

22. JADERNÁ ENERGETIKA



Štěpná reakce obecně

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

⇒ **průmyslové využití energie jádra je založeno** na štěpné reakci jiných nuklidů, a to:

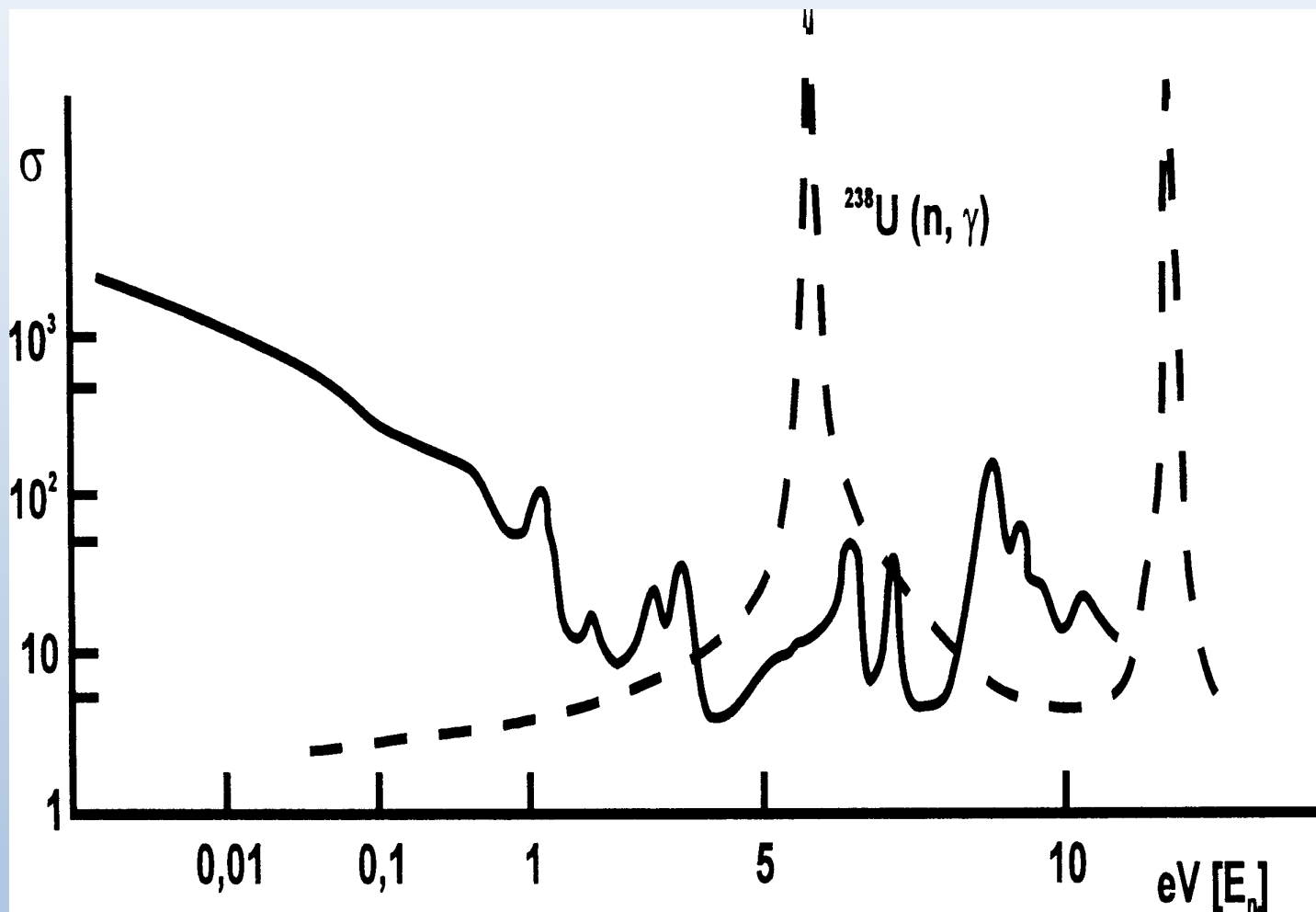
^{235}U a ^{239}Pu

- děj je vyvolán jaderným projektilem (**pomalé neutrony**)



Štěpení jádra popisuje kapkový model jádra. Při štěpení vznikají dvě tzv. trosky (jedna lehčí a jedna těžší – viz dále distribuční křivka), 1-2 neutrony a uvolňuje se značné množství tepla Q

Účinný průřez štěpné reakce σ (tj. pravděpodobnost jejího provedení) závisí na energii neutronů.



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

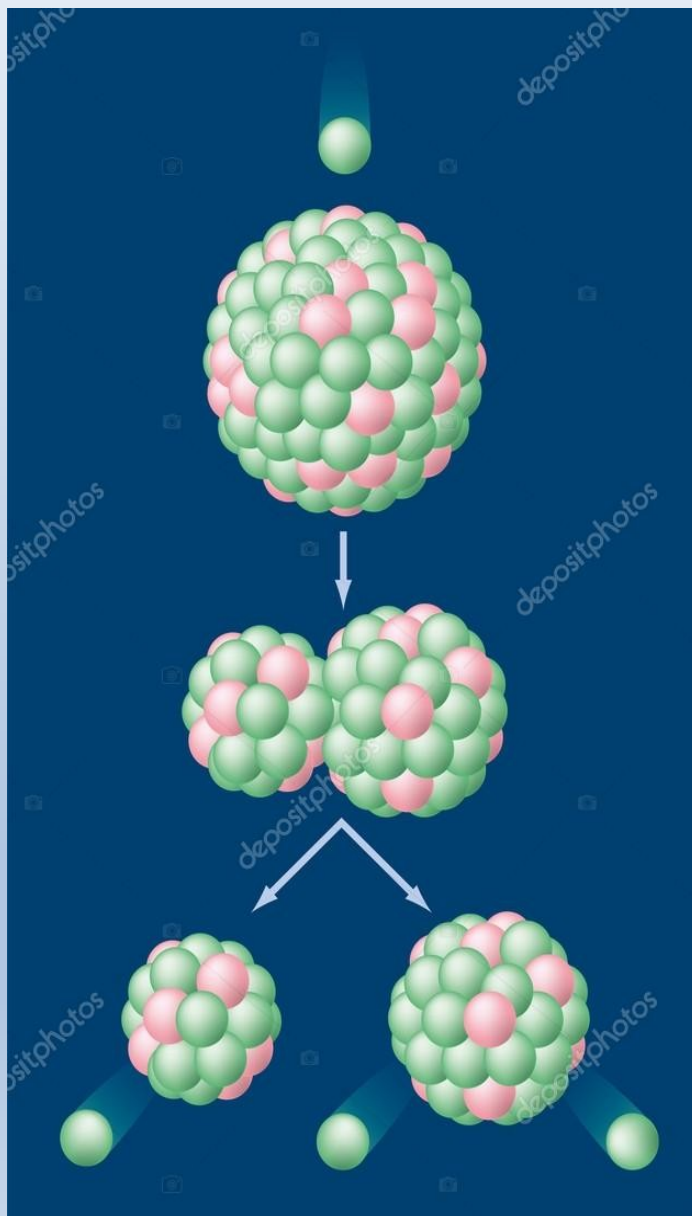
Z tohoto grafu plyne, že štěpení je nejúčinnější s pomalými neutrony.



