

## 21. Jaderná energetika

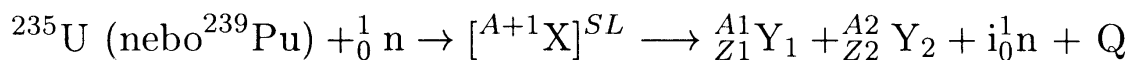
### A) Štěpná reakce obecně

- samovolné štěpení těžkých jader nemá z hlediska uvolňování energie praktický význam
- v úvahu přichází pouze  $^{238}\text{U}$ , poločas přeměny je velký a uvolněná energie je mizivá

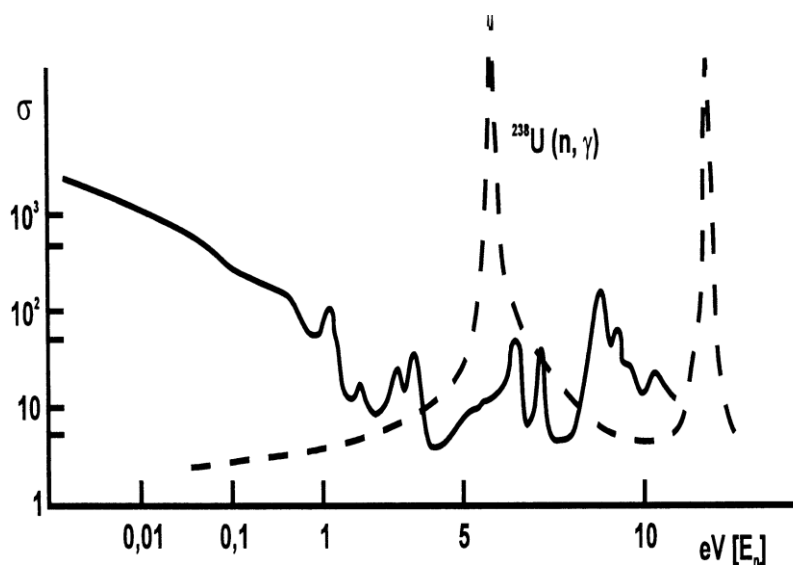
⇒ průmyslové využití energie jádra je založeno :

- **na štěpné jaderné reakci**
- **je vyvolána jaderným projektilem**
- **pro jadernou energii má význam**

**$^{235}\text{U}$  a  $^{239}\text{Pu}$**



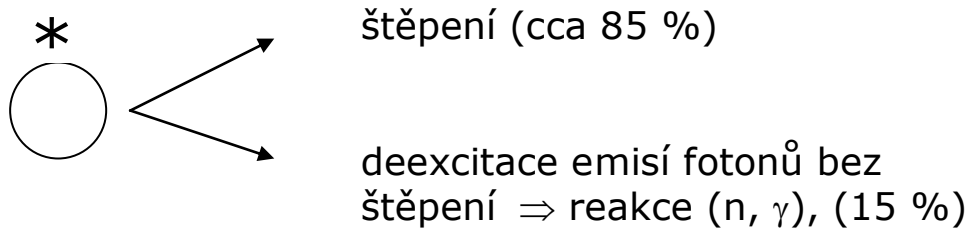
- účinný průřez reakce (tj. pravděpodobnost jejího provedení) závisí na energii neutronů



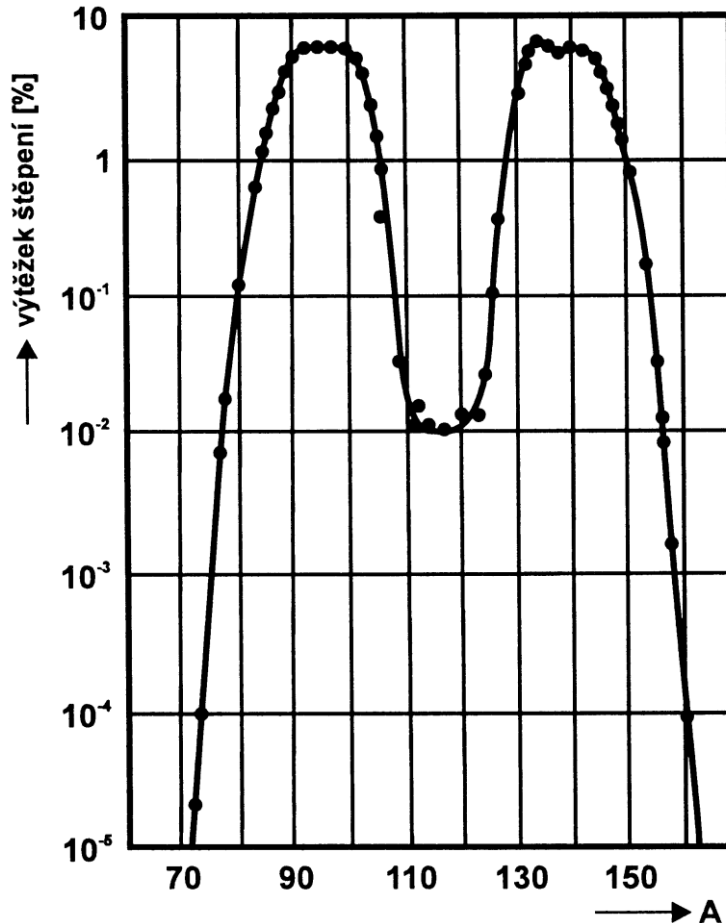
Účinný průřez pro štěpení  $^{235}\text{U}$  v závislosti na energii neutronů. (Čárkovaně je znázorněn účinný průřez pro reakci  $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ .)

