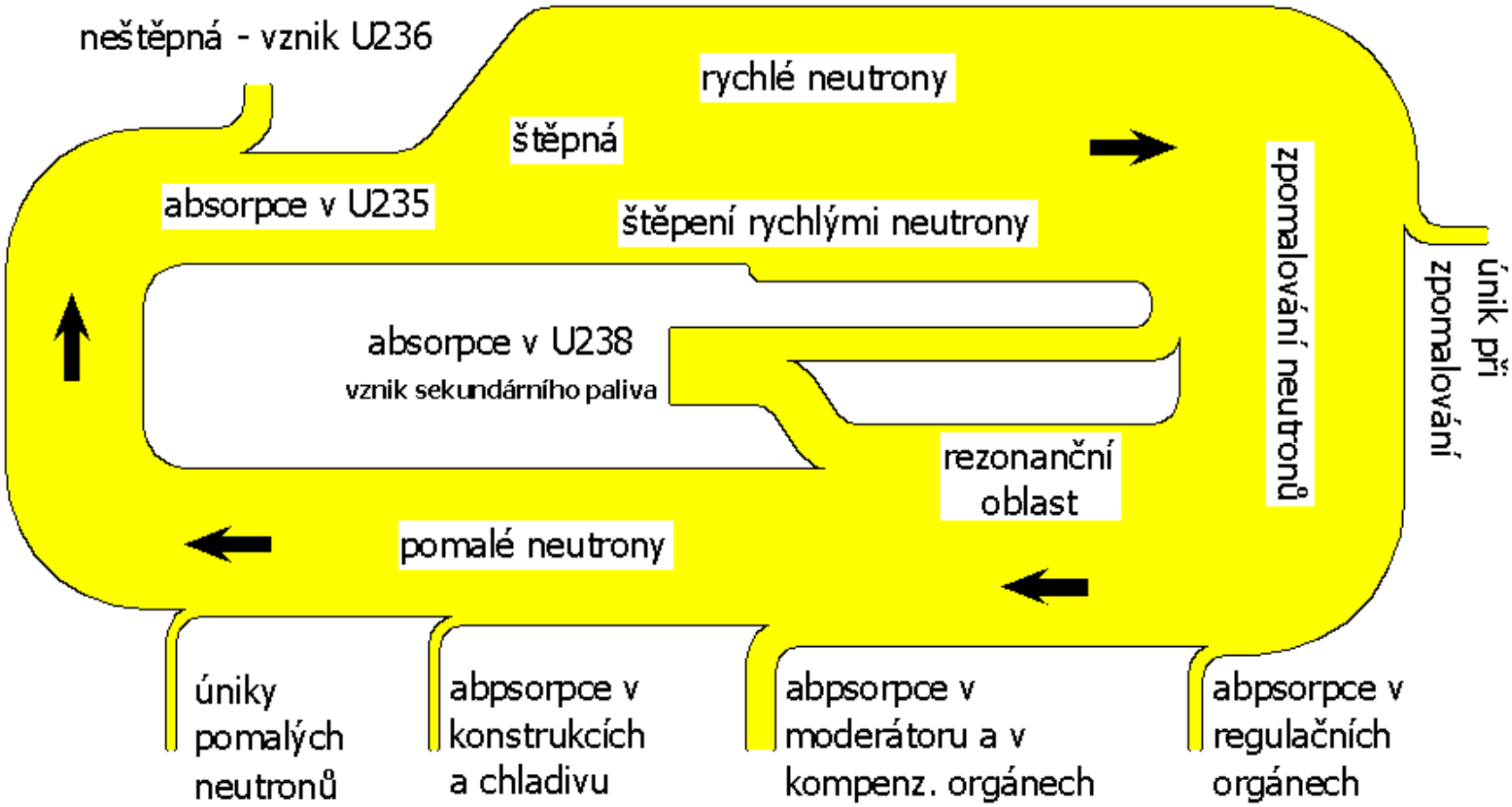
$k_{ef} = 1$ - soustava je ***kritická***, počet štěpení se nemění

$k_{ef} < 1$ - soustava je ***podkritická***, počet štěpení se exponenciálně snižuje

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

ŽIVOTOPIS NEUTRONŮ V TEPELNÉM REAKTORU

(pro multiplikační koeficient $K_{ef}=1$)



Jaderné elektrárny - fyzikální základy

Velikost multiplikačního činitele je závislá na mnoha parametrech soustavy, jejichž vliv se zpravidla zahrnuje do čtyř součinitelů:

$$\mathbf{k_\infty = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f\ [-]}$$

kde význam jednotlivých součinitelů je :

1) **η - *součinitel reprodukce neutronů***. Vyjadřuje střední počet okamžitých i zpožděných neutronů uvolněných jedním *pomalým* neutronem absorbovaným (štěpně i neštěpně) v palivu. Jeho hodnota roste u uranu podle stupně obohacení izotopem U235 od η = 1,34 pro přírodní uran, po η = 2,07 pro čistý U235. Při obohacení přírodního uranu na 2 % je např. η = 1,74.

2) **ε - *multiplikační součinitel rychlých neutronů***. Je to poměr celkového počtu neutronů vzniklých při štěpení účinkem neutronů všech energií, k počtu neutronů, vzniklých při štěpení jen pomalými neutrony. Část rychlých neutronů vyvolá v izotopu U 238 štěpnou reakci, po které se zvýší počet volných neutronů asi o 3 – 5 %, tomu odpovídá ε = 1,03 - 1,05. U rychlých, množivých reaktorů, vzhledem k absenci moderátoru, " vyšší hustotě " paliva v aktivní zóně a vyššímu obohacení paliva, je jeho hodnota vyšší - až 30 %, tj. ε = 1,3.

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

3) **p** - ***součinitel pravděpodobnosti úniku rezonanční absorpci***. Vyjadřuje pravděpodobnost toho, že neutron během zpomalování nebude pohlcen v tzv. rezonanční oblasti uranu U238 aniž by způsobil štěpení. Hodnoty tohoto součinitele jsou v rozmezí p = 0,85 pro přírodní uran, až po p = 1 pro U235. Se vzrůstající teplotou mírně klesá. Závisí také na vlastnostech moderátorů (rychlosti snižování energie neutronů) a uspořádání paliva v AZ.

4) **f** - ***součinitel využití tepelných neutronů***. Vyjadřuje poměr počtu tepelných neutronů, absorbovaných palivem, k celkovému počtu absorbovaných tepelných neutronů.

Vzhledem ke konečným rozměrům reaktoru, dochází během „života neutronů“ k jejich úniku z aktivní zóny. Tento nezanedbatelný jev lze ovlivnit především tvarem aktivní zóny a reflektorem, vracejícím část uniklých neutronů zpět do aktivní zóny. Optimální z hlediska tvaru je koule, neboť má nejmenší poměr povrchu k objemu. Z praktického hlediska je však aktivní zóna kulového tvaru u heterogenních reaktorů těžko realizovatelná.

$$\mathbf{k_{ef} = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f \cdot P = k_{\infty} \cdot P} \qquad [\,-\,]$$

Perioda reaktoru a vliv zpožděných neutronů

Pokud je multiplikační součinitel k_{ef} různý od jedné, změní se počet neutronů n v každé generaci na $n \cdot k_{ef}$, respektive o $n \cdot (k_{ef} - 1)$. Časovou změnu počtu neutronů lze vyjádřit vztahem

$$dn / dt = n \cdot (k_{ef} - 1) / T_a \; [\, s^{-1} \,]$$

kde T_a je střední doba života neutronů jedné generace.

Řešením této diferenciální rovnice dostaneme pro časovou závislost počtu neutronů

$$n = n_o \cdot e^{\,t\,(kef - 1) / Ta}$$

kde n_o je počet neutronů v čase t = 0

Obdobný vztah jako platí i pro hustotu neutronového toku. Doba za kterou vzroste počet neutronů, respektive hustota neutronového toku **e-krát** nazýváme **periodou reaktoru T_e**. Z předcházejícího vztahu platí pro T_e

$$n / n_o = e^{\,Te(kef - 1) / Ta} = e \;\Rightarrow T_e = T_a / (k_{ef} - 1)$$

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

Perioda reaktoru je mírou změny neutronového toku a tedy i výkonu reaktoru. Je velmi důležitou a stále sledovanou veličinou při provozu reaktoru. Na rychlosti změny výkonu reaktoru lze ukázat význam zpožděných neutronů. Okamžité neutrony mají střední dobu života asi 10^{-4} až 10^{-3} s. Zpožděné mají průměrnou dobu života (počítáno od okamžiku rozštěpení jádra) asi 12s. Podíl zpožděných neutronů je asi $\beta = 0{,}0065$, podíl okamžitých neutronů je $(1 - \beta)$, tj. asi 0,9935.

Pro

$$\mathbf{1 < k_{ef} < 1 / 0.9935 \approx 1 + \beta}$$

je sice soustava nadkritická pro všechny neutrony, ale jen pro okamžité neutrony je podkritická. Proto musíme uvažovat celkovou průměrnou dobu života neutronů tj. přibližně

$$\mathbf{T_a = 0{,}9935 \cdot 0{,}001 + 0{,}0065 \cdot 12 = 0{,}08\ s}$$

Jaderné elektrárny - fyzikální základy

V případě, že

$$\mathbf{k_{ef} > 1 / 0.9935 \approx 1 + \beta}$$

je soustava nadkritická i na okamžitých neutronech s nadkritičností pro okamžité neutrony $k_{efo} = k_{ef} - \beta$. Pro takovouto soustavu již ale platí hodnota $T_a = 0{,}001$s a rychlost změny neutronového toku a tím i výkonu se řídí úměrně vztahu

$$\mathbf{n = n_0 \cdot e^{(Kef - 1 - \beta)1000t}}$$

Z uvedené vztahu je patrné jak rychle by vzrůstal výkon reaktoru při překročení hodnoty k_{ef} nad hodnotu $1 + \beta$. Např. při zvýšení multiplikačního součinitele na 1,008 vzroste za 3s výkon přibližně $e^{4,5}$krát, tj. asi devadesátkrát. Při zvýšení na hodnotu $k_{ef} = 1{,}01$ výkon za 3s vzroste $e^{10,5}$ krát, tj. asi $36 \cdot 10^3$ krát. Z uvedených příkladů je zřejmé, že tato hranice $k_{ef} > 1 + \beta$ nesmí být nikdy překročena, ani u odstaveného nebo najížděného reaktoru. V reaktorech je řada zabezpečení, včetně omezení možnosti zvýšení multiplikačního součinitele nad přípustnou hodnotu regulačním systémem či chybným zásahem operátora, aby nemohlo k tomuto případu dojít.