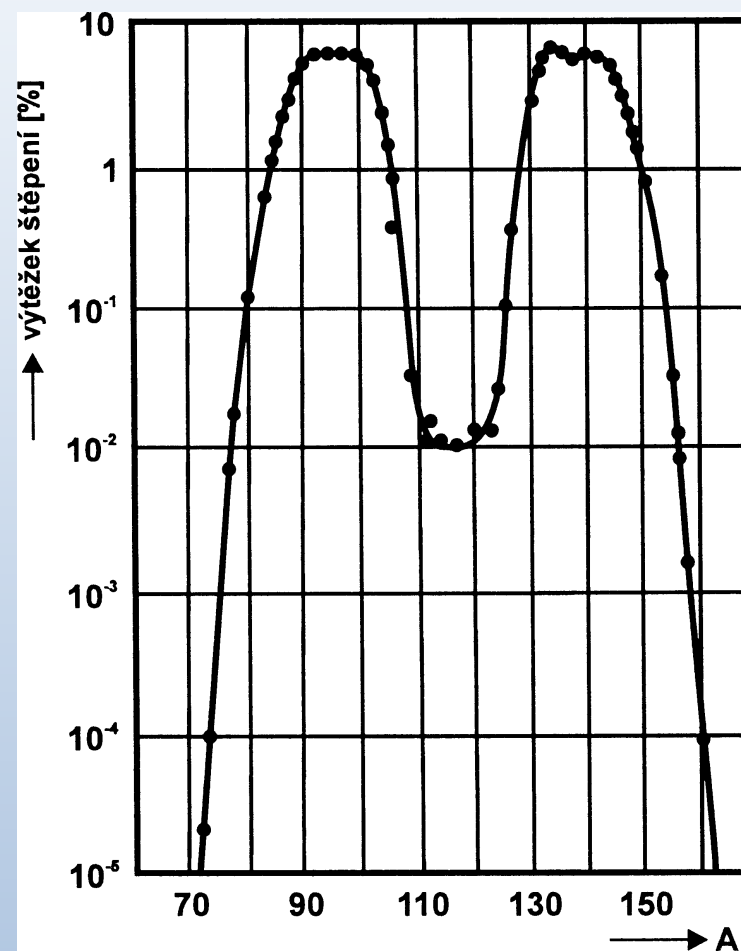
Jeden z mnoha způsobů štěpení je následující



nebo:



Distribuční křivka štěpných produktů při štěpení pomalými neutrony



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

Tvar distribuční křivky závisí na energii neutronů, se zvyšující se energií neutronů se poloha sedla na křivce zvyšuje a nakonec přechází do tvaru „jednohrbého velblouda“



- štěpení se může dít mnoha způsoby (viz distribuční křivka), platí že součet nukleonových čísel produktů štěpení (včetně uvolněných neutronů) je **235+1**
- je zřejmé, že štěpení vede vždy k jedné lehčí a k jedné těžší trosce a k několika **okamžitým neutronům (1-3)**
- **emise okamžitých neutronů** je umožněna vysokou excitační energií jádra a neschopností štěpných produktů udržet vysoký poměr N/Z
- tato skutečnost má pro průmyslové provedení štěpné jaderné reakce zásadní význam
- spektrum **okamžitých neutronů** je spojité (od velmi malých energií až do několika MeV. Nejvíce neutronů má energii kolem **0,7 MeV** (rychlé neutrony)
- všechny nuklidy mají nadbytek neutronů a podléhají až několikanásobné přeměně β^-
- vznikají tak štěpné produkty, z nichž některé emitují v důsledku vlastní nestability tzv. **zpožděné neutrony**, které je nutno vzít v úvahu při regulaci výkonu reaktoru

Průběh štěpení



- **záchyt neutronu, vznik excitovaného složeného jádra**
- **přeměny složeného jádra (SL)**



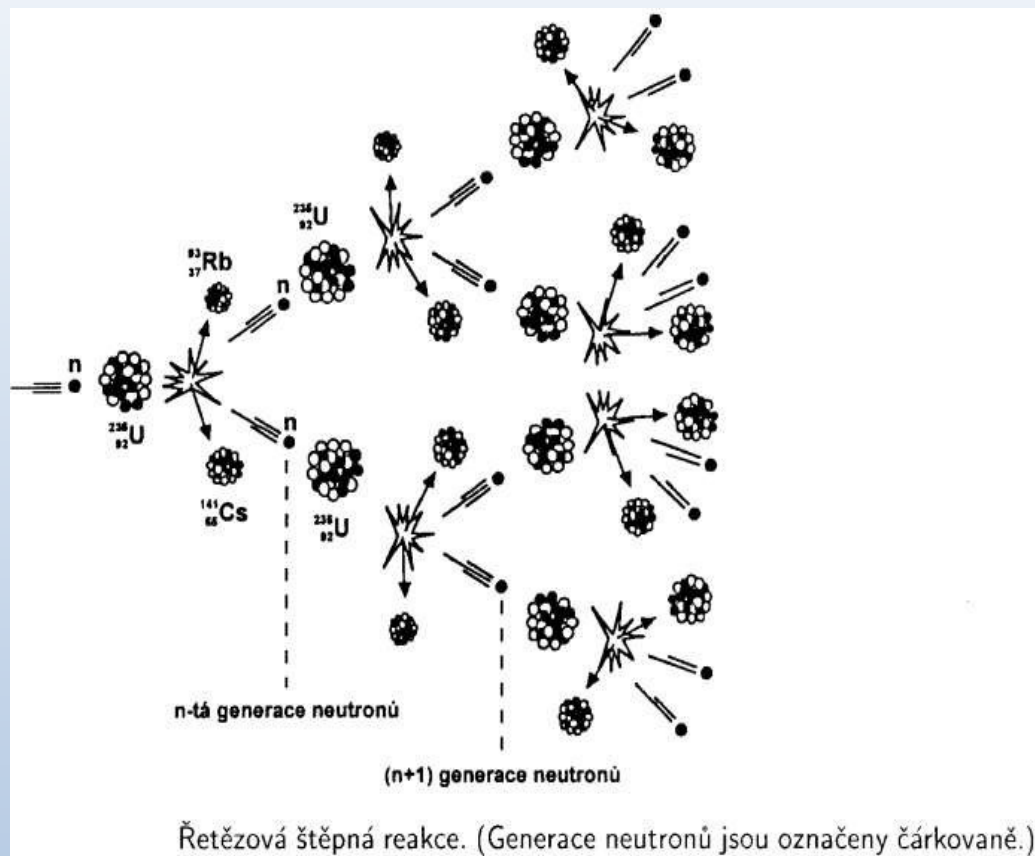
- **85 % energie složeného jádra se spotřebuje na jeho rozštěpení – tzv. energie **aktivační** E_A**
- **15 % energie SL se ztrácí deexcitací – emise fotonů bez štěpení**

| jádro | E_A (MeV) | E^* (MeV) | štěpení |
|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| ${}^{235}\text{U}$ | 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 složeného jádra, tj. při absorpci neutronu terčovým jádrem

Z této tabulky jasně plyne, proč se ${}^{238}\text{U}$ neštěpí pomalými neutrony

Rízená štěpná reakce a regulace reaktoru



- 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 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 (tj. $k=1$ 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

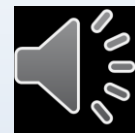
- 15 % jader ^{235}U zachytí neutron $^{235}\text{U}(n,\gamma)^{236}\text{U}$
- část jader ^{238}U zachytí neutron, to nakonec vede ke vzniku ^{239}Pu
- 30 % jader ^{239}Pu podlehe reakci $^{239}\text{Pu}(n,\gamma)^{240}\text{Pu}$
- v reaktoru je mnoho materiálů a štěpných produktů, které parazitně absorbují neutrony
- jistý počet z reaktoru unikne (proto je součástí konstrukce reaktoru tzv. reflektor)



Multiplikační faktor k

– číslo vyjadřující poměr počtu neutronů na konci každé generace k počtu neutronů generace předchozí

| | 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 |



Při štěpení jednoho atomu ^{235}U se uvolní asi **202,5 MeV** ($3,244 \times 10^{-11}$ J) energie, čemuž odpovídá **19,54 TJ** mol^{-1} nebo **83,14 TJ** kg^{-1} .