## Průběh štěpení:

1. záchyt neutronu, vznik složeného jádra
2. excitované složené jádro má více možností rozpadu



3. štěpení se může dít mnoha způsoby
4. všechny nuklidy mají nadbytek neutronů a podléhají, což vede k několikanásobné přeměně  $\beta^-$
5. vznikají tak **štěpné produkty**, z nichž některé emitují zpožděné neutrony



Výtěžky produktů štěpení  $^{235}\text{U}$ .

6. je zřejmé, že štěpení vede vždy k jedné lehčí a k jedné těžší trosce
7. při každém štěpení se uvolňuje několik **okamžitých (štěpných) neutronů** (2-3)
8. jejich emise je umožněna vysokou excitační energií jádra a neschopností štěpných produktů udržet vysoký poměr N/Z
9. tato skutečnost má pro průmyslové provedení štěpné jaderné reakce zásadní význam
10. spektrum okamžitých neutronů je spojitě (od velmi malých energií až do několika MeV. Nejvíce neutronů má energii kolem **0,7 MeV** (rychlé neutrony)

- Štěpení jádra popisuje kapkový model jádra
- energie potřebná ke zvětšení povrchu jádra až do kritického zaškrcení se nazývá **aktivační energie  $E_A$**

<b>jádro</b>	<b><math>E_A</math> (MeV)</b>	<b><math>E^*</math> (MeV)</b>	<b>štěpení</b>
$^{235}\text{U}$	6,5	6,8	pomalé n ( $\sim 10^{-2}\text{eV}$ )
$^{239}\text{Pu}$	6,05	6,6	pomalé n
$^{238}\text{U}$	7,02	5,5	rychlé n

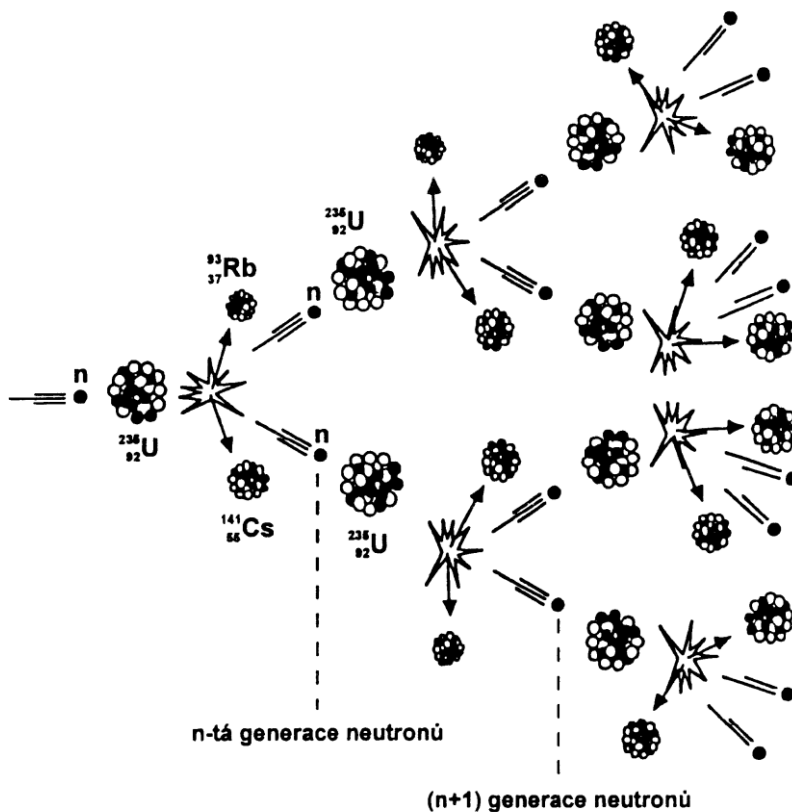
**$E^*$**  - excitační energie uvolněná při vzniku slož. jádra, tj. při absorpci neutronu terčovým jádrem