Reaktivita a koeficienty reaktivity

V praxi je často používána místo multiplikačního koeficientu jeho poměrná hodnotu - **reaktivita**. Reaktivita reaktoru - ρ je definována jako poměrná hodnota přebytku **efektivního** multiplikačního činitele vztahem

$$\rho = (k_{ef} - 1) / k_{ef} \; [\,-\,]$$

reaktor je tedy při:

$\rho < 0$ **podkritický** (snižování výkonu reaktoru)

$\rho = 0$ **kritický** (udržování výkonu reaktoru)

$\rho > 0$ **nadkritický** (zvyšování výkonu reaktoru)

$\rho > \beta_{ef}$ **nadkritický na okamžitých neutronech** **(nepřípustný stav)**

Regulace reaktoru - výchozí rovnice:

neutrony : okamžité zpožděné z cizího zdroje

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{(1-\beta_{ef})k_{ef}(t)-1}{l} n(t) + \sum_{i=1}^{6} \lambda_i r_i(t) + S(t)$$

$$\frac{dr_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i k(t)}{l} n(t) - \lambda_i r_i(t)$$

$n(t)$	$[m^{-3}]$	- hustota tepelných neutronů
t	$[s]$	- čas
l	$[s]$	- doba života okamžitých neutronů
$k_{ef}(t)$	$[-]$	- multiplikační efektivní koeficient
λ_i	$[s^{-1}]$	- rozpadová konstanta i-té skupiny zpožděných neutronů
β_{ef}	$[-]$	- efektivní podíl všech zpožděných neutronů
$r_i(t)$	$[m^{-3}]$	- koncentrace mateřských jader zpožděných neutronů v i-té skupině
i	$[-]$	- počet uvažovaných skupin zpožděných neutronů
$S(t)$	$[s^{-1}]$	- vydatnost vnějšího zdroje neutronů

Regulace reaktoru - analogie pro výkon

Předchozí rovnice lze napsat i pro výkon reaktoru. $P(t)_{reakt} \approx n(t)$

Při zanedbání zpožděných neutronů bude:

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{(1-\beta_{ef})k_{ef}(t)-1}{l} P(t)$$

řešení:

$$P(t) = P_0 \exp\left\{\frac{1}{l}\int_0^t \left((1-\beta_{ef})k_{ef}(t)-1\right)dt\right\}$$

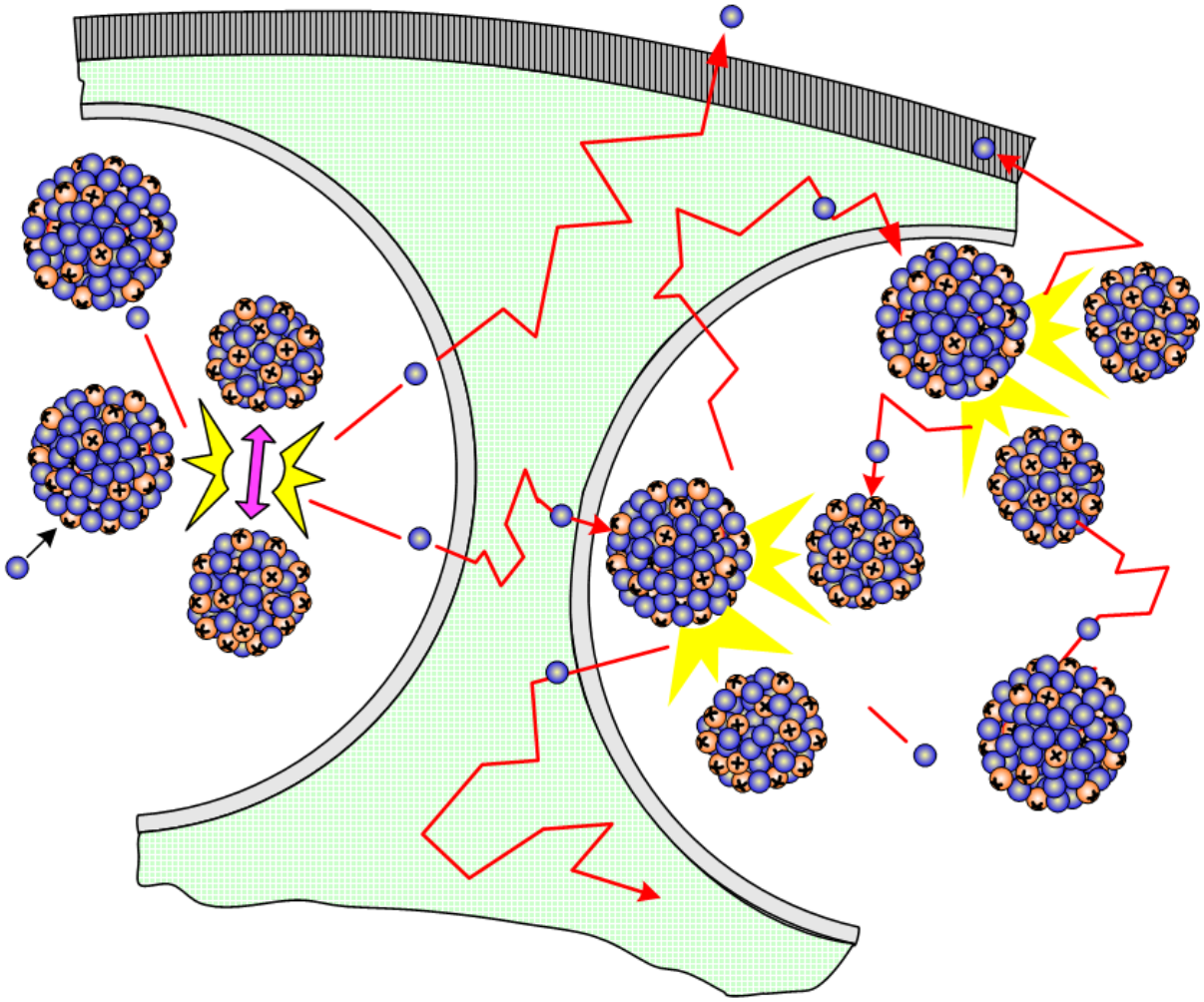
pro jednotkovou změnu : :

$$P(t) = P_0 \exp\left(\frac{(1-\beta_{ef})k_{ef}(t)-1}{l} t\right)$$

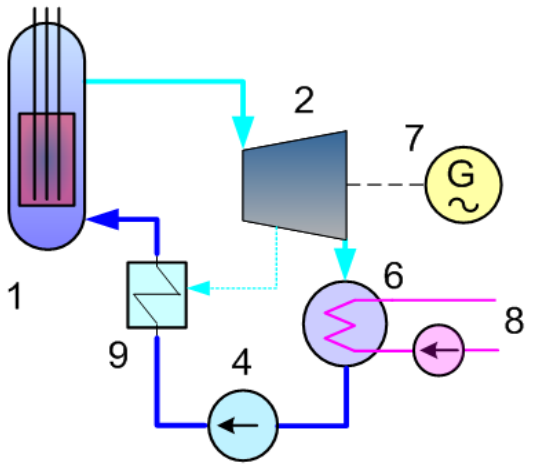
z toho plynou nutné podmínky pro povolený regulační rozsah:

$$\Rightarrow \quad \boxed{(1-\beta_{ef})k_{ef} \le 1 \qquad k_{ef} \le \frac{1}{1-\beta_{ef}}}$$

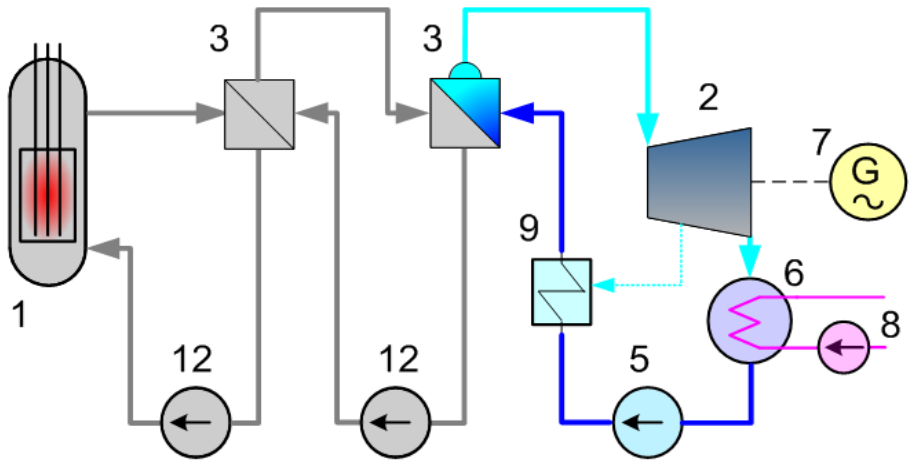
Jaderné elektrárny – různé historie neutronů



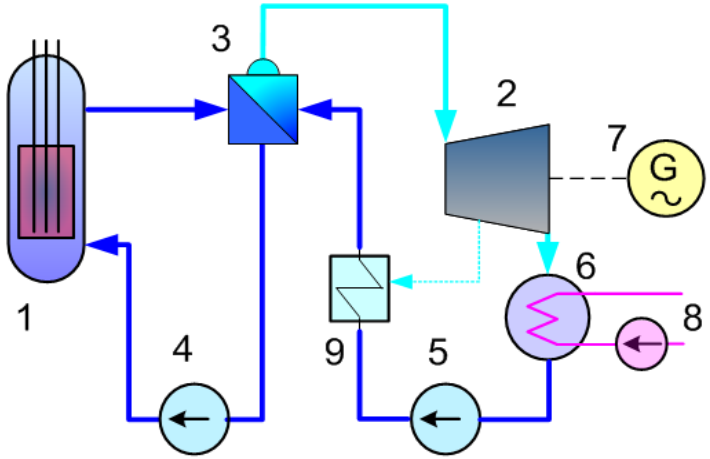
Jaderné elektrárny – příklady nejčastějších koncepcí JE