- z toho cca **175 MeV** připadá na kinetickou energii primárních štěpných produktů, jejichž jádra jsou v materiálu paliva silně brzděna a kinetická energie se přemění na energii tepelnou - ta je pak využívána pro tvorbu páry pro pohon turbíny.
- **zbytek energie** připadá na kinetickou energii neutronů, emisi fotonů a na excitační energii primárních štěpných produktů

Zpomalování (moderování) neutronů se realizuje pomocí moderátorů

lehká voda
těžká voda
grafit



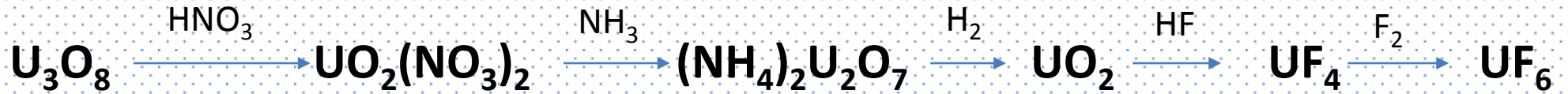
Z ekonomických důvodů se nejčastěji používá **obyčejná voda**, přestože má vyšší účinný průřez pro záchyt neutronů než ostatní materiály.

Voda v reaktoru plní funkci **moderátoru** i **chladiwa**.

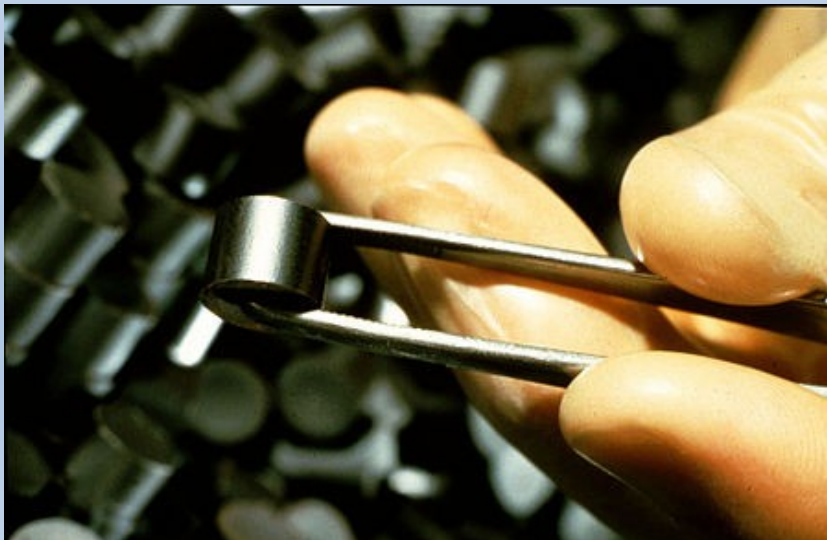
Pro udržení štěpné reakce v reaktoru platí následující kombinace paliva a moderátoru:

| Palivo | Moderátor |
|--|--|
| přírodní uran | těžká voda |
| uran obohacený izotopem ^{235}U na 3-5 % | obyčejná voda, s přísadkou H_3BO_3 |
| uran obohacený izotopem ^{235}U na 20 % | není třeba moderovat, štěpná reakce běží i s rychlými neutrony |

Výroba jaderného paliva

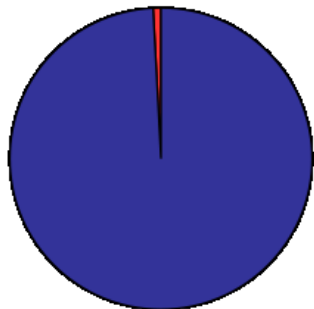


tzv. žlutý koláč

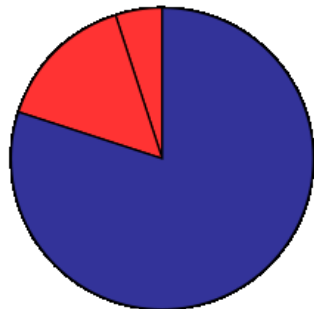


Tabletami se naplní palivové proutky, proutky jsou pak součástí palivových souborů.

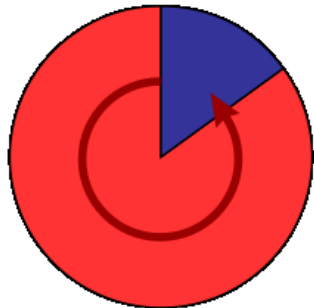
Obohacování uranu



Natural uranium (NU)
>99.2% U-238
≤0.72% U-235

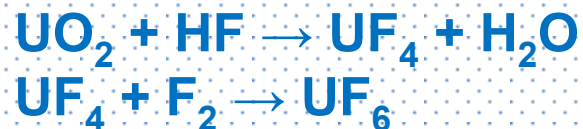


Low-enriched uranium (LEU)
(reactor grade)
<20% U-235
(typically 3-5% U-235)



Highly enriched uranium (HEU)
(weapons grade)
20-85% U-235
(≥85% U-235)

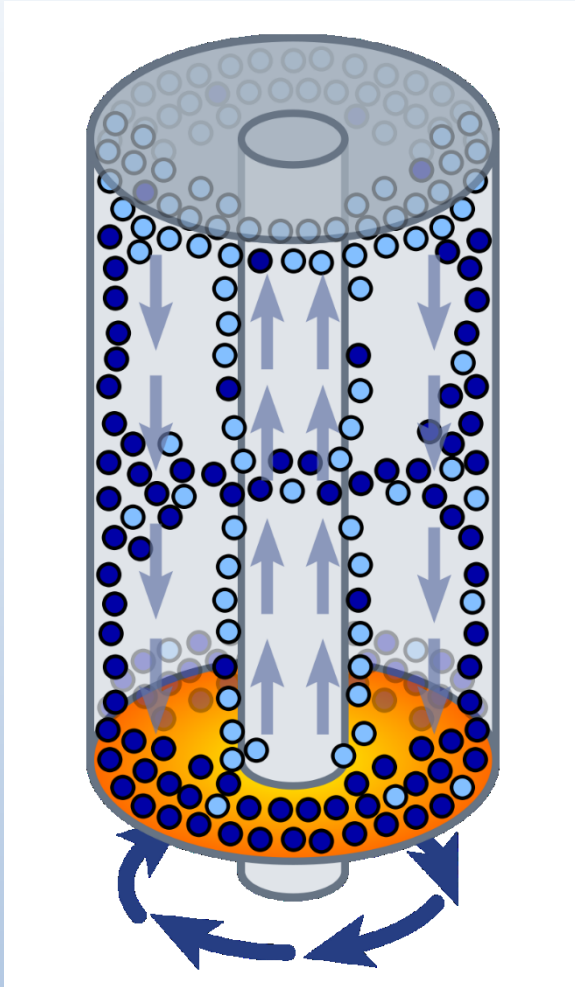
- V přírodních sloučeninách uranu je ^{235}U obsažen pouze v množství menším než 1 %.
- Pro jaderné elektrárny se uran obvykle obohacuje o ^{235}U řádově v jednotkách procent (asi 2-5 %).
- Pro výrobu jaderné zbraně je nutné připravit uran s obsahem ^{235}U 85 % a vyšším.
- Obohacování se provádí na základě následujících chemických dějů:



