

# Jaderné reaktory a elektrárny

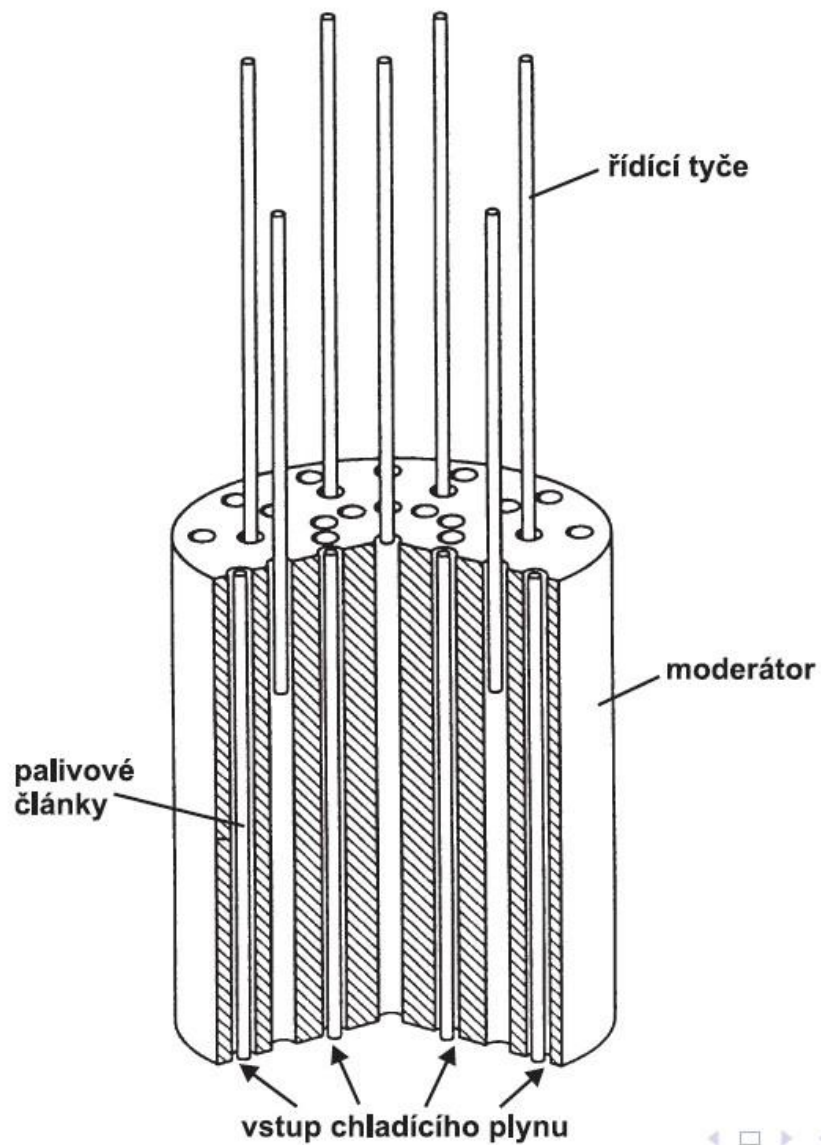
Mgr. Ondřej Jašek, Ph.D., 25.10.2016

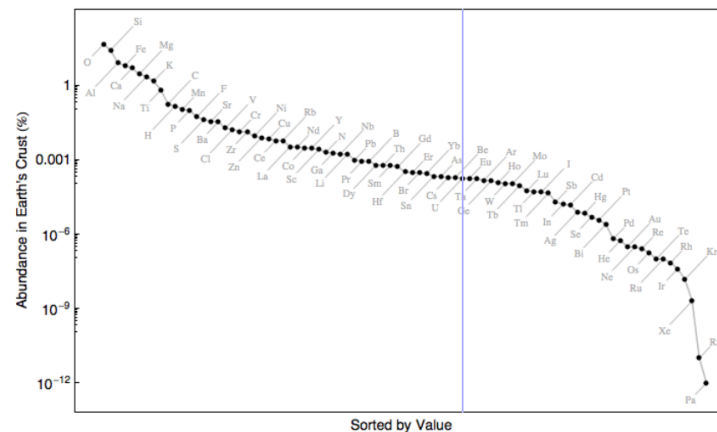
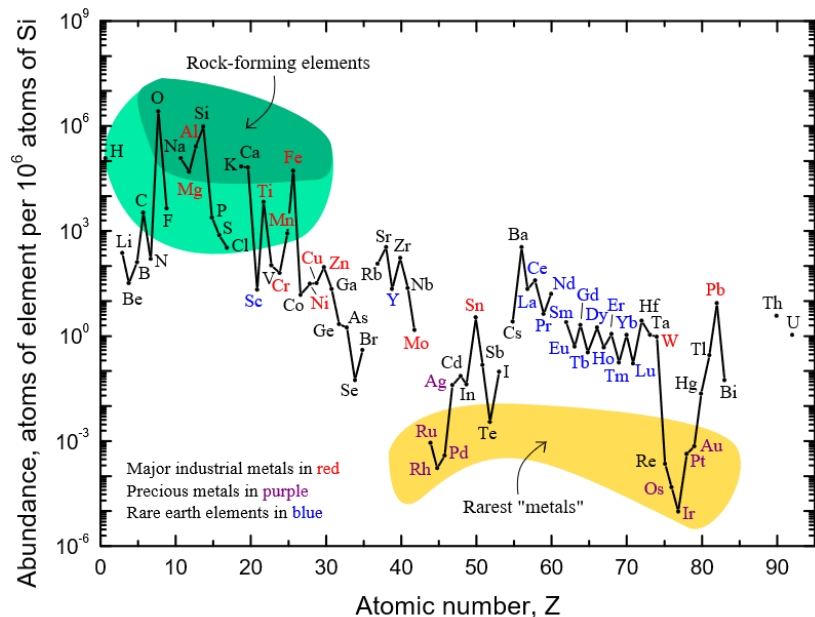
# Jaderné reaktory a elektrárny – součásti a materiály jaderných reaktorů