- při štěpení jádra se uvolňuje značná energie

**$Q \approx 210 \text{ MeV/jádro}$**

- z toho cca **175 MeV** připadá na kinetickou energii primárních štěpných produktů- jejich jádra jsou v materiálu paliva silně bržděna a kinetická energie se přemění na **energii tepelnou**
- zbytek energie připadá na kinetickou energii neutronů, emisi fotonů a na excitační energii primárních štěpných produktů

## B) Řízená štěpná reakce a regulace reaktoru



Řetězová štěpná reakce. (Generace neutronů jsou označeny čárkovaně.)

- z obrázku plyne skutečnost, že při každém aktu štěpení se počet neutronů znásobuje minimálně 2x  $\Rightarrow$  při nekontrolované reakci by došlo během zlomku vteřiny k explozi

- v řízeném jaderném reaktoru se z ponechává k udržení jaderné reakce pouze jeden neutron, který je využit k dalšímu štěpení (ideální případ)
- proto se v jednom časovém okamžiku v soustavě nachází vždy stejný počet neutronů a uvolňuje se stále stejné (řízené) množství energie
- i bez záměrného zasahování do neutronové bilance je však v reaktoru méně neutronů, neboť probíhají další procesy spojené se spotřebou neutronů
  - 15% jader  $^{235}\text{U}$  zachytí neutron  $^{235}\text{U}(n,\gamma) ^{236}\text{U}$
  - 30% jader  $^{239}\text{Pu}$  zachytí neutron  $^{239}\text{Pu}(n,\gamma) ^{240}\text{Pu}$
- v reaktoru je mnoho materiálů a štěpných produktů, které parazitně absorbují neutrony
- jistý počet z reaktoru unikne

**Multiplikační faktor** – číslo vyjadřující průměrný počet neutronů na konci každé generace

	multiplikační faktor k
kritická soustava (nutná podmínka pro udržení štěpné reakce)	= 1
nadkritická soustava (nebezpečný stav – reakce se velmi rychle rozbíhá, hrozí trvalé poškození reaktoru přehřátím)	> 1
podkritická soustava (počet neutronů se zmenšuje, až se reakce zastaví – tento stav se vyvolá tehdy, je-li potřeba reaktor zastavit)	< 1

Charakteristiky nuklidů pro výpočet multiplikačního faktoru.

Nuklid	Neutrony	$\eta^a$	$\sigma_f^b$	$\sigma_a^b$
$^{235}\text{U}$	pomalé <sup>c</sup>	2,42	582	100
	rychlé <sup>d</sup>	2,58	1,25	0,11
$^{238}\text{U}$	pomalé <sup>c</sup>	–	0	2,7
	rychlé <sup>d</sup>	2,85	0,017	0,17
$^{239}\text{Pu}$	pomalé <sup>c</sup>	2,87	742	270
	rychlé <sup>d</sup>	3,02	1,65	0,09

a – průměrná hodnota

b –  $\times 10^{-28} \text{m}^2$

c – energie neutronů 0,025 eV

d – energie neutronů 1,0 MeV

Výpočty lze zjistit, že rychlé neutrony mají malý multiplikační faktor (0,11) – to se projeví v účinném průřezu pro reakci (viz předchozí tabulka)

⇒ nelze pomocí nich v přírodním uranu udržet štěpnou reakci

⇒ reakce s pomalými neutrony (**0,025 eV**) má podstatně vyšší šanci na udržení a průmyslové provedení

**Zpomalování neutronů** se realizuje pomocí moderátorů

**lehká voda**  
**těžká voda**  
**grafit**

- Z ekonomických důvodů se nejčastěji používá obyčejná voda, přestože má vyšší účinný průřez pro záchyt neutronů než ostatní uvedené materiály
- voda plní funkci moderátoru i chladiwa

Pro udržení štěpné reakce platí:

<b>Palivo</b>	<b>Moderátor</b>
přírodní uran	těžká voda
uran obohacený izotopem $^{235}\text{U}$ na 3-4 %	obyčejná voda
uran obohacený izotopem $^{235}\text{U}$ na 20 %	není třeba moderovat, štěpná reakce běží i s rychlými neutrony