- **UF_6 byl pro tento účel vybrán díky jeho těkavosti ($T_t = 56,5 \text{ }^\circ\text{C}$, snadno sublimuje a dají se s ním provádět separační procesy určené pro plyny).**
- Mezi hmotnostmi UF_6 s ^{235}U a ^{238}U je malý rozdíl, který se dá využít pro jejich rozdělení UF_6 za pomoci **centrifugy** nebo **difúze** (na základě Grahamova zákona), nejmodernější způsob obohacování existuje v Austrálii a USA pomocí **laseru (SILEX proces)**



Zařízení pro obohacování uranu

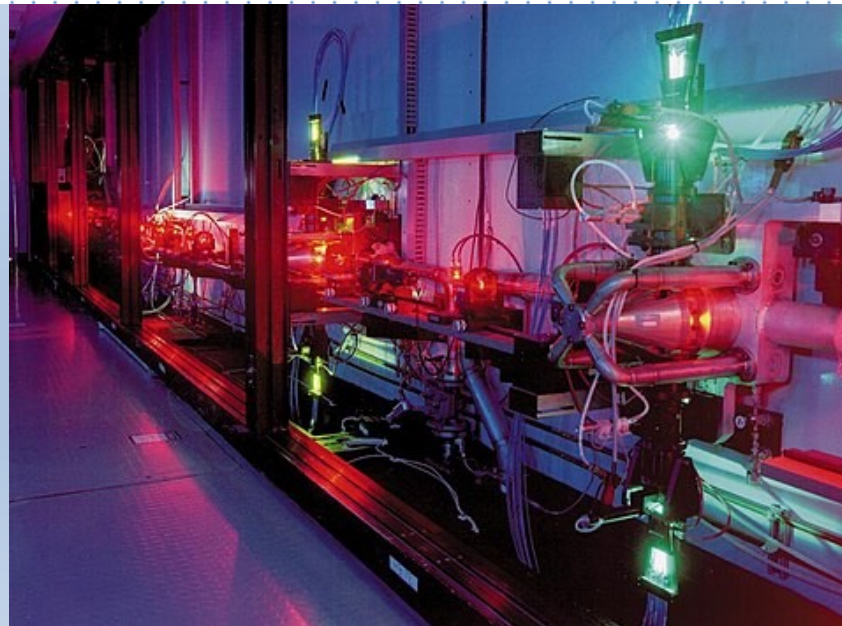


Princip centrifugy

Lehčí $^{235}\text{UF}_6$ se při centrifugování shromažďuje v horní části centrifugy (světle modré body), zatímco těžší $^{238}\text{UF}_6$ klesá do nižších poloh centrifugy.



Vzhledem k malému rozdílu v hmotnostech UF_6 je nutno proces dělení monohonásobněkrát opakovat – proto se konstruuje kaskády centrifug pro obohacování uranu např. v Íránu)



laserový SILEX proces



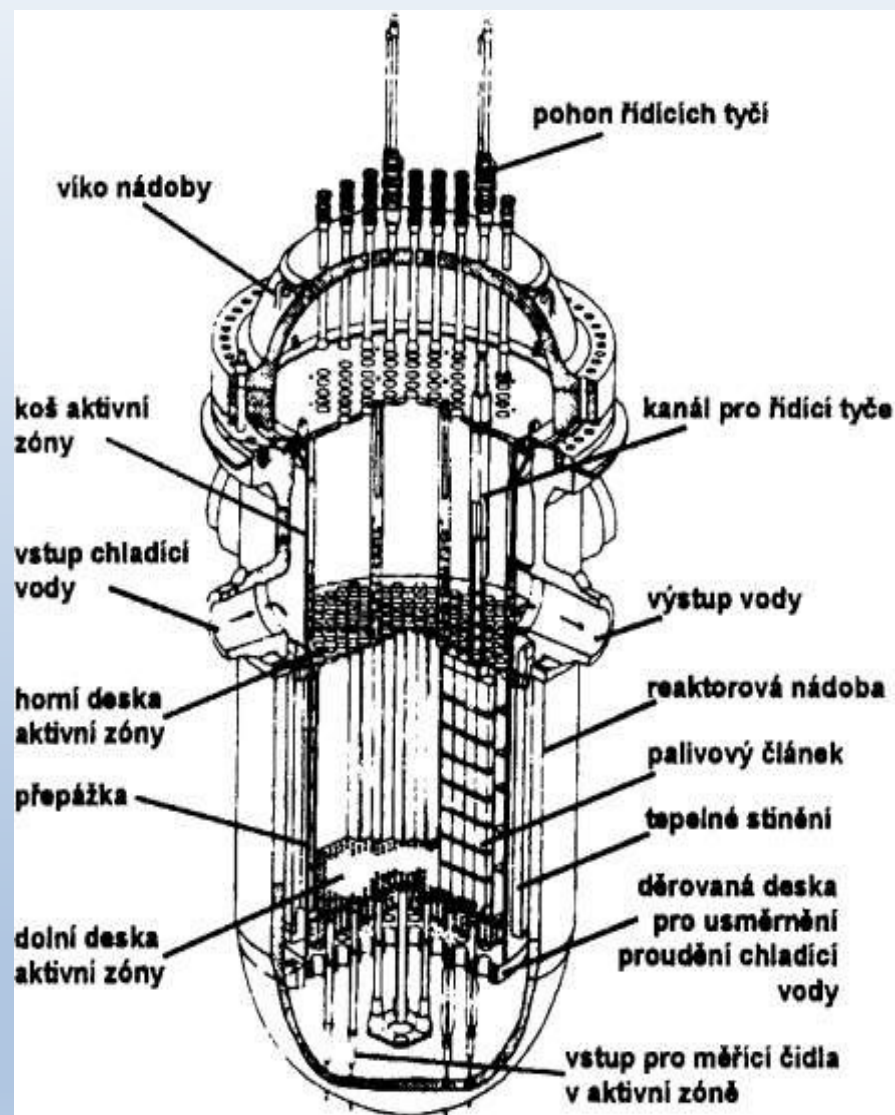
Jaderné reaktory



Jaderný reaktor \equiv 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)
- **energetický (viz dále)**



Typický tlakovodní reaktor.

Regulace reaktoru

Reaktor jako dynamický systém podléhá během provozu změnám, neboť se v něm hromadí štěpné produkty, které mají vysoké účinné průřezy pro záchyt neutronů.