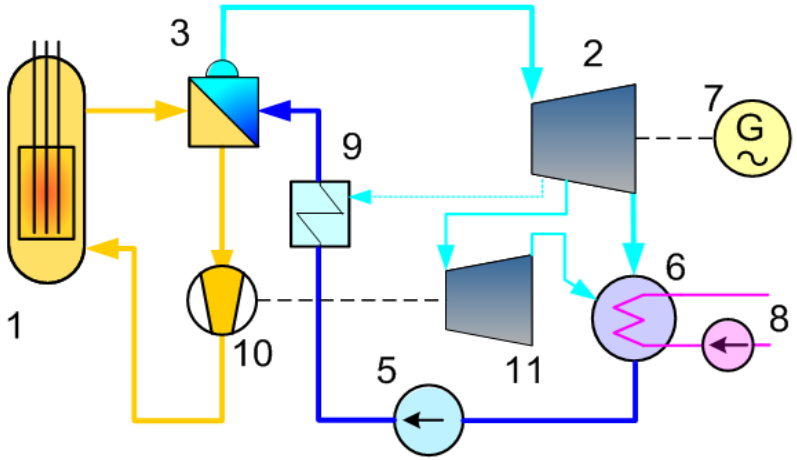
Jednookruhová s parní turbínou



Tříokruhová s chladivem ve formě tekutého kovu



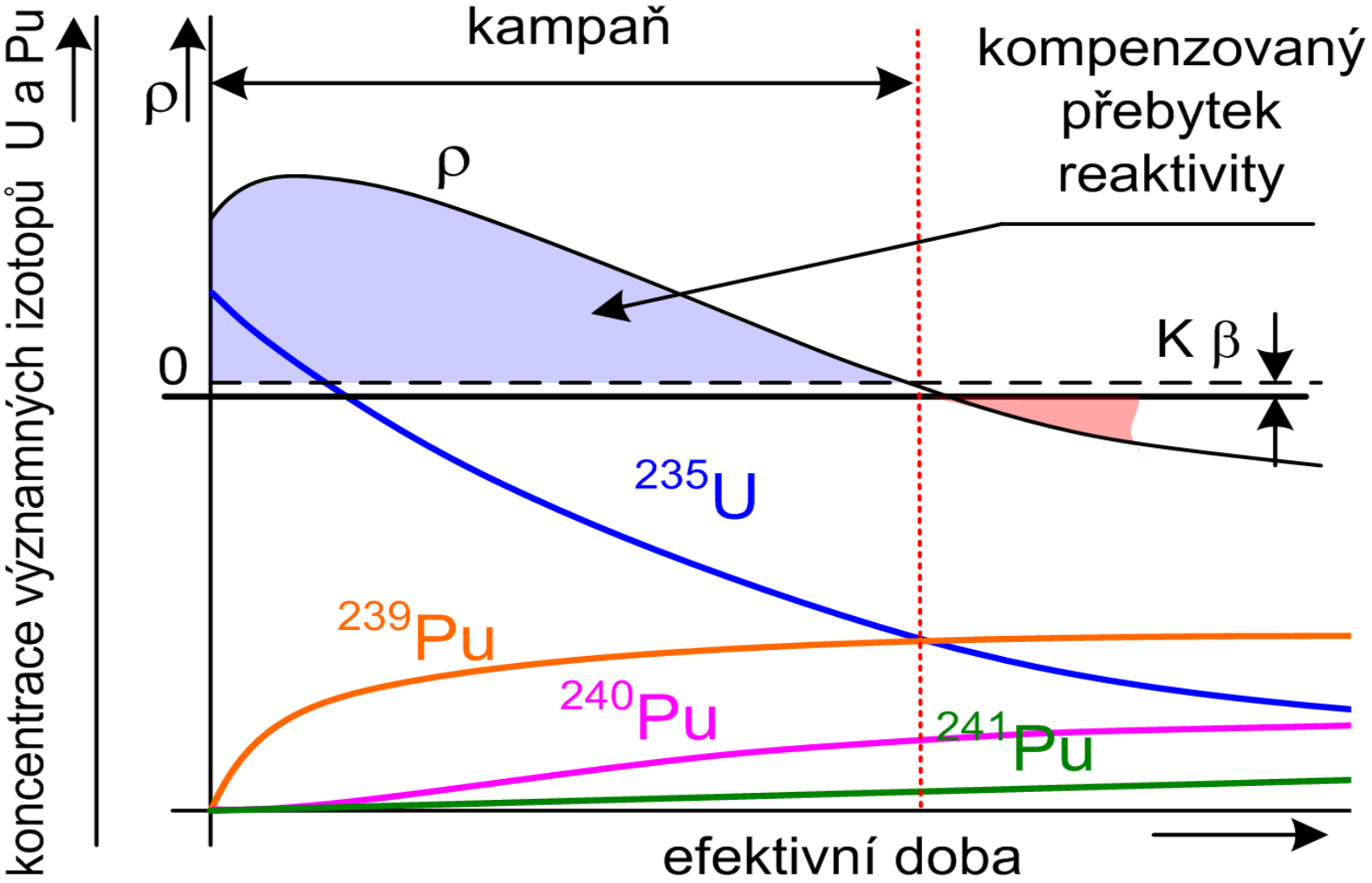
Dvouokruhová s parní turbínou



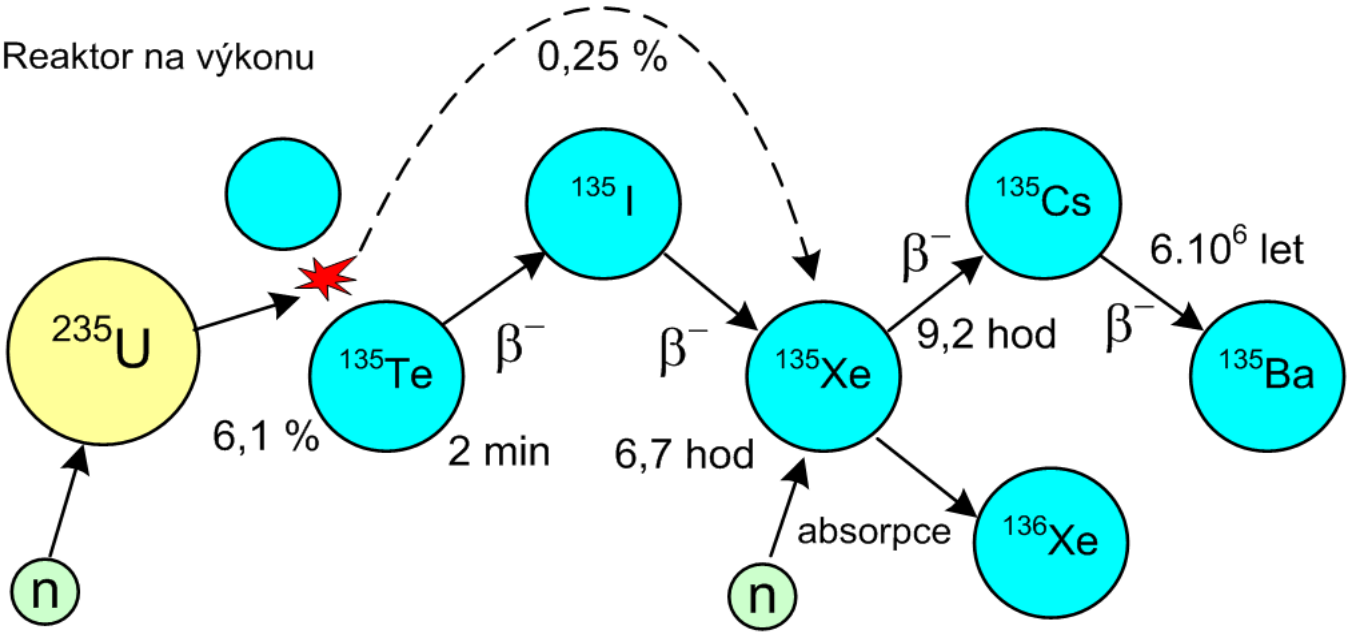
Dvouokruhová plynem chlazená s dmychadlem poháněným turbínou

Legenda: 1) reaktor, 2) turbína, 3) tepelný výměník, 4) oběhové čerpadlo, 5) napájecí čerpadlo, 6) kondenzátor, 7) generátor, 8) chladící okruh, 9) přihřívák, 10) oběh. dmychadlo, 11) pom. turbína, 12) sodíkové čerpadlo

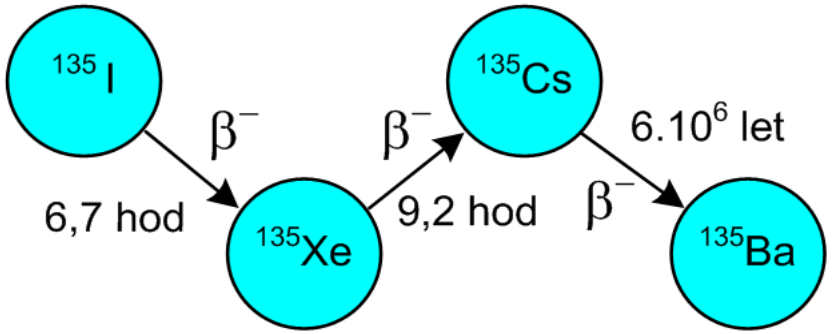
Jaderné elektrárny – průběh palivové kampaně