## Regulace reaktoru

- reaktor jako dynamický systém podléhá během provozu změnám, neboť se v něm hromadí štěpné produkty – mají vysoké účinné průřezy pro záchyt neutronů, dochází k tzv. **otravě reaktoru**

reaktorové jedy  
 $^{133+135}\text{Xe}$ ,  $^{149}\text{Sm}$

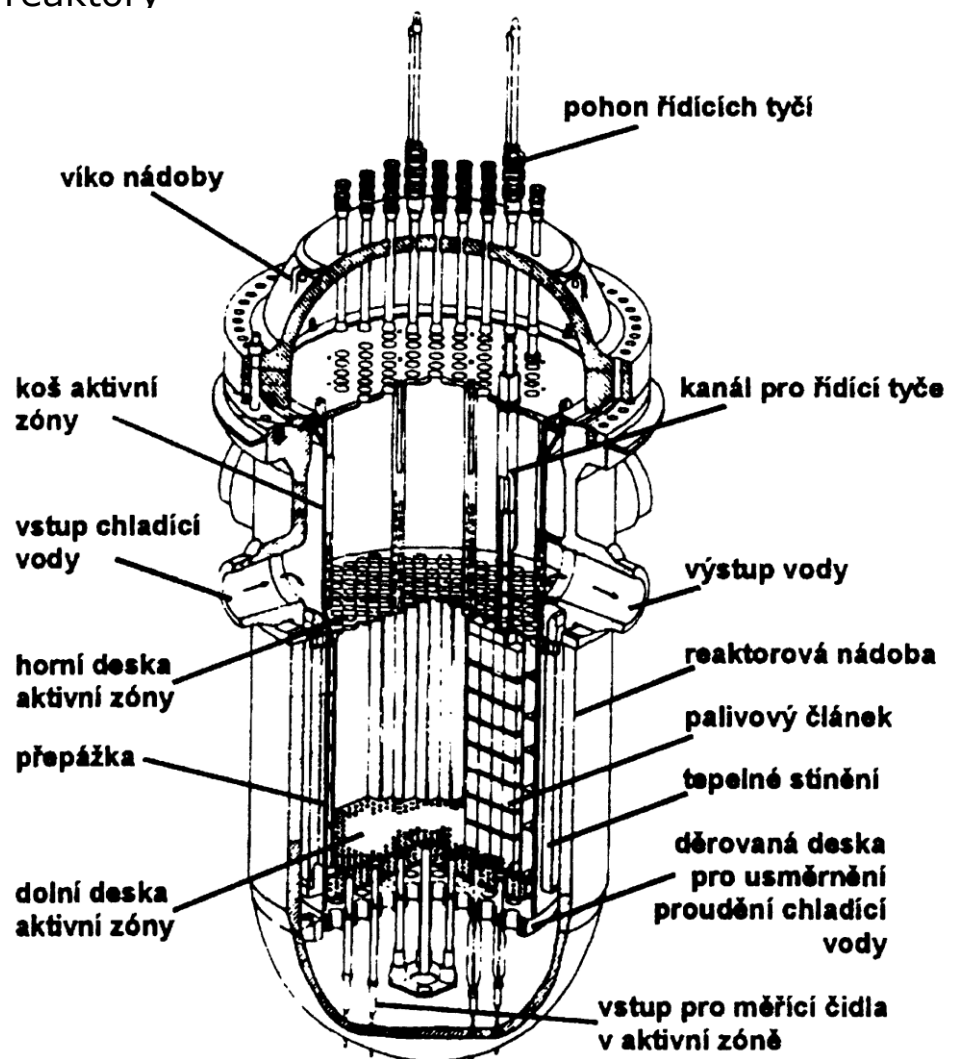
- proto se do reaktoru vkládá více paliva, než odpovídá hodnotě  $k=1$
- tento přebytek paliva určuje **reaktivitu reaktoru**
- reaktor má tedy před spuštěním jistou zásobu reaktivity, která se dá snížit pomocí **kompenzačních tyčí**, které jsou zhotoveny z materiálu s vysokým účinným průřezem pro neutrony
- během provozu reaktoru se tok neutronů reguluje zasouváním tyče do aktivní zóny reaktoru
- okamžité změny toku neutronů v aktivní zóně reaktoru se regulují pomocí **řídících tyčí**
- kromě to obsahuje reaktor **tyče havarijní** (obsahují bor, Cd nebo Hf)

# Jaderné reaktory

**Jaderný reaktor** ≡ zařízení, ve kterém lze realizovat řízenou nepřetržitou štěpnou reakci a plynule odvádět vyvíjené teplo

## Typy reaktorů:

- školní,
- výzkumný
- produkční (výroba izotopů)
- demonstrační (reaktory menšího výkonu pro ověření určité koncepce)
- energetické reaktory



Typický tlakovodní reaktor.