## Základních části standardního reaktoru

- **palivo**
  - dochází v něm ke štěpení a uvolňuje se energie
- **moderátor**
  - pomocí srážek neutronů s jádry atomů snižuje kinetickou energii neutronů
- **chladio**
  - tekutina odvádějící vznikající tepelnou energii ven z reaktoru
- **stavební materiály**
  - tvoří ochranný obal paliva a moderátoru a dále vnitřní vestavby reaktoru
- **reflektor**
  - část reaktoru přiléhající k aktivní zóně a sloužící k odražení co největšího počtu unikajících neutronů zpět do aktivní zóny
- **regulační a ovládací zařízení**
  - absorpcí neutronů umožňují udržovat výkon reaktoru na žádané hodnotě
- **ochranný kryt**
  - chrání obsluhu reaktoru před zářením vznikajícím v rektoru

# Reaktor moderovaný grafitem a chlazený plynem



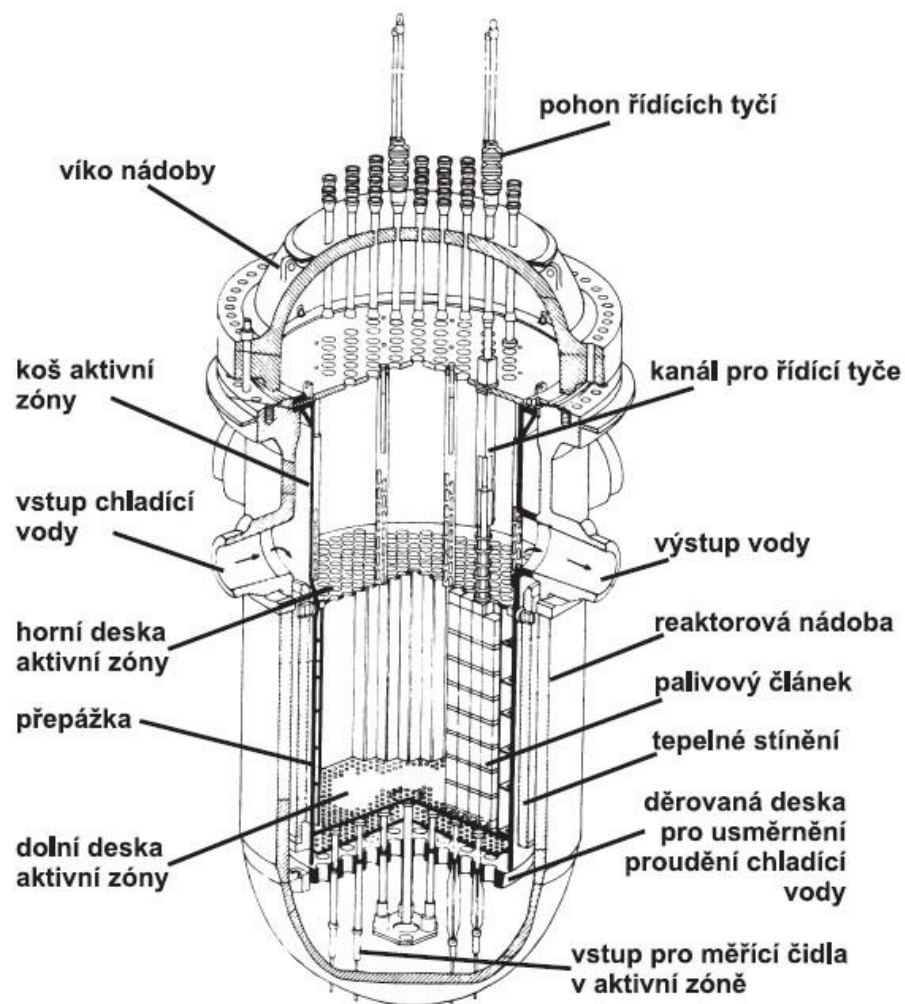


Up to date, curated data provided by *Mathematica's* ElementData function from Wolfram Research, Inc.