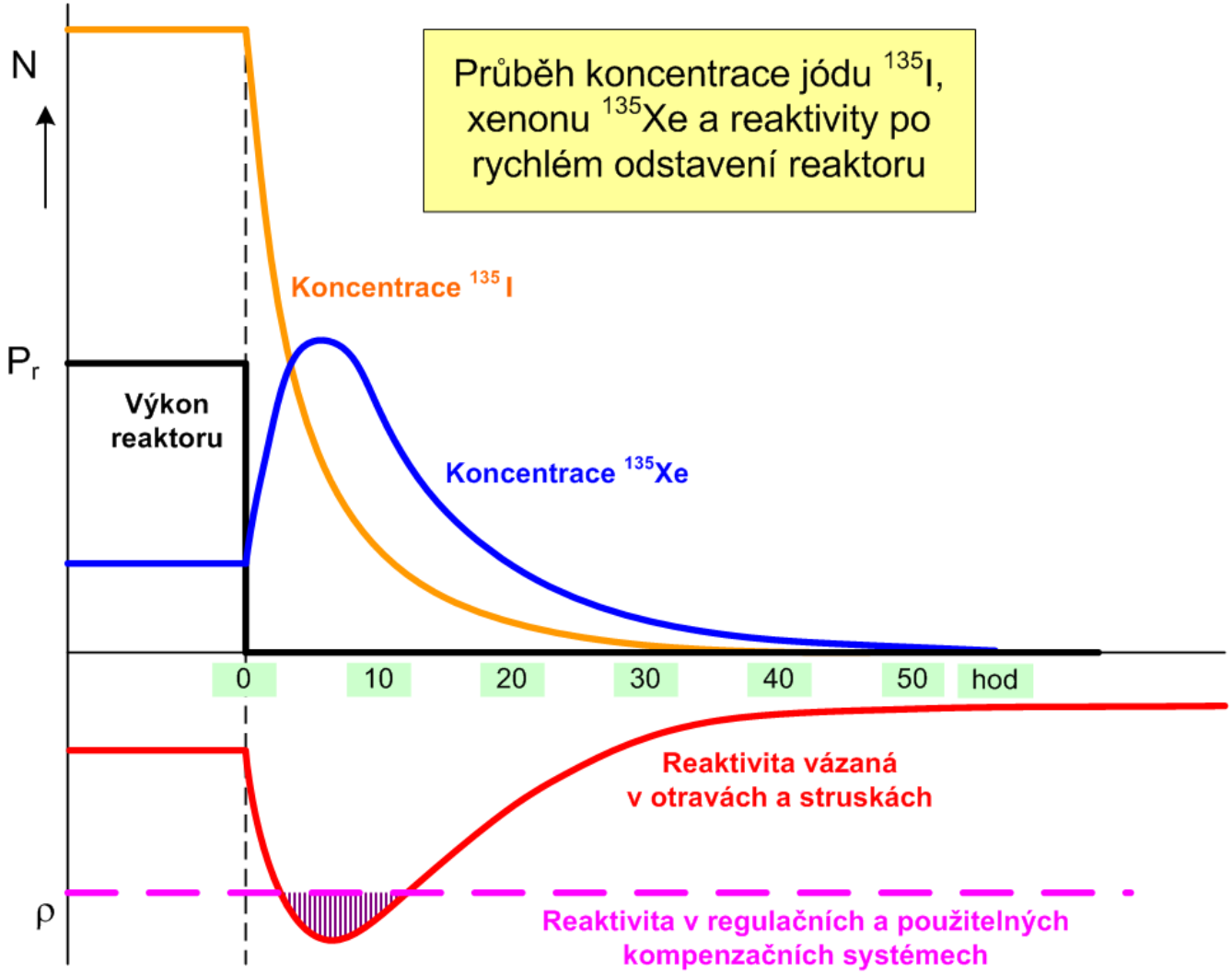
Jaderné elektrárny – vliv různých poločasů rozpadu



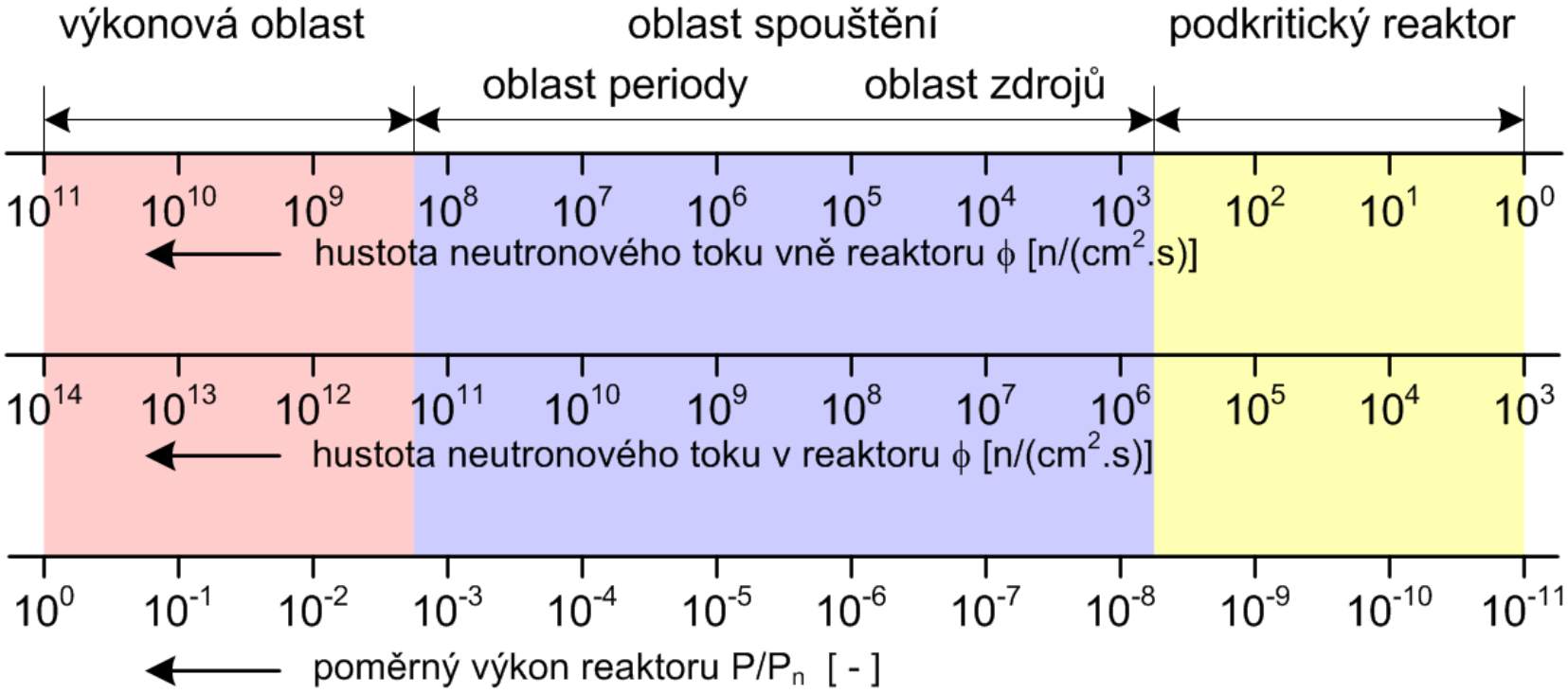
Stav po rychlém odstavení reaktoru, tj. v prostředí s minimem volných neutronů kde dochází jen k přirozenému rozpadu



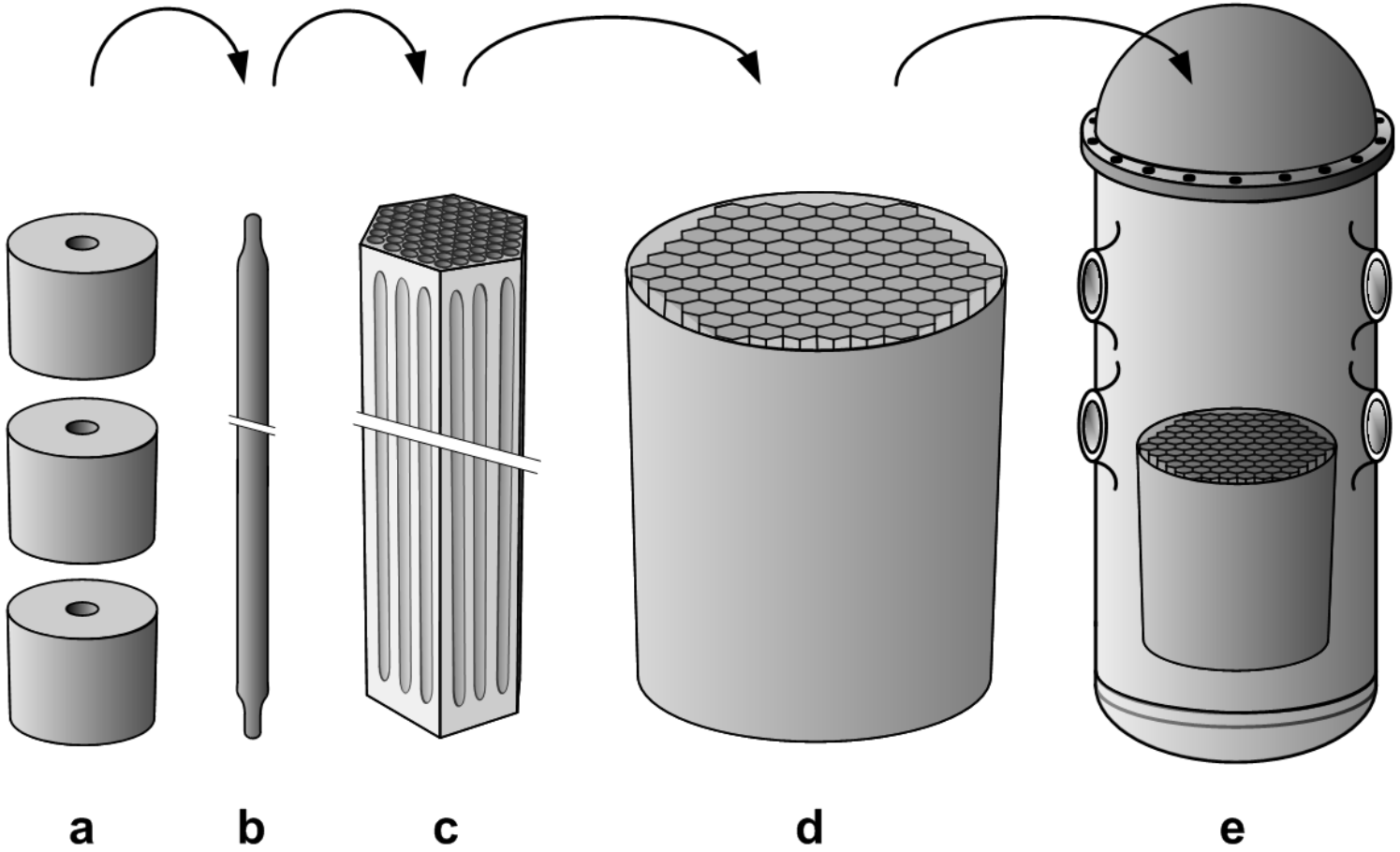
Jaderné elektrárny – vznik tzv. Jodové jámy