Dochází k tzv. otravě reaktoru

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

Spuštění a provoz reaktoru

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



Tlakovodní reaktory pro energetiku

- jsou nejrozšířenější
- palivem je 2-5 % obohacený uran, obohaceno ^{235}U
- 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 do reaktoru shora

V ČR jde o reaktory: (jejich výkon je dnes díky novým poznatkům a režimu vyhořívání paliva poněkud vyšší, cca o 15 %)

- **VVER 440 MW (Dukovany)** – tepelný výkon je cca 3x vyšší
- **VVER 1000 MW (Temelín)** - tepelný výkon je cca 3x vyšší

Tlakovodní reaktory malých rozměrů

- pracují s vysoce obohaceným palivem (až 90 % ^{235}U)
- jsou malé, kompaktní, slouží jako pohon např. jaderných ponorek,
- vydrží v provozu 2-3 roky



VVER - vodou chlazený-vodou moderovaný energetický reaktor

Válcová nádoba ze speciální oceli

- průměr cca 7 m,
- výška 23 - 30 m,
- několik set tun,
- mř. požadavky na kvalitu materiálů i konstrukci

Aktivní zóna reaktoru \equiv prostor, ve kterém štěpení probíhá, reflektor, který snižuje úniky neutronů (**voda, grafit u pomalých reaktorů; železo, ochuzený uran u reaktorů rychlých**)

- palivo,
- moderátor u pomalých reaktorů,
- řídicí tyče,
- chladič médium

Palivo pro reaktor se vyrábí z přírodního nebo obohaceného uranu:

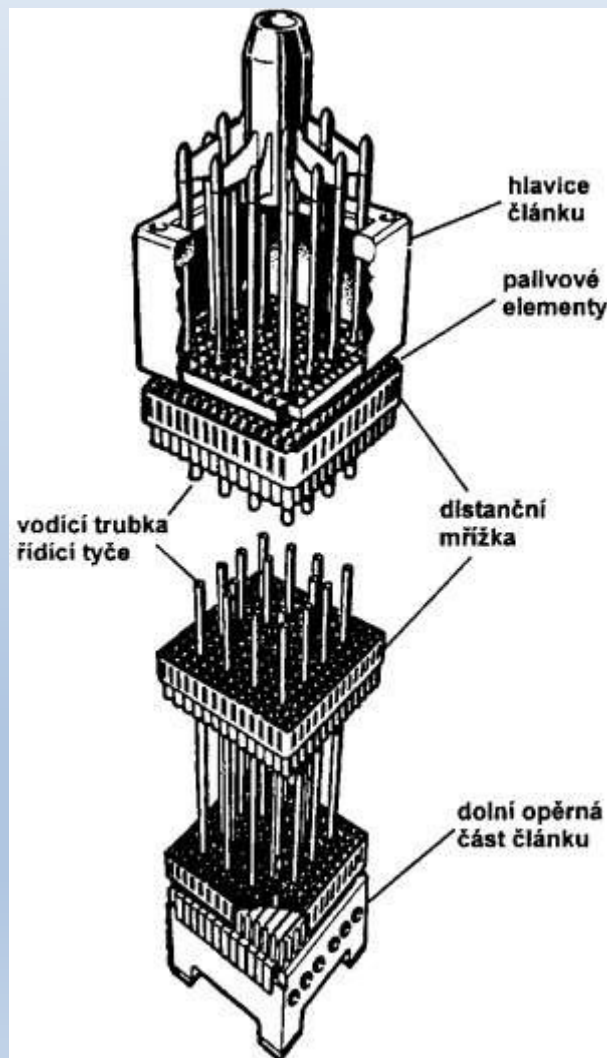
kovový uran pro těžkovodní reaktory (s příměsí legujících prvků pro zlepšení mechanických vlastností) má formu kovových prutů pokrytých vrstvou slitiny Mg+Al

palivo z obohaceného uranu pro lehkovodní reaktory je nejčastěji v podobě **UO₂** (tzv. keramické palivo) a 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 (palivová kazeta) udržuje palivo v kompaktním stavu, brání rozrušení palivového elementu. Má zpravidla tvar hranolu, zadržuje radioaktivní štěpné produkty v uzavřeném prostoru.

Soubor palivových elementů tvoří **palivový článok**. Palivových článků je v reaktoru až několik set, do reaktoru se vkládají a z reaktoru vyjímají pomocí zavážecího stroje.



Palivový článok

Palivové články nemohou zůstat v reaktoru do úplného spotřebování

(vyhoření) paliva, protože se snižuje reaktivita aktivní zóny, kde je vyhořívání paliva nejintenzivnější. Výrazně se také zhoršují mechanické vlastnosti palivového článku.



Aby se udržoval režim rovnoměrného vyhořívání paliva, je nutno:

- v průběhu provozu reaktoru jednotlivé kazety palivových článků v důsledku nerovnoměrného vyhořívání přemísťovat na jiné místo, tedy např. z aktivní zóny do okrajových částí reaktoru (nyní 5x ročně).
- nejvíce 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 ve vodním bazénu. Pak se přemísťují do tzv. **dočasného úložiště použitého jaderného paliva** – bývá v areálu jaderné elektrárny, doba uložení až 50 let). Po této době se přemísťují do hlubinného úložiště (min na cca 300 let). Po této době je reálná možnost přepracování tohoto paliva, které obsahuje mnoho uranu, a výroba paliva nového.



Kontejnery pro dočasné uložení použitého jaderného paliva v Dukovanech

Požadavky na chladicí médium



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

| | |
|------------------------|-------------------------------|
| pomalé reaktory | voda těžká voda helium |
| rychlé reaktory | roztavený sodík |

- Chladicí kapalina cirkuluje mezi palivovými články a odvádí z aktivní zóny teplo.
- Teplo se pak předává v sekundárním okruhu elektrárny vodě v parogenerátoru, kde se pak vytváří tlaková pára pro pohon turbíny.