**VVER ..... vodou chlazený-vodou moderovaný** (válnová nádoba z oceli průměr cca 7 m, výška až 23 m, několik set tun, mř. požadavky na kvalitu)

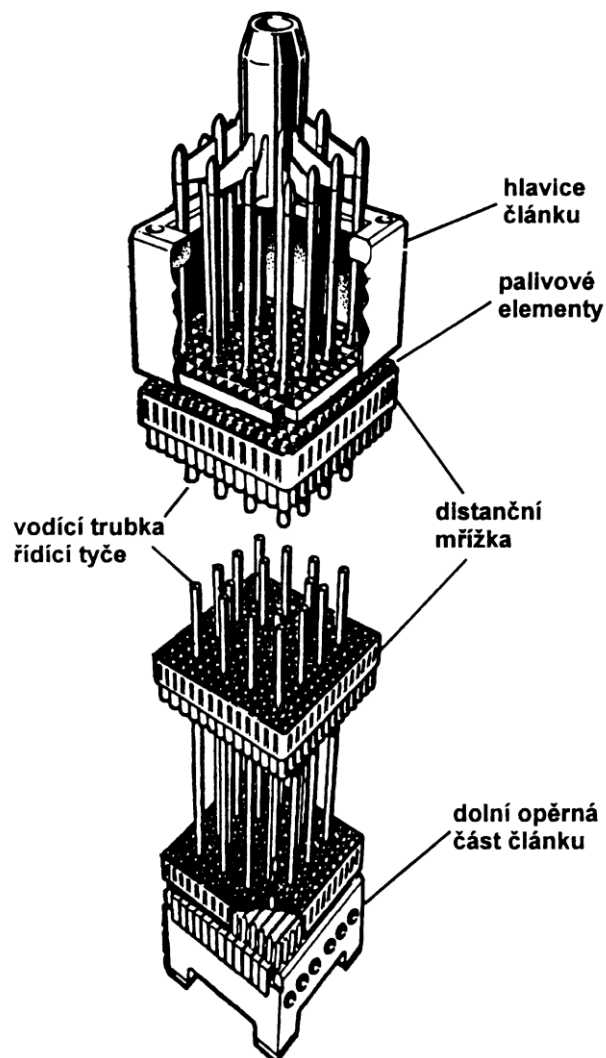


**Aktivní zóna reaktoru**  $\equiv$  prostor, ve kterém štěpení probíhá (palivo, moderátor u pomalých reaktorů, řídicí tyče, chladičí médium). Je obklopena **reflektorem**, který snižuje úniky neutronů (voda, grafit u pomalých reaktorů; železo, ochuzený uran u reaktorů rychlých)

**Palivo** se vyrábí z přírodního nebo obohaceného uranu

- **kovový uran** (s příměsí legujících prvků pro zlepšení mechanických vlastností) má formu kovových prutů pokrytých vrstvou slitiny Mg+Al
- **palivo z obohaceného uranu** je nejčastěji v podobě  $UO_2$  (tzv. keramické palivo v podobě tablet o průměru 1 cm a výšce 1-2 cm, které jsou naskládány do kovového obalu délky 2-3 m, hermeticky uzavřené a zhotovené ze slitiny Zr nebo nerez oceli)
- kovový obal paliva udržuje palivo v kompaktním stavu, brání rozrušení **palivového elementu** – má zpravidla tvar hranolu, zadržuje radioaktivní štěpné elementy v uzavřeném prostoru
- soubor palivových elementů tvoří **palivový článek**. Palivových článků je v reaktoru několik set, do reaktoru se vkládají a z reaktoru vyjímají pomocí zavážecího stroje
- palivové články nemohou zůstat v reaktoru do úplného spotřebování paliva
  - snižuje se reaktivita aktivní zóny
  - výrazně se zhoršují mechanické vlastnosti palivového článku
- poloha palivových článků se v průběhu provozu reaktoru mění
- částečně vyhořelé palivo se v pravidelných intervalech vyjímá a nahrazuje se palivem čerstvým

- vyjmuté články se skladují po jistou dobu v bazénu s vodou v primárním okruhu elektrárny, kde se chladí



**Chladicí médium** cirkuluje mezi palivovými články a odvádí z aktivní zóny teplo.

- vysoké měrné teplo,
- dobrou tepelnou vodivost,
- tepelně i radiačně stálé,
- nesmí příliš absorbovat neutrony
- nesmí způsobovat korozi povrchu palivových elementů

pomalé reaktory	voda, těžká voda helium
rychlé reaktory	roztavený sodík

## Tlakovodní reaktory

- jsou nejrozšířenější
- palivem je 2-4 % obohacený uran
- voda v reaktoru je pod vysokým tlakem (při teplotách cca 300 °C je kapalná)
- pára pro pohon turbíny vzniká v sekundárním okruhu elektrárny
- řídicí tyče se zasouvají shora