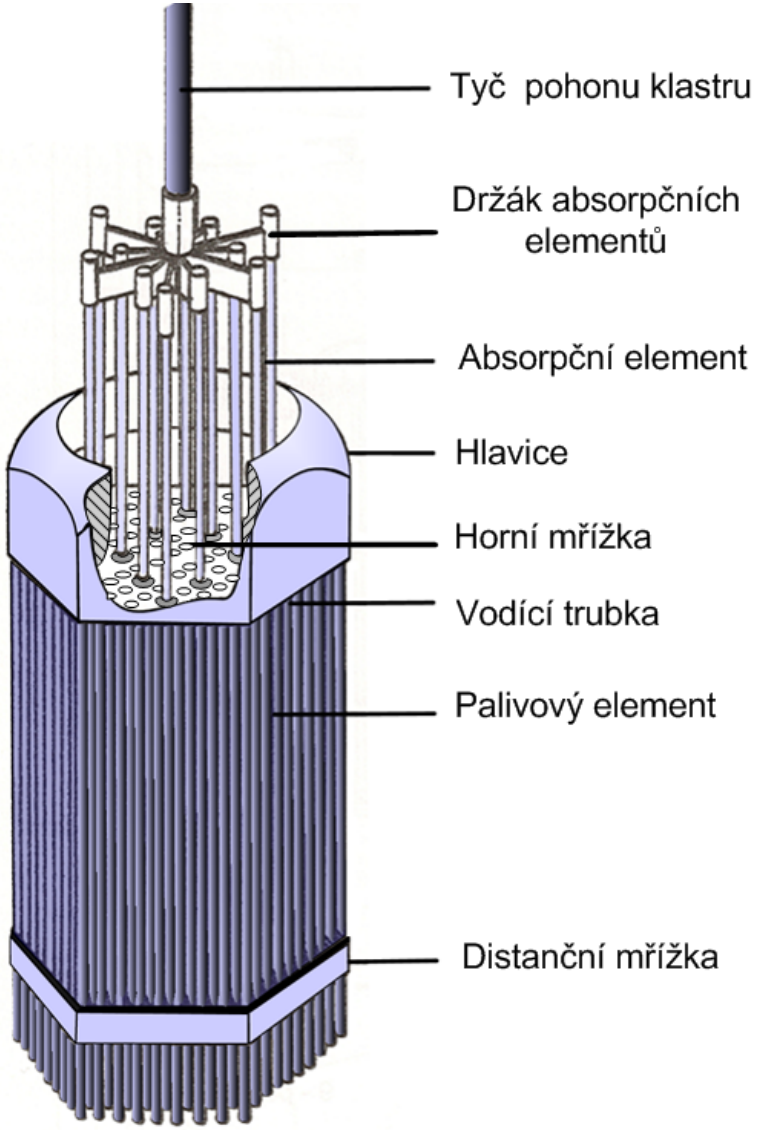
Jaderné elektrárny – neutronové toky v reaktoru a vně reaktoru pro jeho provozní rozsah



Jaderné elektrárny – složení AZ reaktoru JE

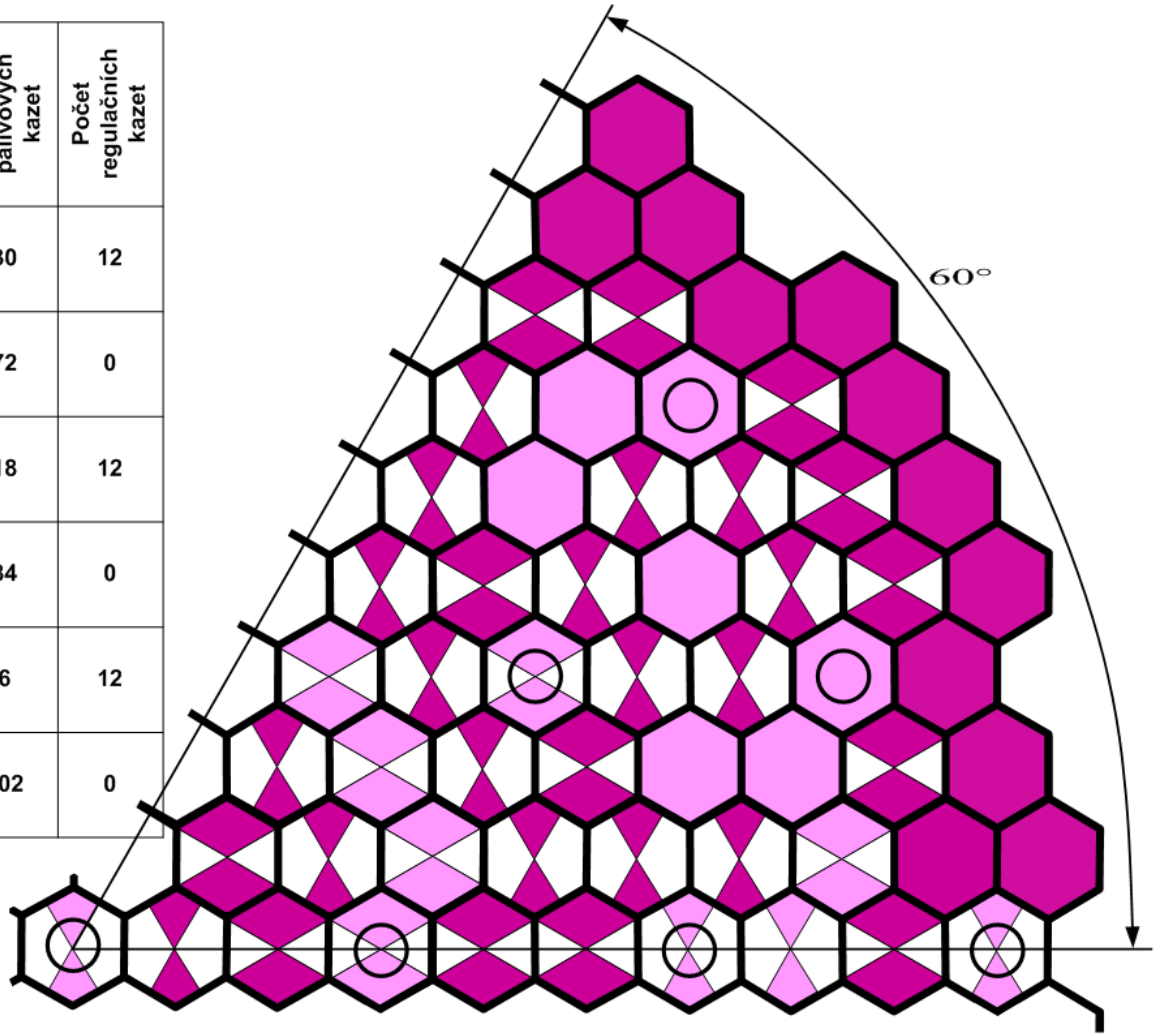


Jaderné elektrárny – složení palivového článku s absorpčními klastry

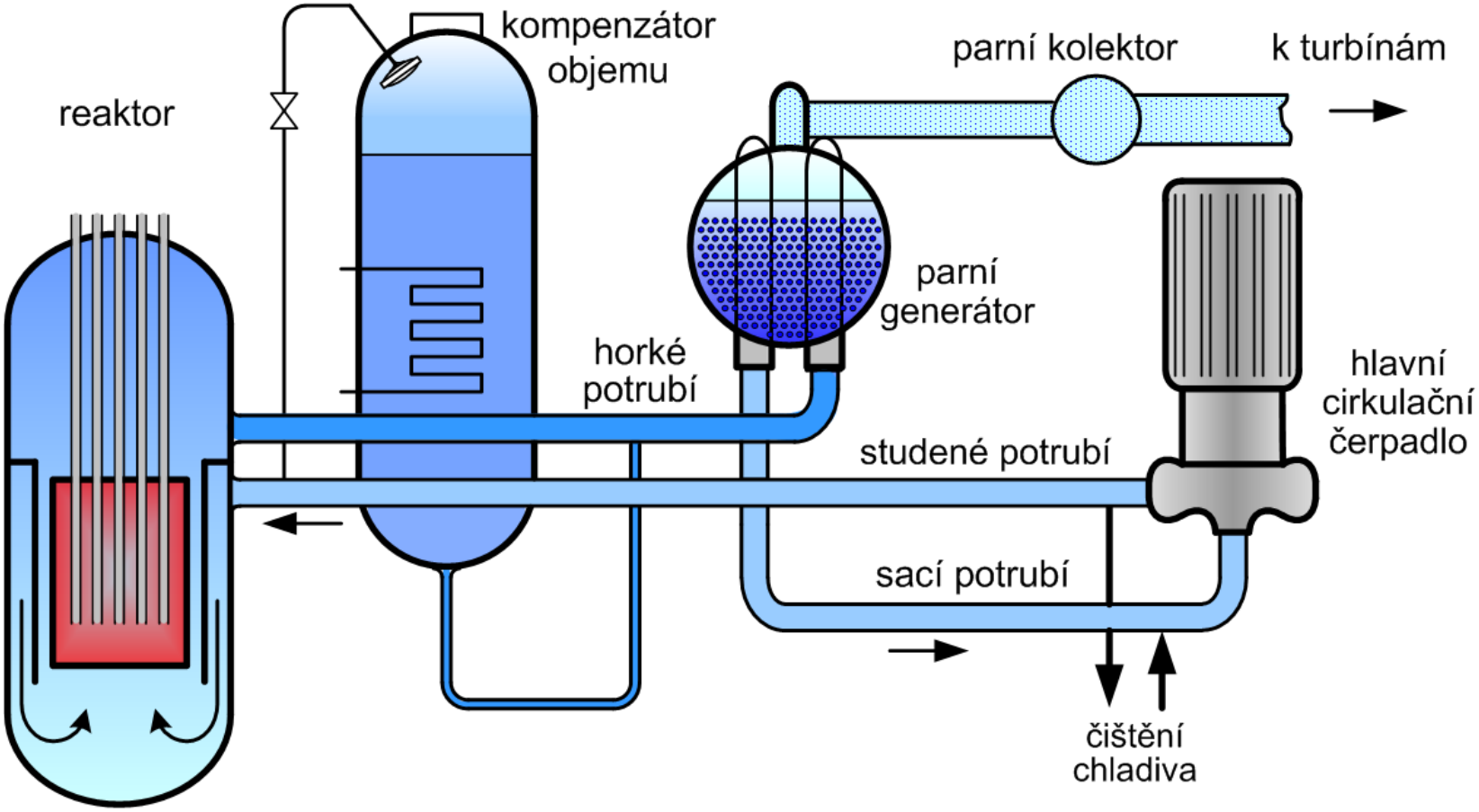


Jaderné elektrárny – Kartogram uložení palivových článků v AZ reaktoru JE s VVER 440