| nuklid            | počet neutronů $\nu$ |
|-------------------|----------------------|
| $^{233}\text{U}$  | 2.49                 |
| $^{235}\text{U}$  | 2.42                 |
| $^{239}\text{U}$  | 2.90                 |
| $^{239}\text{Pu}$ | 2.93                 |

| Hmotové číslo | Název řady | Mateřské jádro         | Poločas rozpadu (roky) | Stabilní konečný produkt |
|---------------|------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| 4n            | thoriová   | $_{90}\text{Th}^{232}$ | $1,39 \cdot 10^{10}$   | $_{82}\text{Pb}^{208}$   |
| 4n+1          | neptuniová | $_{93}\text{Np}^{237}$ | $2,25 \cdot 10^6$      | $_{83}\text{Bi}^{209}$   |
| 4n+2          | uranová    | $_{92}\text{U}^{238}$  | $4,51 \cdot 10^9$      | $_{82}\text{Pb}^{206}$   |
| 4n+3          | aktiniová  | $_{92}\text{U}^{235}$  | $7,07 \cdot 10^8$      | $_{82}\text{Pb}^{207}$   |

# Reaktor moderovaný a chlazený lehkou vodou (VVER, PWR)



# Jaderné reaktory a elektrárny – součásti a materiály

## jaderných reaktorů

Pro popis zpomalování neutronu, pružnými srážkami za předpokladu sféricky symetrického rozptylu v těžištvé soustavě, dostáváme průměrný pokles energie neutronu jako  $\xi = \ln(E_1'/E_1)$ , pro  $m_1 = m_n = u$  a  $m_2 = m_x = A \cdot u$

$$\xi = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1} \quad \xi = \frac{2}{A + \frac{2}{3}}$$

Pro  $A > 10$ , dostáváme druhý výraz, avšak přesnost je dobrá i pro  $A=2$ . Tento koeficient je nezávislý na počáteční energii neutronu. Mimo  $\xi$  musí mít moderátor i velký účinný průřez pro pružnou srážku, součin těchto veličin pak udává tzv. moderovací schopnost. Podíl tohoto výrazu a účinného průřezu pro absorpci neutronu pak udává koeficient moderace.

| prvek     | hmotnostní číslo | $\xi$   | počet srážek ke zpomalení rychlých neutronů na tepelnou energii |
|-----------|------------------|---------|---|
| 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  |

| moderátor           | (moderační) zpomalovací schopnost | koeficient moderace |
|---------------------|-----------------------------------|---------------------|
| voda                | 1.53                              | 72                  |
| těžká voda          | 0.370                             | 12.000              |
| helium <sup>1</sup> | $1.6 \times 10^{-5}$              | 83                  |
| beryllium           | 0.176                             | 159                 |
| uhlík               | 0.064                             | 170                 |

# Jaderné reaktory a elektrárny – součásti a materiály jaderných reaktorů

## Kontejment

- primární okruh a další bezpečnostní a pomocná zařízení - jsou uzavřeny v ochranné obálce nazývané kontejment
  - jsou vybaveny ventilem s radiačními filtry - po havárii lze přetlakovanou páru vypouštět kontrolovaně do ovzduší s tím, že naprostá většina RA látek bude zachycena na filtrech
  - Sprchový a ventilační systém – snížení tlaku, zachycení plynných radioaktivních látek a oplach plochy kontejmentu

## Primární okruh

- soubor zařízení, jejichž úkolem je řídit štěpnou řetězovou reakci a odvádět teplo při ní vznikající; hlavní částí primárního okruhu je reaktor

## Sekundární okruh

- soubor zařízení, která přeměňují pohybovou energii páry na energii elektrickou; nejsou zde jaderná zařízení a nevyskytují se zde ani RA látky