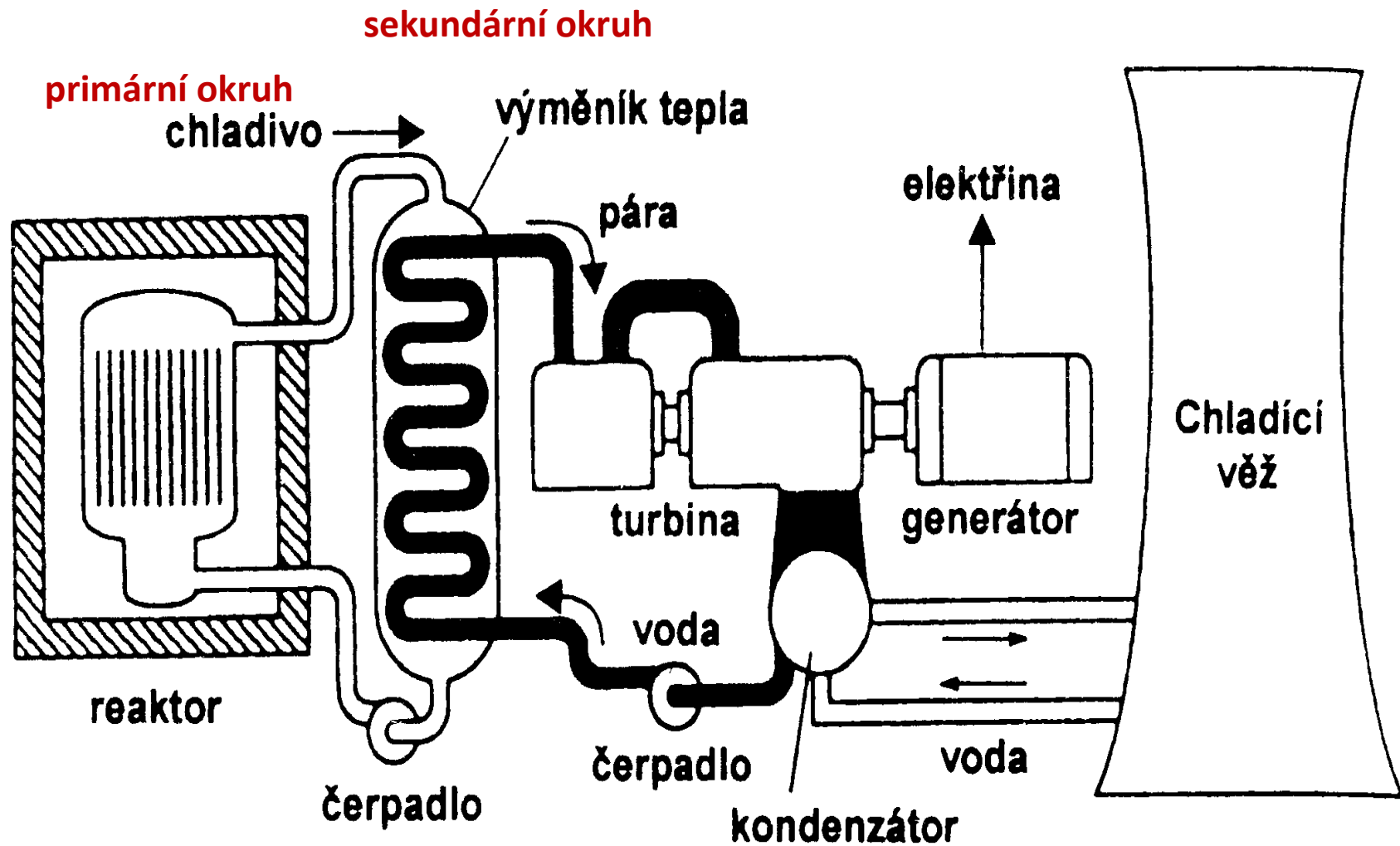
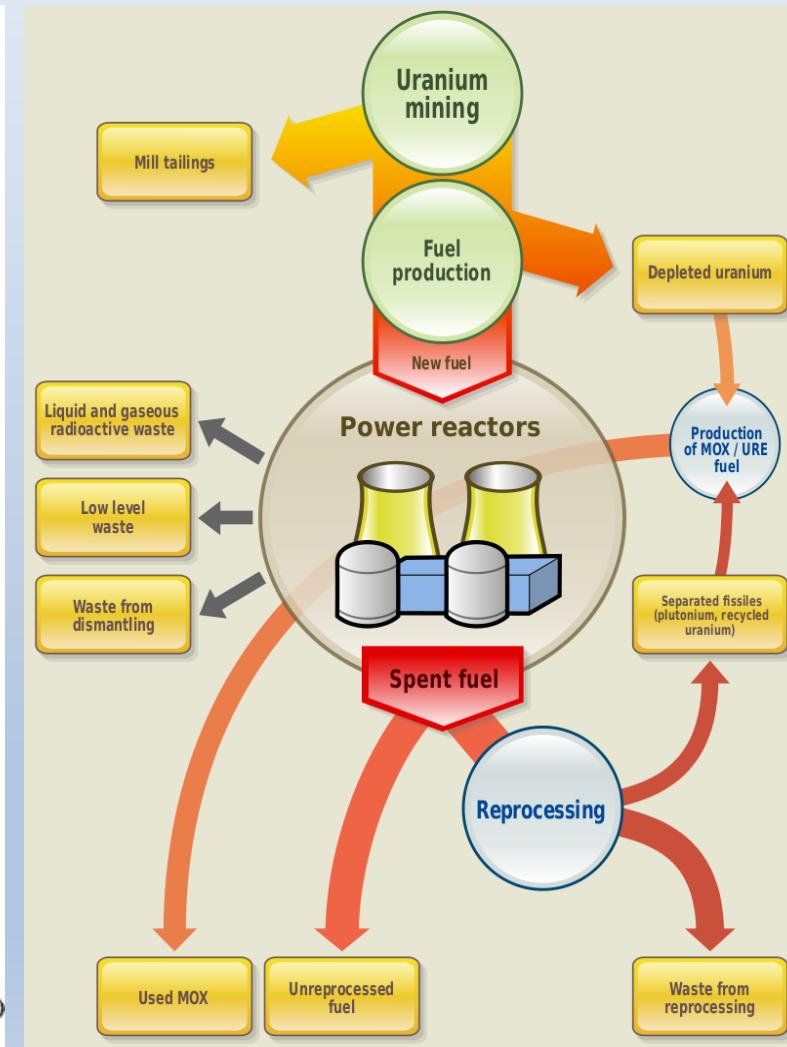
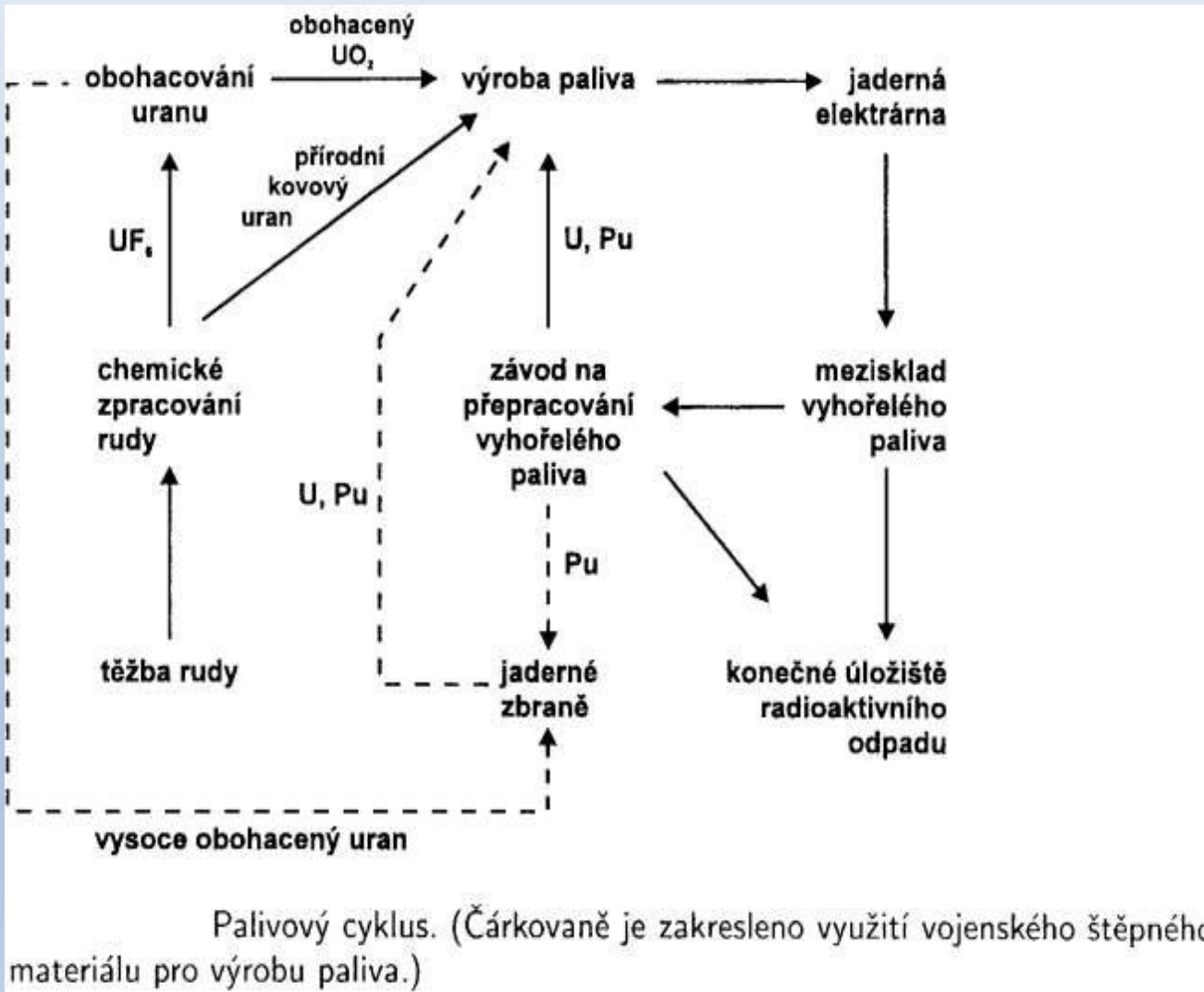


Schéma dvouokruhové jaderné elektrárny.