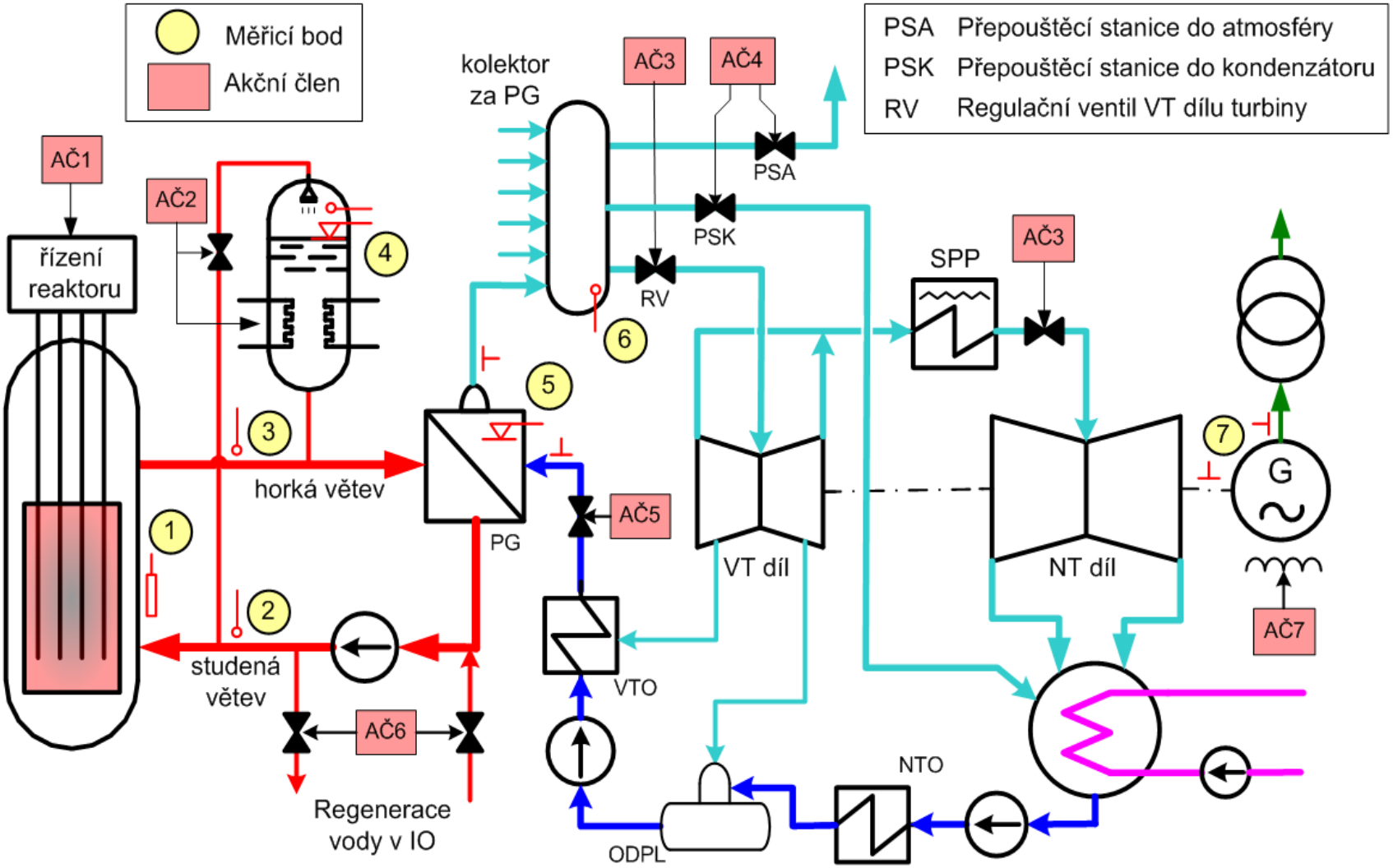
Označení v kartogramu	Počáteční obohacení U 235 v %	Doba pobytu v reaktoru v rocích	Počet palivových kazet	Počet regulačních kazet
	2,4	0 - 1	30	12
	3,6	0 - 1	72	0
	2,4	1 - 2	18	12
	3,6	1 - 2	84	0
	2,4	2 - 3	6	12
	3,6	2 - 3	102	0



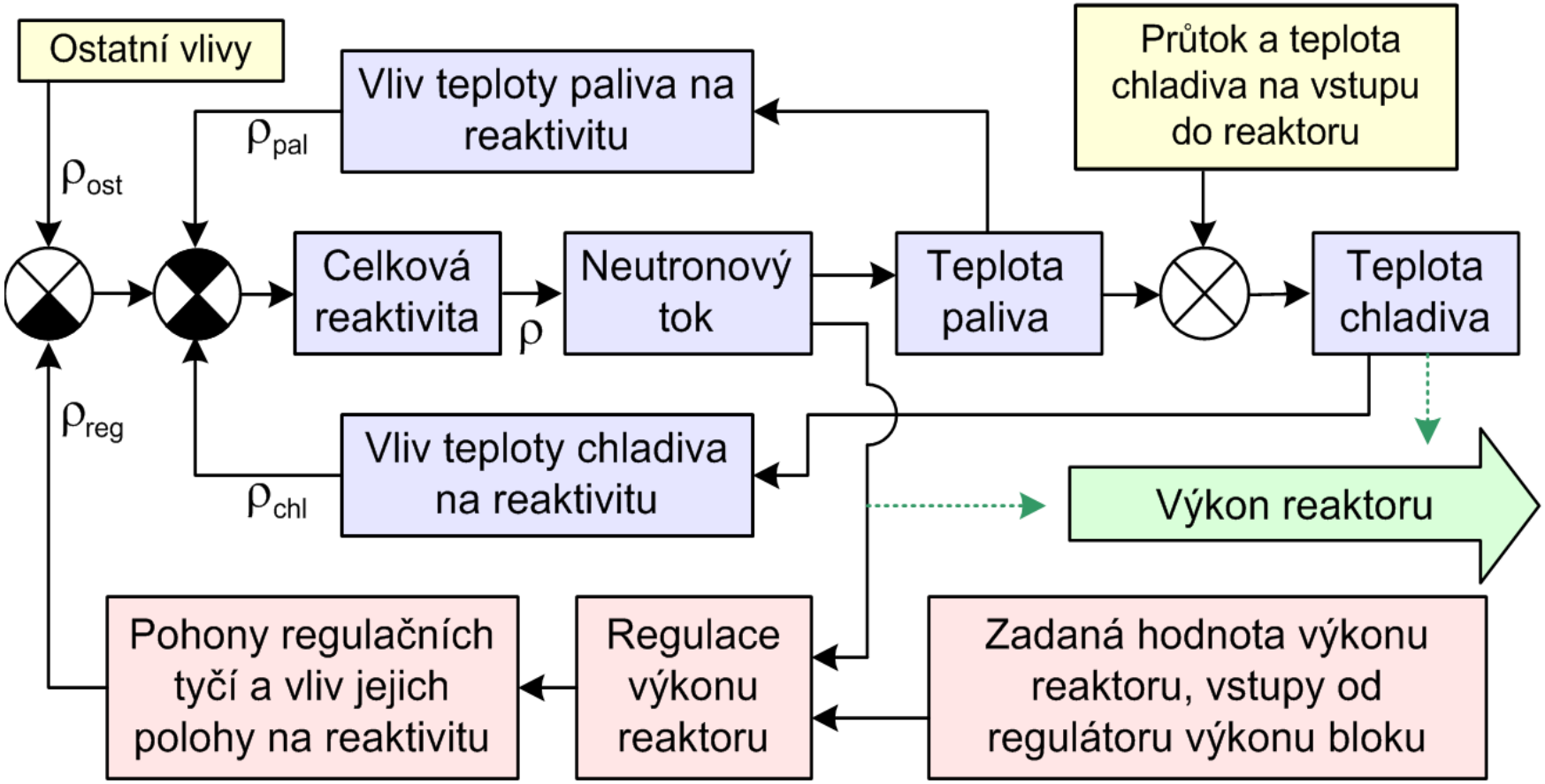
Jaderné elektrárny – dispozice základních komponent IO tlakovodní JE s reaktory VVER



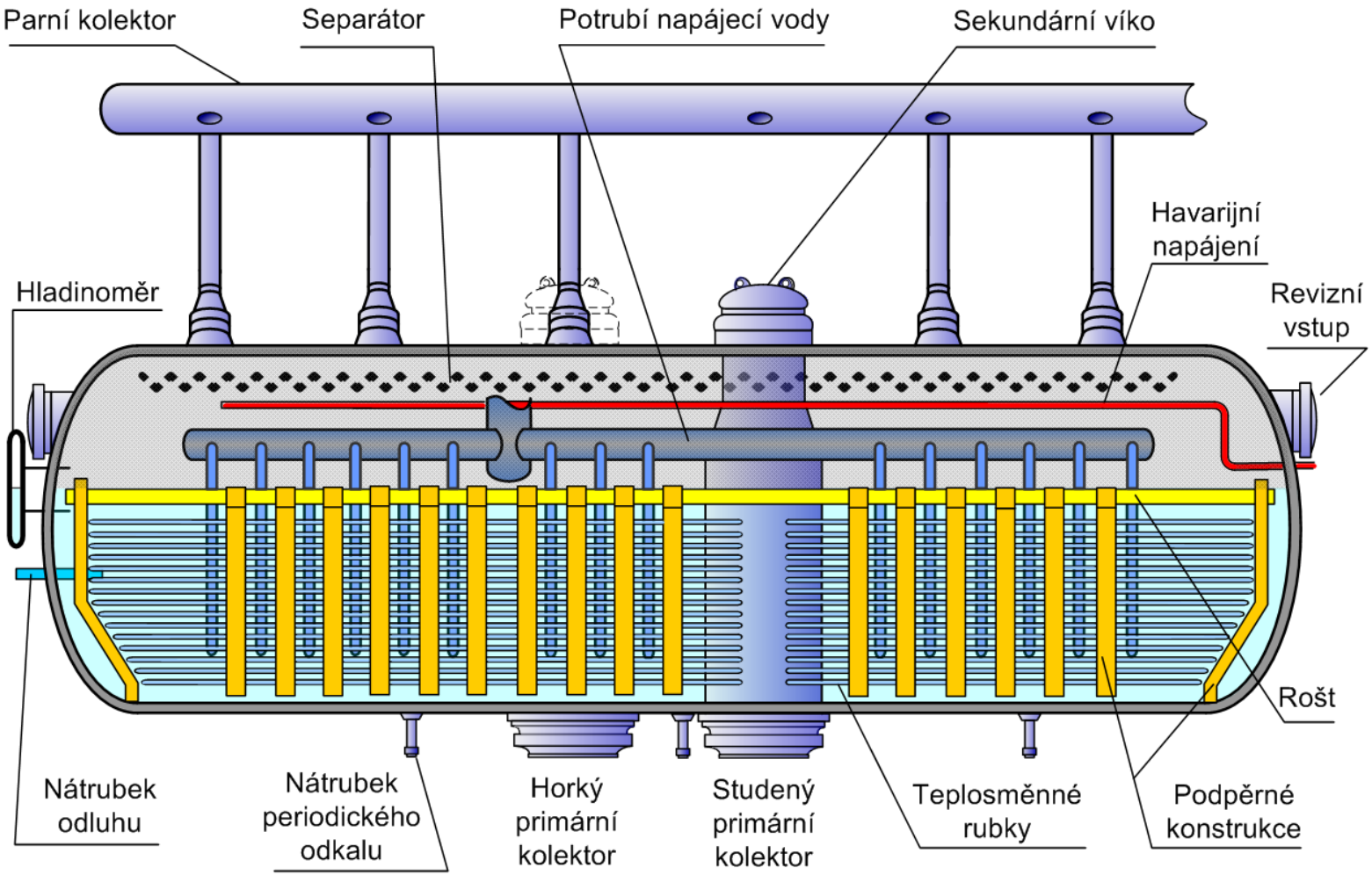
Jaderné elektrárny – důležité měřicí body a akční členy z hlediska regulace JE