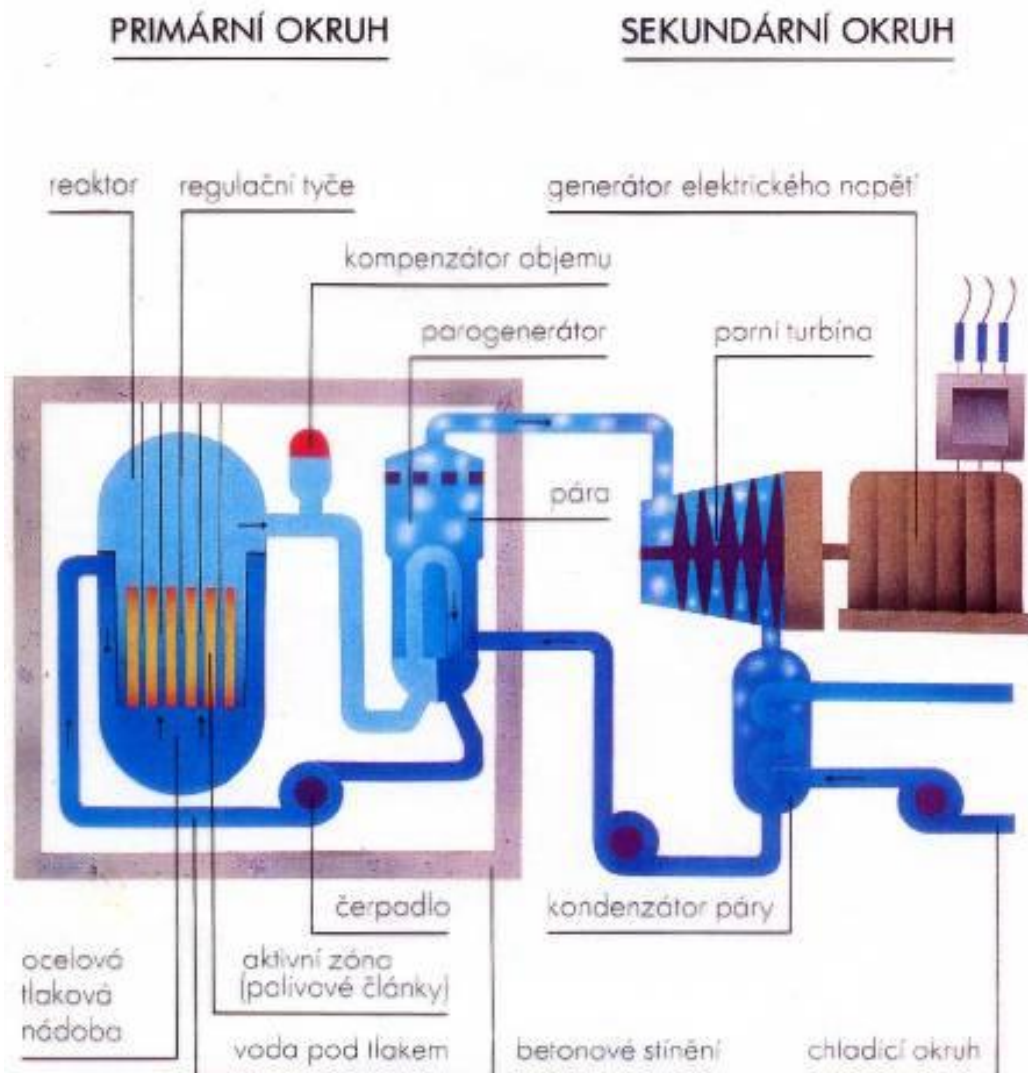
## Chladící okruh

kompenzace objemových, chemických změn v primárním okruhu, dochlazování odstaveného reaktoru, ochlazování bazénů s vyhořelým palivem, havarijních chladících okruh – vysokotlaký a nízkotlaký, zaplavovací – kyselina boritá pod dusíkem - ventil s přetlakem primárního chladiva

## Diesel generátorová stanice

- Pro případ ztráty hlavního i rezervního elektrického napájení vlastní spotřeby je elektrárna vybavena nouzovými zdroji elektrické energie