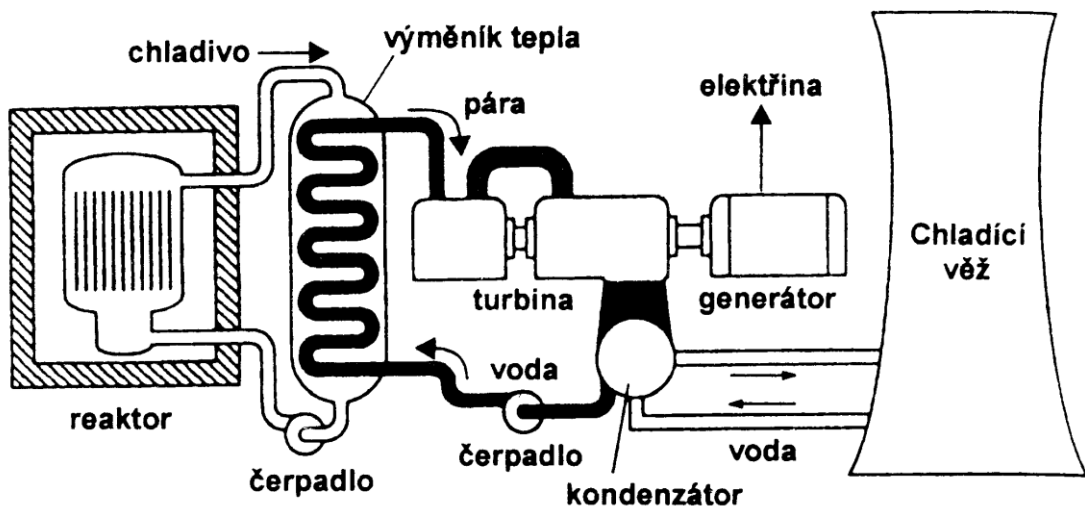
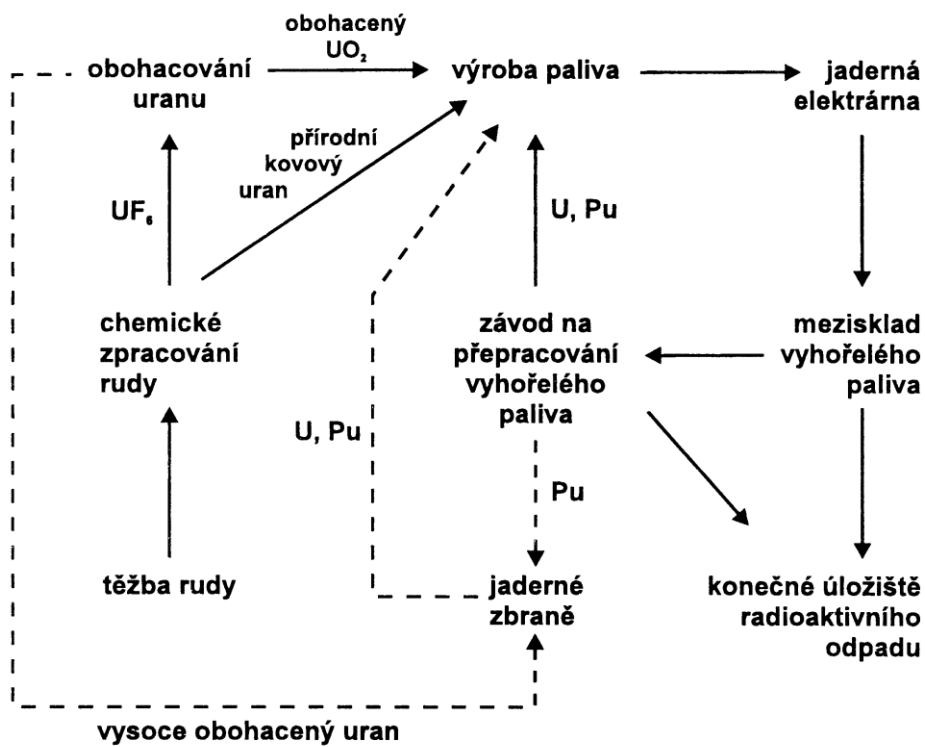


Schéma dvouokruhé jaderné elektrárny.

- v ČR jde o reaktory:
  - VVER 440 MW (Dukovany)
  - VVER 1000 MW Temelín)
- tlakovodní reaktory malých rozměrů pracují s vysoce obohaceným palivem (až 90 %  $^{235}\text{U}$ ) – jsou malé, kompaktní, slouží jako pohon např. jaderných ponorek, vydrží v provozu 2-3 roky)

## Palivový cyklus



Palivový cyklus. (Čárkovaně je zakresleno využití vojenského štěpného materiálu pro výrobu paliva.)