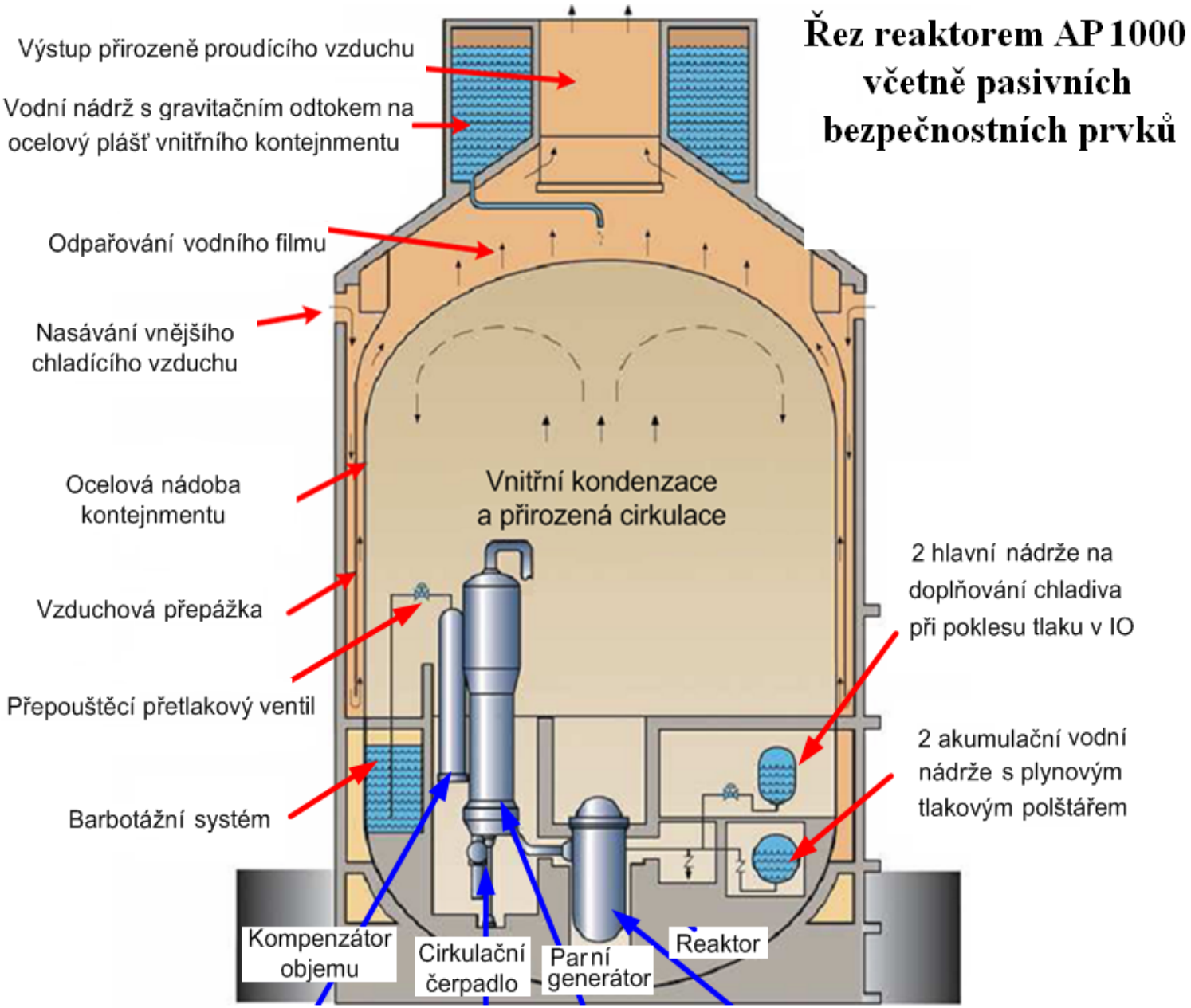
Jaderné elektrárny – schéma regulace reaktoru JE s uvažováním zpětných vazeb od teploty paliva a chladiva



Jaderné elektrárny – základní komponenty tlakovodní JE s reaktory VVER – parní generátor



Jaderné elektrárny – bezpečnostní prvky

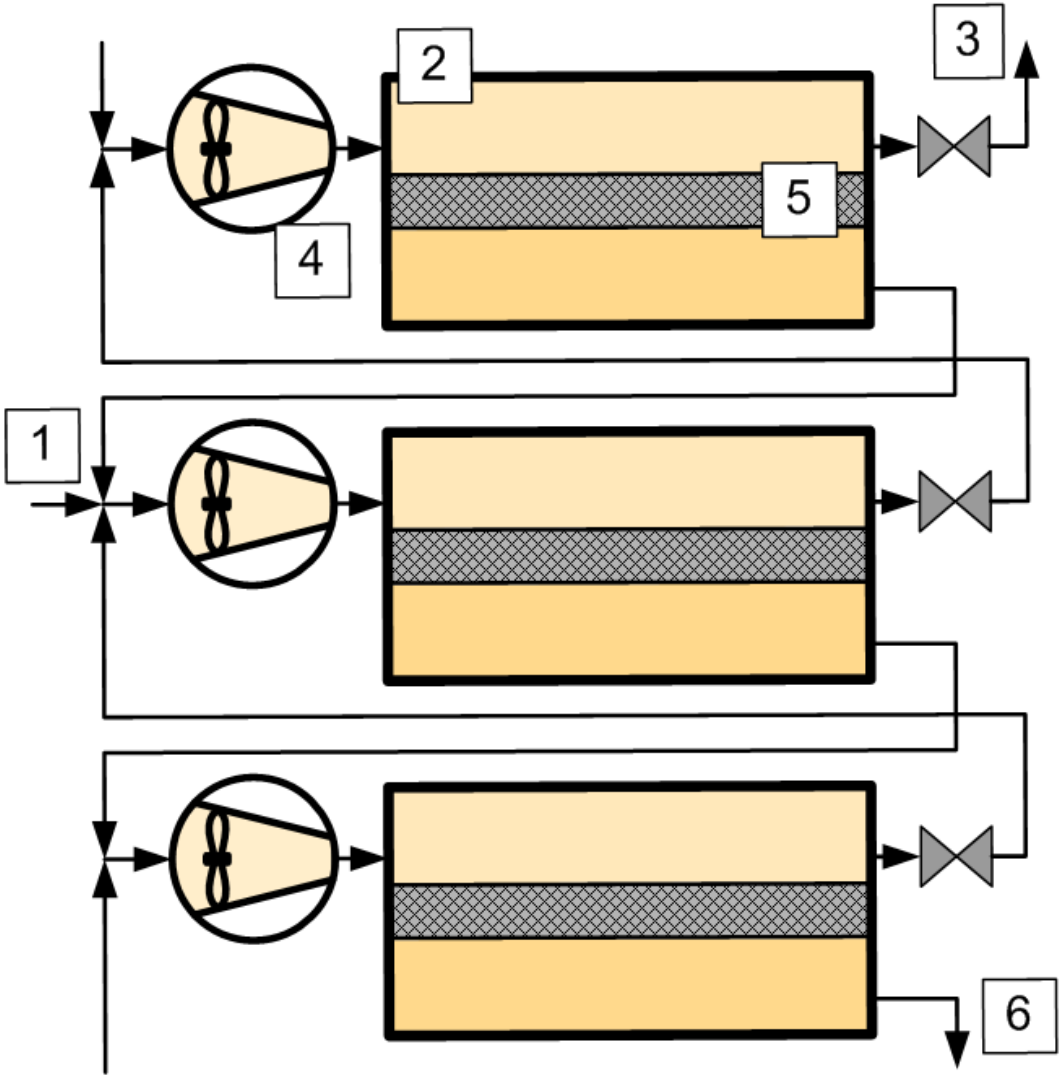


Jaderné elektrárny – typy reaktorů

Energie neutronů	Moderátor	Chladivo	Označení
Tepelné	Voda (H_2O)	H_2O	Tlakovodní (PWR, VVER)
			Varný (BWR)
	Grafit	CO_2	Plynem chlazený (GCR), zdokonalený (AGR)
		He	Vysokoteplotní (HTGR)
		H_2O	Vodou chlazený (LWGR)
	Těžká voda (D_2O)	D_2O	Těžkovodní (CANDU) (PHWR)
		H_2O	Těžkovodní chlazený lehkou vodou (HWLWR)
		CO_2	Těžkovodní chlazený plynem (HWGCR)
Rychlé	-	Na	Rychlý, množivý (FBR)