# Schéma PWR

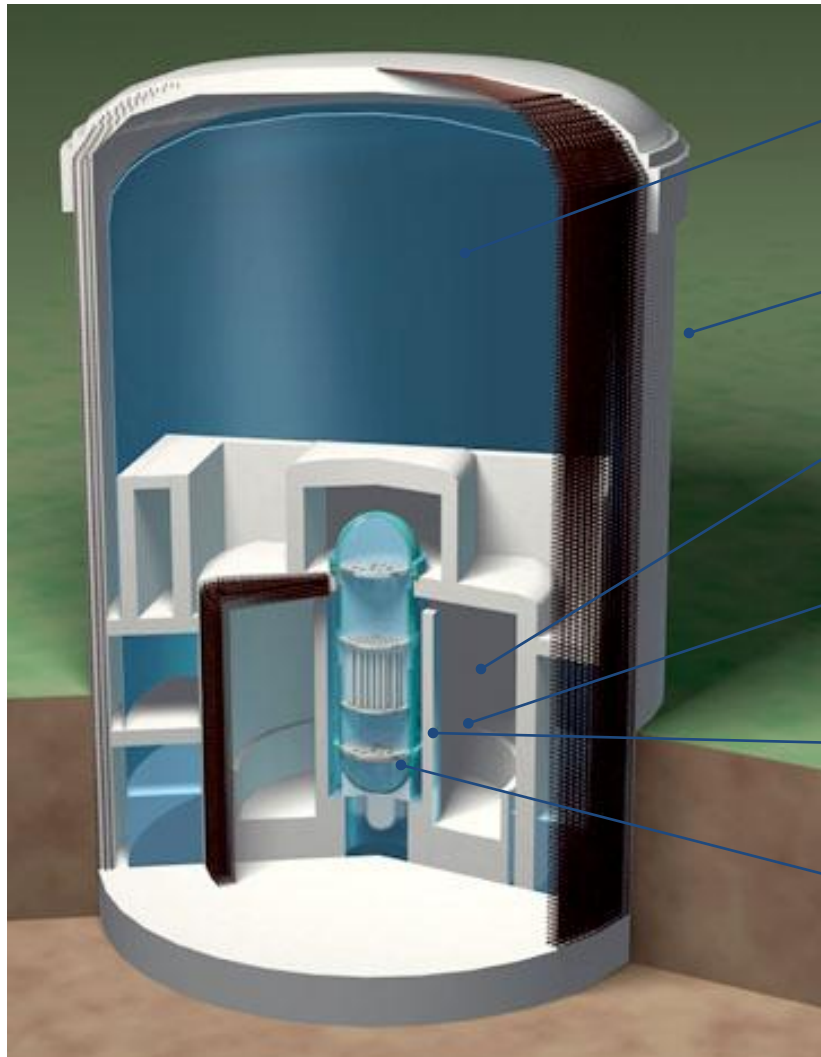


## Typické parametry reaktoru VVER-1000:

- obohacení U izotopem  $^{235}\text{U}$ : 3.1% až 4.4%
- Tlaková nádoba v: 10,9 m, vnitřní a vnější průměr 4,1 a 4,5 m. Hmotnost 800 t
- rozměry aktivní zóny: 3 m průměr a 3,5 m výška, 163 kazet (312 proutků, 766 (563 palivo)), 61 řídicích a regulačních svazků
- tlak vody: 15,7 MPa, teplota vody na výstupu reaktoru: 324°C , vstup , 4 chladicí smyčky – 995/850 mm - 84 600 m<sup>3</sup>/h
- účinnost elektrárny: 32,7%
- množství paliva v reaktoru: 92 tun  $\text{UO}_2$ , max. vyhoření 60 MWd/kg



# Bezpečnost je součástí projektu ochrana do hloubky, bariéry



Ochranná obálka (kontejnment) Ocel 8 cm

Ochranná obálka  
Předepnutý beton 1,1- 1,2 m

Stavební konstrukce okolo reaktoru

Biologické stínění  
ocel

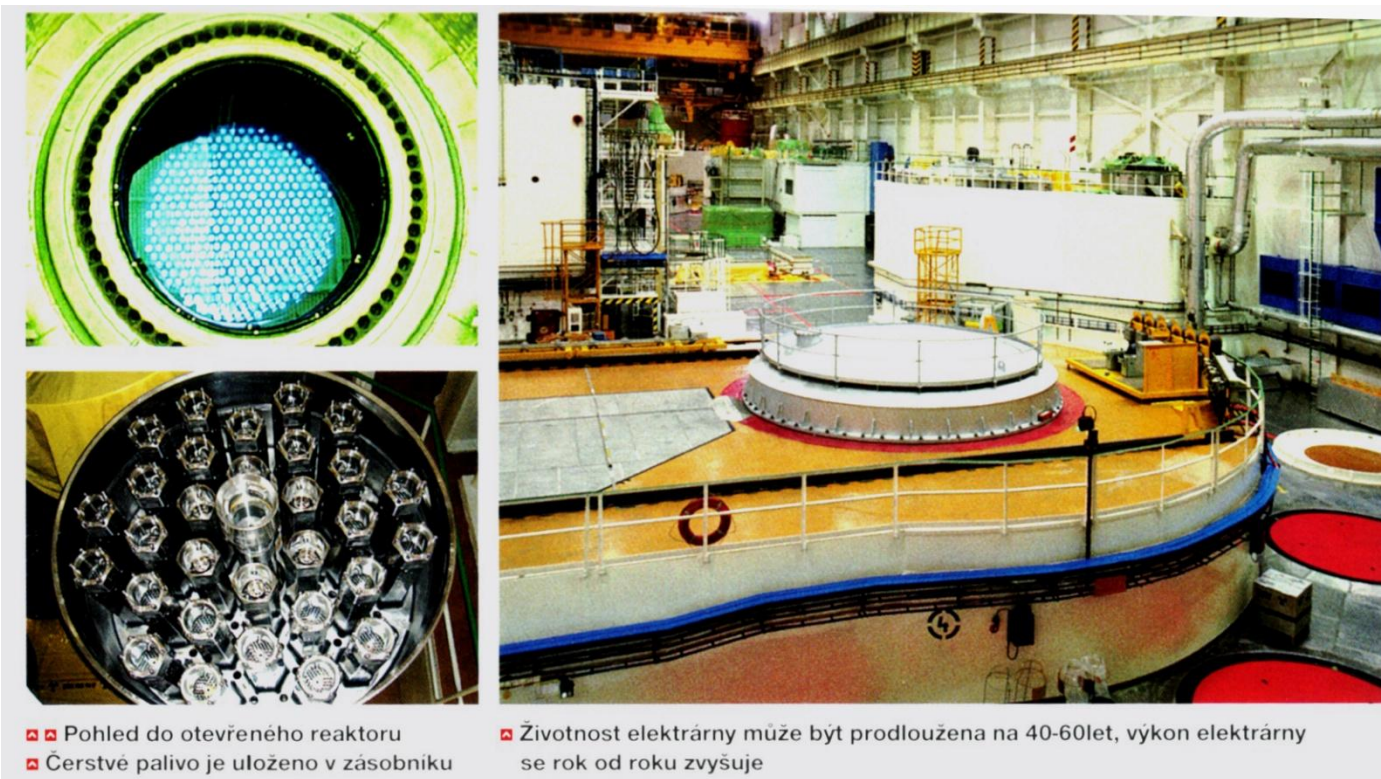
Reaktorová nádoba  
Ocel 20 cm

Palivové články

Temelín: Půdorys 66x66 m, Výška 38 m,  
průměr 45 m, deska 2,4 m, Max. přetlak  
0,5 MPa, 150 °C, Počet před. lan 96+36

<https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/jaderna-energetika/jaderna-elektřiny-cez/ete/technologie-a-zabezpečeni/2.html>