Palivový cyklus – zahrnuje celý proces koloběhu paliva, tj. od těžby uranové rudy, použití v reaktoru, jeho uskladnění po vyhoření a jeho další zpracování.

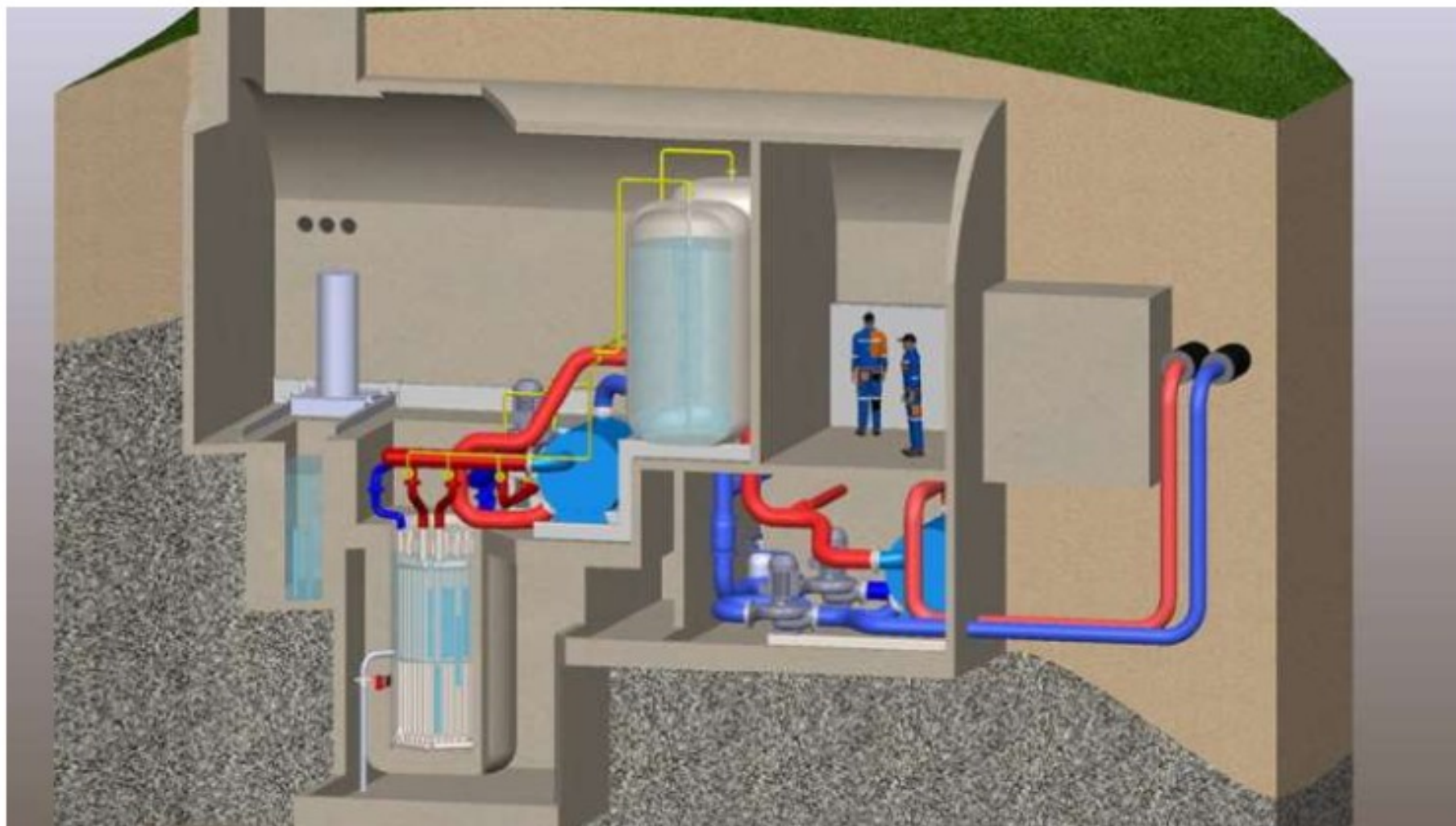


Další typy reaktorů



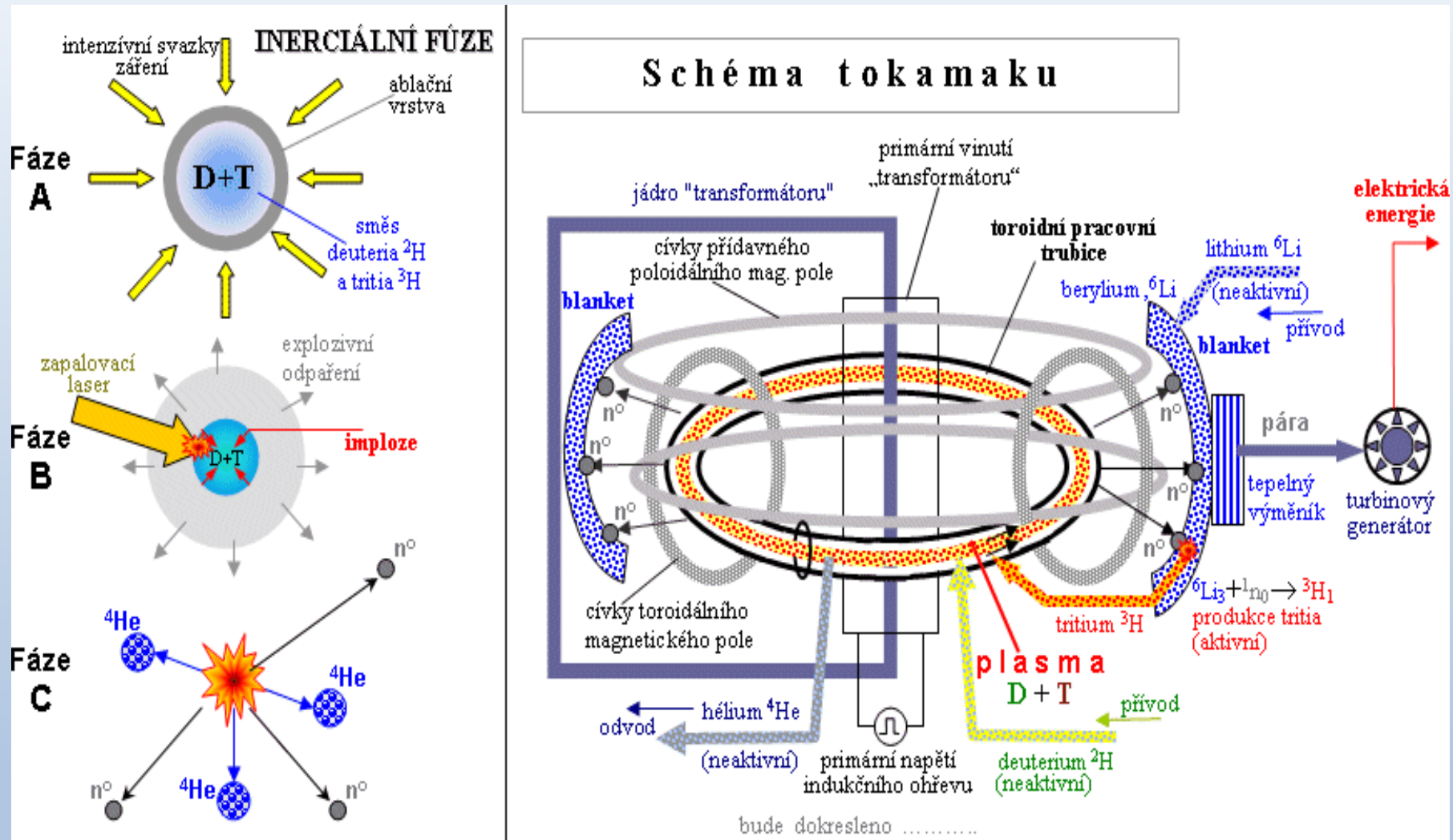
- **Varné reaktory** – jsou větší než tlakovodní, voda se částečně mění v páru, řídicí tyče se zasouvají zespodu.
- **Těžkovodní reaktor** – reaktor s tlakovými kanály, chlazen i moderován těžkou vodou, palivem je přírodní uran (Kanada – CANDU). Podobný reaktor byl i reaktor A1 v Jaslovských Bohunicích, 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}U nebo palivo s odpovídajícím obsahem ^{239}Pu . Chladí se roztaveným sodíkem. Pracují hlavně ve Francii (Phénix, Superphénix).
- **Množivé (plodivé) reaktory (tzv. breeders)** – rychlé reaktory s plutoniem, kdy průměrný počet neutronů při jednom aktu štěpení je 3. Jeden z neutronů je využíván (zcela záměrně) k záchytné reakci $^{238}\text{U}(n,\gamma)$, která vede k plutoniu. Při provozu reaktoru vzniká více plutonia, než se spotřebuje. Vnější část reaktoru je proto obklopena tzv. plodivou zónou, která je zhotovena z tablet z ochuzeného UO_2 .