Jaderné elektrárny – obohacování paliva

Obohacování uranu - průchod pórovitou stěnou



1 plyn s přírodním uranem - vstup

2 difúzní jednotka

3 plyn ochuzený o izotop U235 - výstup

4 dmychadlo

5 pórovitá přepážka

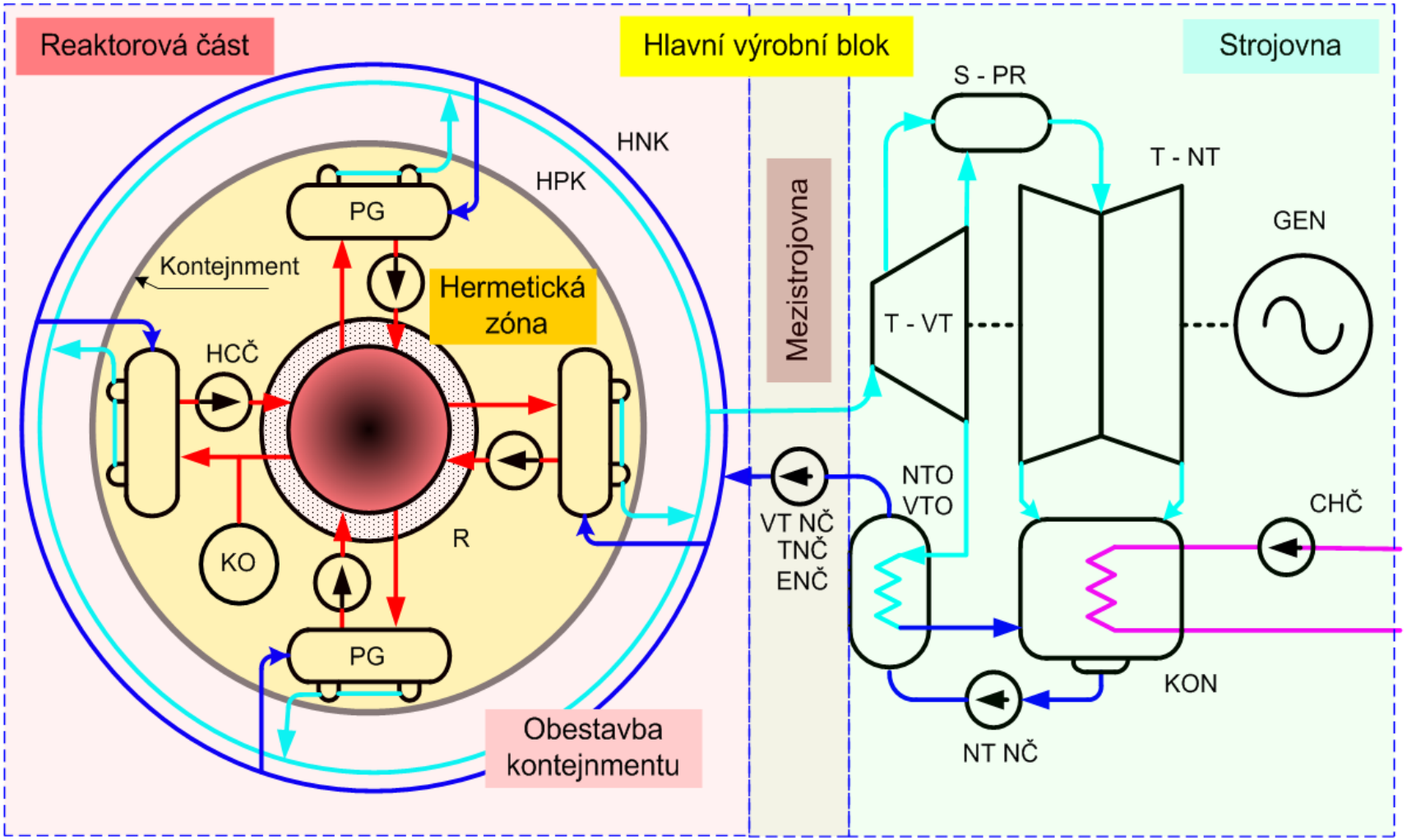
6 plyn obohacený izotopem U235 - výstup

Jaderné elektrárny – typy reaktorů

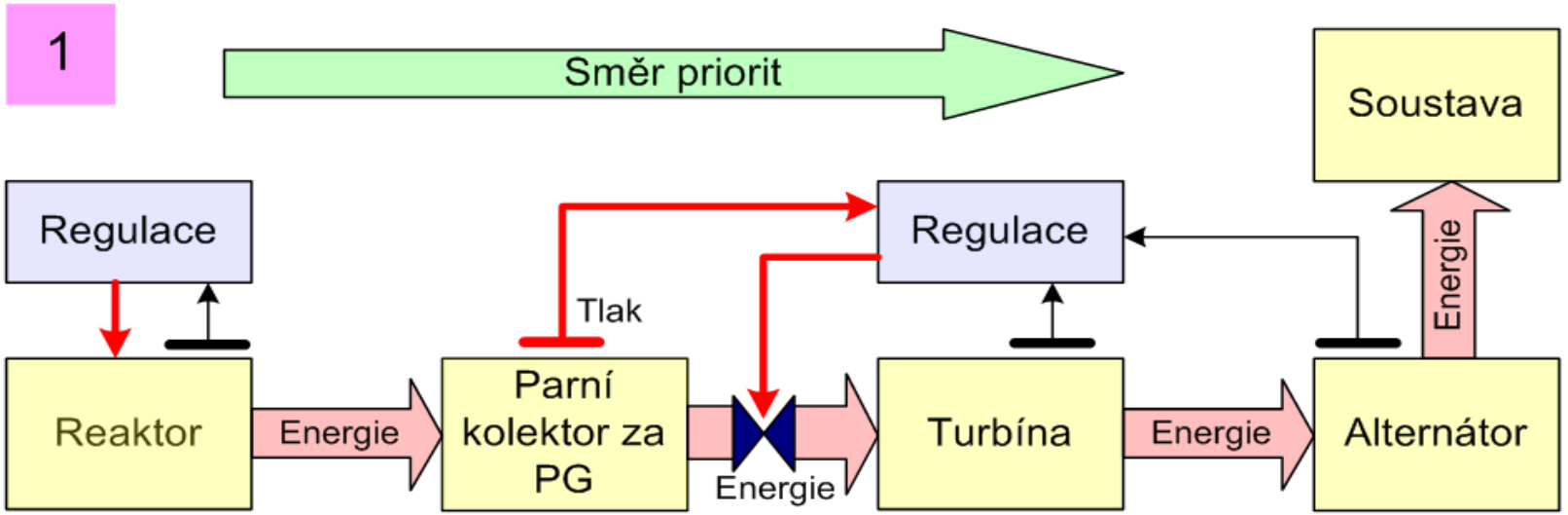
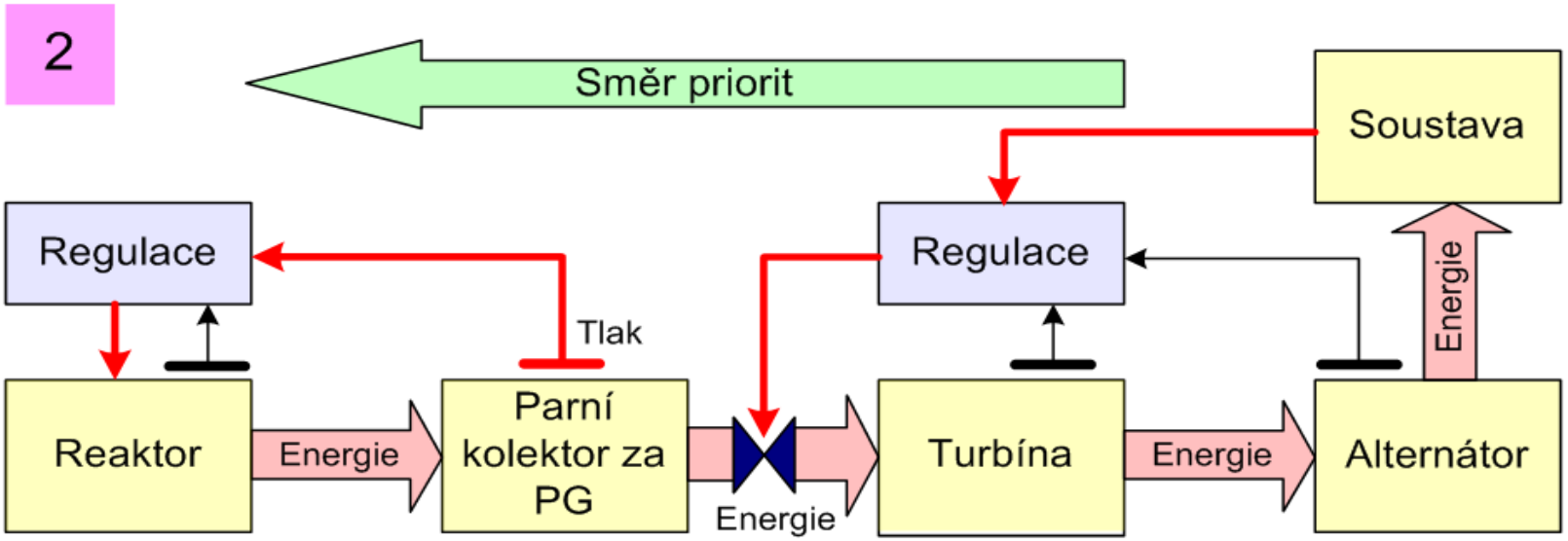
Energie neutronů	Moderátor	Chladivo	Označení
Tepelné	Voda (H_2O)	H_2O	Tlakovodní (PWR, VVER)
			Varný (BWR)
	Grafit	CO_2	Plynem chlazený (GCR), zdokonalený (AGR)
		He	Vysokoteplotní (HTGR)
		H_2O	Vodou chlazený (LWGR)
	Těžká voda (D_2O)	D_2O	Těžkovodní (CANDU) (PHWR)
		H_2O	Těžkovodní chlazený lehkou vodou (HWLWR)
		CO_2	Těžkovodní chlazený plynem (HWGCR)
Rychlé	-	Na	Rychlý, množivý (FBR)

Jaderné elektrárny - uspořádání bloku s VVER 1000

Dispoziční schéma výrobního bloku JE



Primární okruh — Sekundární okruh — voda / pára — Chladící okruh

Jaderné elektrárny – regulace výkonu

Způsoby regulace výkonu JE podle požadových priorit