# Blok Dukovany – VVER440 – dnes 510 MW



# Jaderné reaktory a elektrárny - Materiály jaderných reaktorů

Požadavky na materiály v konstrukci a provozu jaderných reaktorů –

Odolnost při provozu za vysokých teplot

Zachování pevnosti a tvaru

Chemická stálost a malá chemická reaktivita

Odolnost vůči korozi

Dobrá tepelná vodivost

S hlediska interakce s neutrony -

**Málo absorbující materiály** – málo vhodné klasické nerez oceli díky přítomnosti příměsí absorbující neutrony, nutnost používat super čistý uhlík opět kvůli přítomnosti bóru v klasických uhlíkových materiálech

**Radiační stabilita materiálů** – díky interakci jaderného záření s materiály vznikají krystalografické chyby, které mohou značně ovlivnit materiály –  
Radiální růst, creep, objemový růst, akumulace skryté energie –  
Wiegnerův efekt – hromadění defektů v uhlíku - přežíhání

# Jaderné reaktory a elektrárny - Materiály jaderných reaktorů

Příklady typů materiálů používaných v jaderném reaktoru -

**Hliníkové** (jen pro nižší teploty pod **200-300 °C** ve vodě) a **hořčíkové** materiály (plynem chlazené reaktory)

**Zirkonium** a jeho slitiny – pokrytí palivové tablety a článků – nízký účinný průřez, pevnost, dobrá odolnost vůči korozi. Použití do **500 °C**. Alternativa keramiky na bázi SiC – TRISO tristructural isotropic

**Austenitické** (Austenit je tuhý roztok uhlíku v železe. Je to nemagnetická fáze slitiny uhlík–železo), oceli a slitiny na bázi **niklu** – HASTELLOY®N – Ni 71, Cr 7, Mo 16, Fe 5 – velmi dobrá odolnost až do **700 °C**

# Jaderné reaktory a elektrárny – Vliv teploty na reaktivitu, materiály jaderných reaktorů

## Chladivo

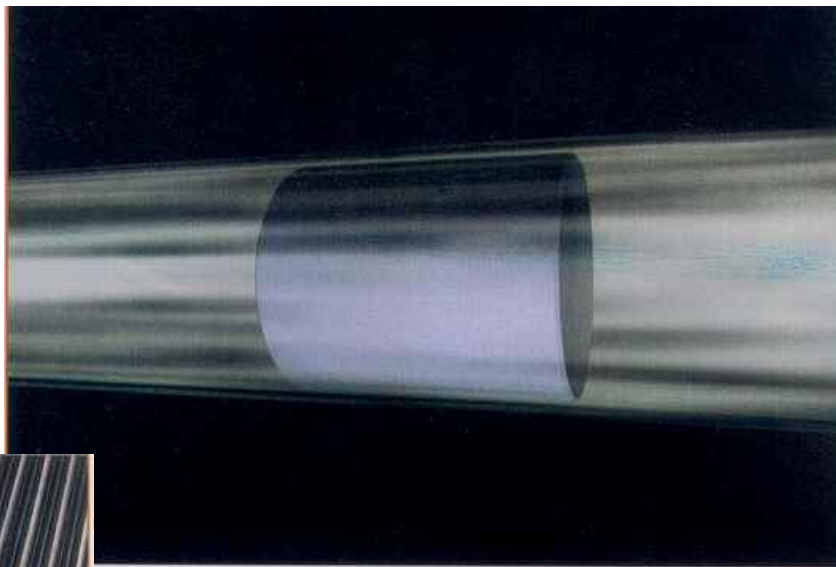
- hlavní funkce:
- chladit AZ
- hlavní požadavky:
- málo pohlcovat neutrony
- dobře odvádět teplo z AZ
- možnost ohřátí na vysokou teplotu
- další požadavky
- nízká a krátkodobá indukovaná radioaktivita
- dostatečná stabilita při provozních teplotách
- nízká náchylnost ke korozi a erozi vůči materiálům I.O.
- přijatelné náklady na chladivo a jeho údržbu
- používané materiály:
- **CO<sub>2</sub>**
- **He**
- **H<sub>2</sub>O**
- **D<sub>2</sub>O**
- **tekuté kovy (Na, Pb-Bi) – pro rychlé reaktory**