Reaktor pro domácí využití



Koncept malého podzemního reaktoru pro dálkové vytápění (Obrázek: Lappeenranta University of Technology)

Termojaderná fúze – získávání tepla pro energetické účely slučováním lehkých jader



Dva základní způsoby řízené termonukleární fúze:

Vlevo: Zjednodušený princip inerciální fúze a průběh termonukleární mikro-exploze.

Vpravo: Zjednodušené principiální schéma tokamaku.

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.

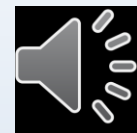
Aktivita v aktivní zóně dosahuje cca 10^{20} Bq \Rightarrow hlavním cílem je udržet aktivní zónu v neporušeném stavu.

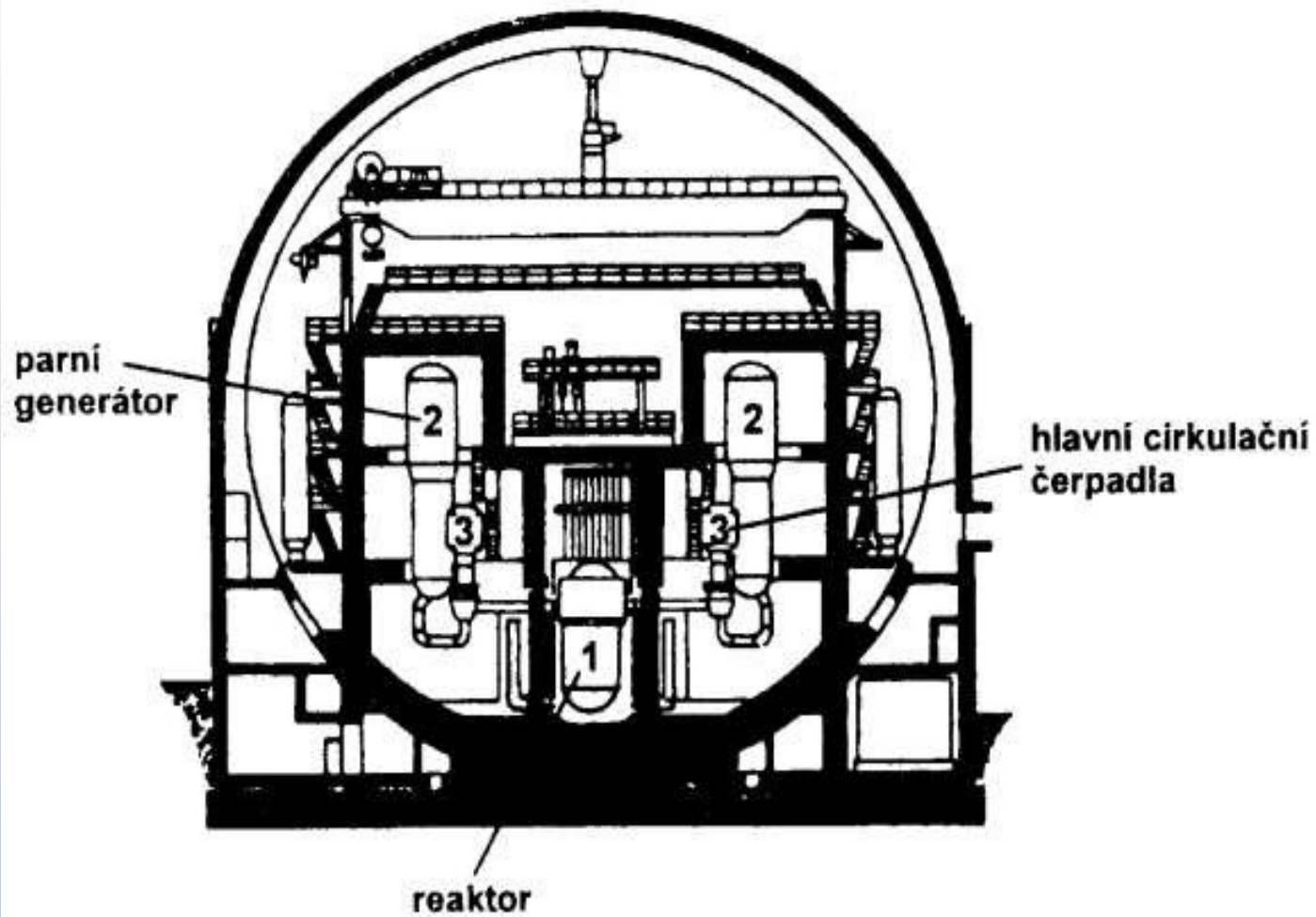
Příčiny možné havárie

- 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 plyných 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 dieselaagregátů.
- šíření radioaktivních látek do okolí brání několik bariér.
- (pokrytí palivových elementů, umístění reaktoru ve speciální budově – kobky a prostory pro zdržení uniklého chladiva).
- instalace **kontejmentu** (záchytná budova odolná vůči přetlaku i mechanickému poškození).





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

A na závěr motto:



Mírná radioaktivita nikdy neškodí.