## Další typy reaktorů

- **Varné reaktory** – jsou větší než tlakovodní, voda se částečně mění v páru, řídicí tyče se zasouvají zesponu
- **Těžkovodní reaktor** – reaktor s tlakovými kanály, chlazen i moderován těžkou vodou, palivem je přírodní uran (Kanada – CANDU).

Podobný reaktor byl i reaktor A1 v Jaslovských Bohunicích, v r. 1977 došlo k havárii a reaktor byl trvale odstaven.

- **Plynem chlazené grafitové reaktory** (Velká Británie) – reaktor je chlazen heliem, které proudí palivovými kanály pod tlakem 3-5 MPa. Pracuje s mírně obohaceným uranem, dosahuje se teploty až 850 °C.
- **Grafitové reaktory chlazené vodou** - provozovány pouze v zemích bývalého SSSR (např. v Černobyli). Palivem je mírně obohacený uran
- **Rychlé reaktory** – používají nezpomalené neutrony. Vzhledem k tomu, že účinný průřez pro rychlé neutrony je podstatně menší než pro neutrony pomalé, musí se pracovat s palivem obohaceným na 20-50%  $^{235}\text{U}$  nebo palivo s odpovídajícím obsahem  $^{239}\text{Pu}$ . Chladí se roztaveným sodíkem. Pracují hlavně ve Francii (Phénix, Superphénix).
- **Množivé reaktory** – rychlé reaktory s plutoniem, kdy průměrný počet neutronů při jednom aktu štěpení  $i=3$ . Jeden z neutronů je využíván (zcela záměrně) j záchytné reakci  $^{238}\text{U}(n,\gamma)$ , která vede k plutoniu. Při provozu reaktoru vzniká více plutonia než se spotřebuje. Vnější část reaktoru je obklopena tzv. plodivou zónou, která je zhotovena z tablet z ochuzeného  $\text{UO}_2$ .

## C) Jaderná bezpečnost

≡ stav a schopnost elektrárny a její obsluhy zabránit nekontrolovatelnému rozvoji jaderné štěpné reakce, nedovolenému úniku radioaktivních látek a ionizujícího záření do životního prostředí.

- **aktivita v aktivní zóně dosahuje cca  $10^{20}$  Bq ⇒ hlavním cílem je udržet aktivní zónu v neporušeném stavu**

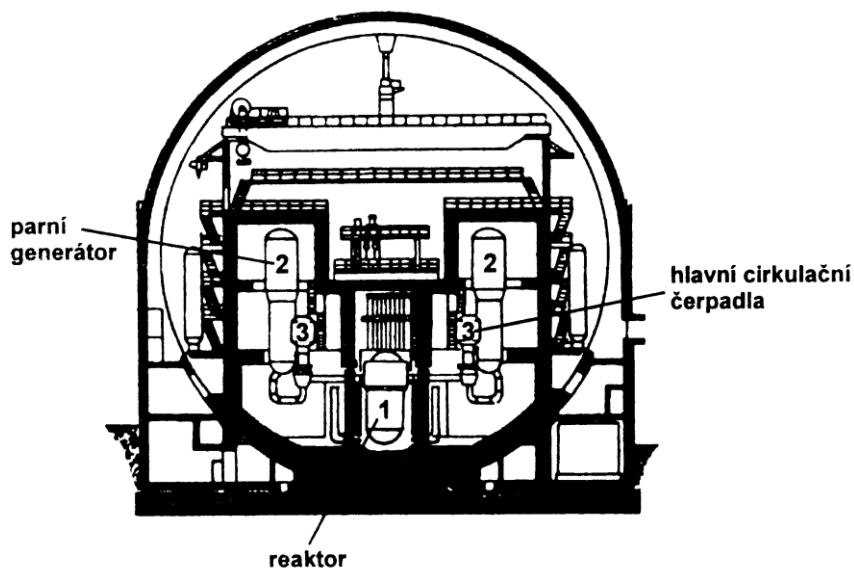
### Příčiny možné havárie:

- přehřátí reaktoru při ztrátě chladiva (roztržení potrubí, porucha hnacích čerpadel)
- poruchy regulace reaktoru
- stárnutí konstrukčních materiálů vlivem dlouhodobého působení toku neutronů
- mechanické poškození reaktoru (teroristický útok, pád letadla, zemětřesení apod.)