## Materiály absorpčních tyčí

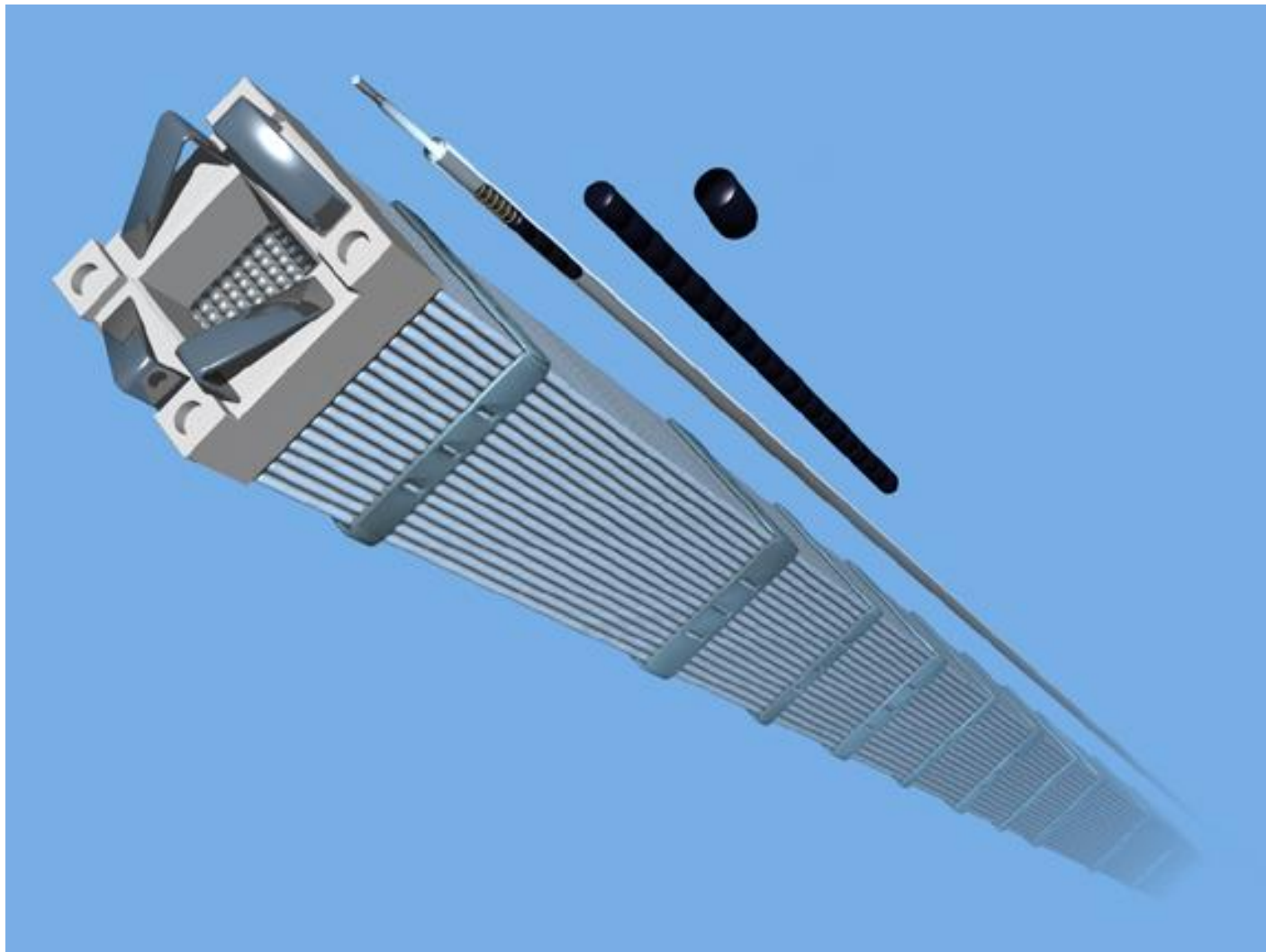
- hlavní funkce:
- silná absorpce neutronů
- používané materiály:
- **B – tyče (B<sub>4</sub>C, ZrB<sub>2</sub>), tekutá forma (kyselina boritá H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>)**
- **Cd – tyče (dříve)**
- **Gd (Gadolinium) – vzácná zemina, vyhořívající absorbátor (Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)**



# Palivový článek

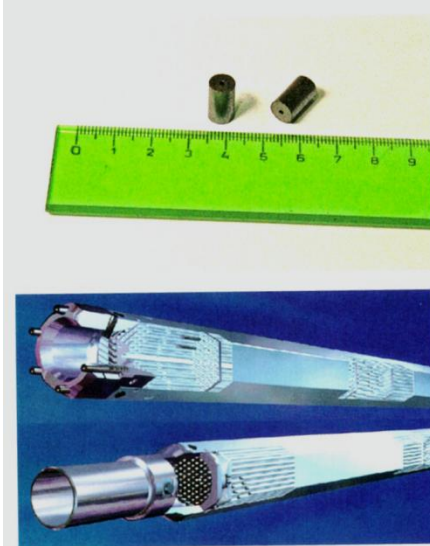


Palivové proutky naplněné peletami jsou poskládány do palivových článků





# Nakládka reaktoru Dukovany



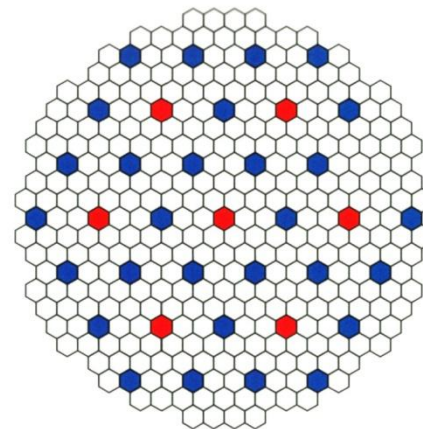
▣ Pelety lisované z oxidu uraničitého váží asi 5 g  
▣ Palivové kazety od ruského výrobce TVEL