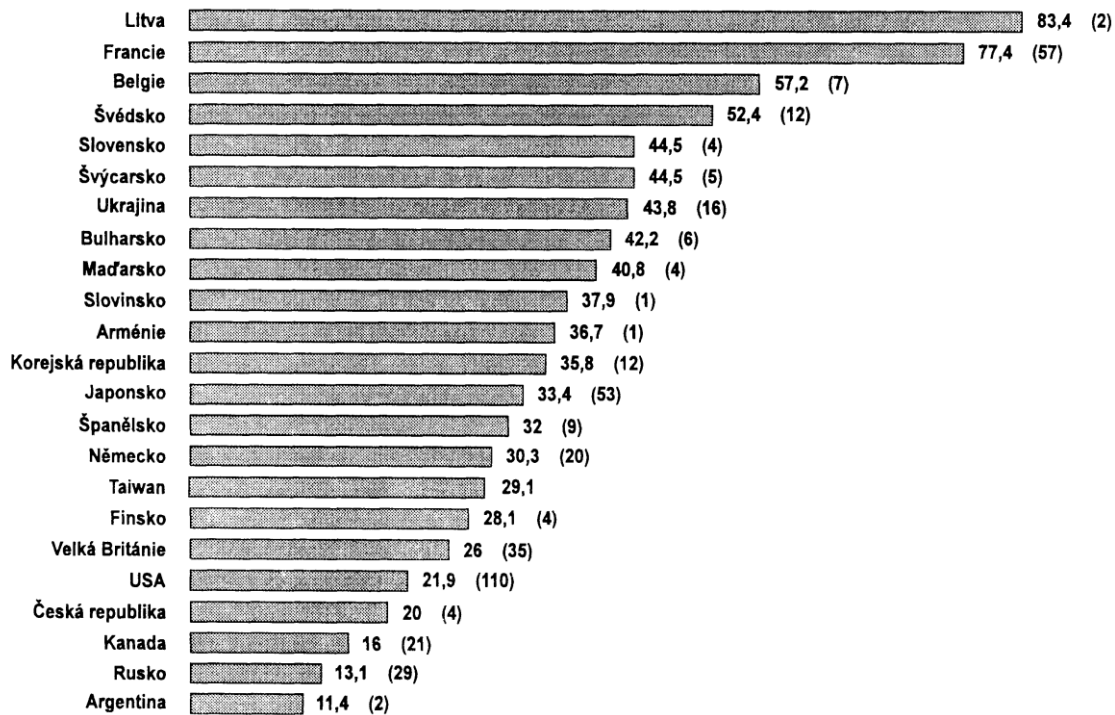
### Způsoby předcházení haváriím:

- systém nepřetržitého měření neutronového toku a teploty
- při výraznějších odchylkách od provozních norem se aktivuje systém havarijní ochrany (rychlé spuštění havarijních tyčí)
- bezpečnostní systémy jsou několikanásobně zálohovány a paralelní systémy jsou na sobě nezávislé
- neustálá dozimetrická kontrola plynných a kapalných výpustí
- chlazení reaktoru je rozděleno do několika smyček, z nichž má každá vlastní oběhové čerpadlo a parogenerátor

- lehkovodní reaktory v Temelíně jsou vybaveny zásobníky s roztokem kyseliny borité (hydroakumulátory). Pokud klesne tlak chladiva, začne tento roztok samovolně vnikat do reaktoru
- v primárním okruhu je instalován systém chlazení reaktoru při odstavení – aktivní zóna se zahřívá teplem, které se uvolňuje při radioaktivních přeměnách štěpných produktů
- elektrické pohony všech zařízení jsou zálohovány pomocí baterií a dieselagregátů
- šíření radioaktivních látek do okolí brání několik bariér (pokrytí palivových elementů, umístění reaktoru ve speciální budově – kobky a prostory pro zdržení uniklého chladiva)
- instalace kontejnmentu (záchytná budova odolná vůči přetlaku i mechanickému poškození)



Řez typickým primárním okruhem jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem v kontejnmentu.



Podíl jaderné energie na výrobě elektrické energie a počet energetických bloků (čísla v závorkách) v různých zemích. Stav v polovině roku 1997.

## Cvičení z jaderné chemie

1. Bezpečnost práce a principy radiační ochrany.
2. Chyby při měření radioaktivních vzorků.
3. Geiger-Müllerův počítač.
4. Krystalový scintilační detektor.
5. Absorpce a samoabsorpce beta záření.
6. Kapalná scintilace.
7. Absorpce gama záření.
8. Určení poločasu krátkodobého radionuklidu.
9. Určení poločasu dlouhodobého radionuklidu.
10. Radioaktivní rovnováha.
11. Indikátorová metoda - určení náboje iontu v roztoku.
12. Spektroskopie gama záření s krystalovým detektorem.
13. Spektroskopie gama záření s polovodičovým detektorem.