▣ K zavezení paliva do reaktoru slouží speciální stroj



▣ Sklad čerstvého paliva



○ Pracovní kazeta    ● Bezpečnostní kazeta    ● Regulační kazeta

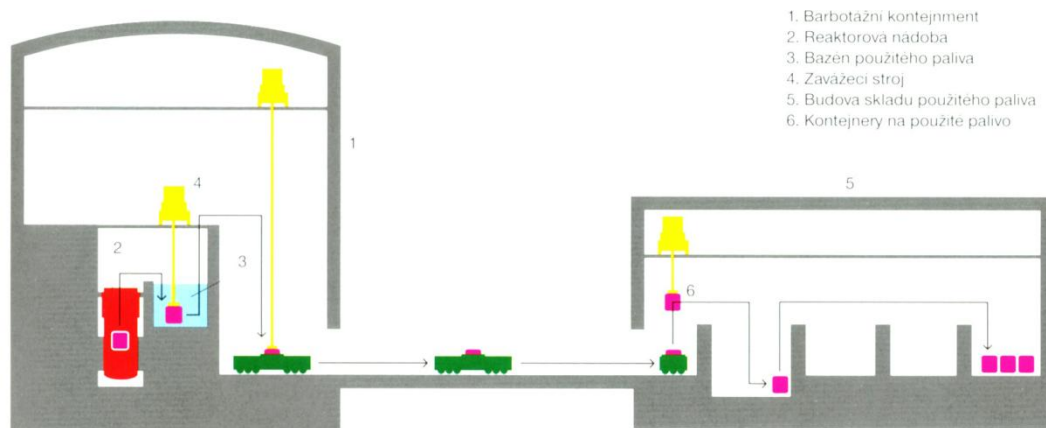
▣ Rozmístění regulačních kazet



▣ Transportní zásobník paliva ve skladu čerstvého paliva



# Radioaktivní odpad v Dukovanech



■ Schéma zacházení s použitým jaderným palivem

Likvidace pevných, kapalných a plyných odpadů:  
Rozdělení podle expozice  
Uskladnění po dobu poklesu aktivity, filtrace, separace, umístění do úložiště.  
Vypouštění kapalných a plyných odpadů.



■ Úložiště středněaktivního a nízkoaktivního odpadu

# Jaderné reaktory a elektrárny

Mgr. Ondřej Jašek, Ph.D., 1.11.2016

# Jaderné reaktory a elektrárny – Vliv teploty na reaktivitu, materiály jaderných reaktorů

Vliv vzrůstu teploty na reaktivitu :

- a) Vzrůst teploty vede k vzrůstu energie neutronů a tím pádem k posunu hodnot účinných průřezů.
- b) Změní se hustoty materiálů a tím i střední volná dráha neutronů a změní množství ztracených neutronů.

**S hlediska stability je vhodné, aby se koeficient reaktivity s hlediska růstu teploty byl záporný a malý.**

S tohoto hlediska je voda dobrý moderátor, grafit naopak horší.

# Jaderné reaktory a elektrárny – Vliv teploty na reaktivitu, materiály jaderných reaktorů

Vliv teploty chladící kapaliny na provoz reaktoru

- a) Teplota palivových článků je pod bodem varu chladící kapaliny –  
**Teplo je odváděno konvekcí** – vše v pořádku při dostatečném průtoku kapaliny ( $3 - 3,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ )
- b) Pokud se vyskytují na povrchu článků body s vyšší teplotou než je bod varu dochází k přehřátí kapaliny a vzniká povrchový var. **Snižuje chladící a moderovací schopnost**
- c) Pokud i teplota chladiva překročí bod varu přejde povrchový var v objemový
- d) Pokud je nedostatečný odvod tepla dojde k výskytu plynné fáze na celém povrch článku a značně se snižuje chladící schopnost a roste nastává tzv. **krize varu**. V tomto případě je potřeba omezit výkon reaktoru a zabránit vzniku dalšího tepla.

# Dlouhodobá kinetika aktivní zóny

Činnost reaktoru lze charakterizovat veličinou **reaktivita**, kterou určujeme vztahem  $r = [(k-1)/k]$ . Reaktivita je kladná pro nadkritický reaktor, záporná pro podkritický reaktor a rovna nule, je-li reaktor právě kritický.

Změny v  $r$  jsou způsobeny úbytkem původního štěpícího materiálu  $^{235}\text{U}$  a vznikem nového  $^{239}\text{Pu}$  a vznikem dceřiných produktů rozpadu, které mohou zachycovat neutrony. Proto je potřeba mít **určitou zásobu reaktivity** pro udržení kritického stavu.

Reaktor se tedy konstruuje s větší aktivní zónou a vloží se do ní absorbátory tj. kompenzační tyče např. kadmína nebo bóru, ale i uranu. Vysunutím tyčí pak kompenzujeme pokles toku neutronů.

K okamžité regulaci slouží regulační tyče a zastavení reakce havarijní tyče.

Poznámka:

I reaktor typu PWR tedy funguje jako množivý reaktor (breeder), avšak nevyrábí více paliva ( $^{239}\text{Pu}$ ), než je do něj vloženo  $\sim 0,5 - 0,8$ .

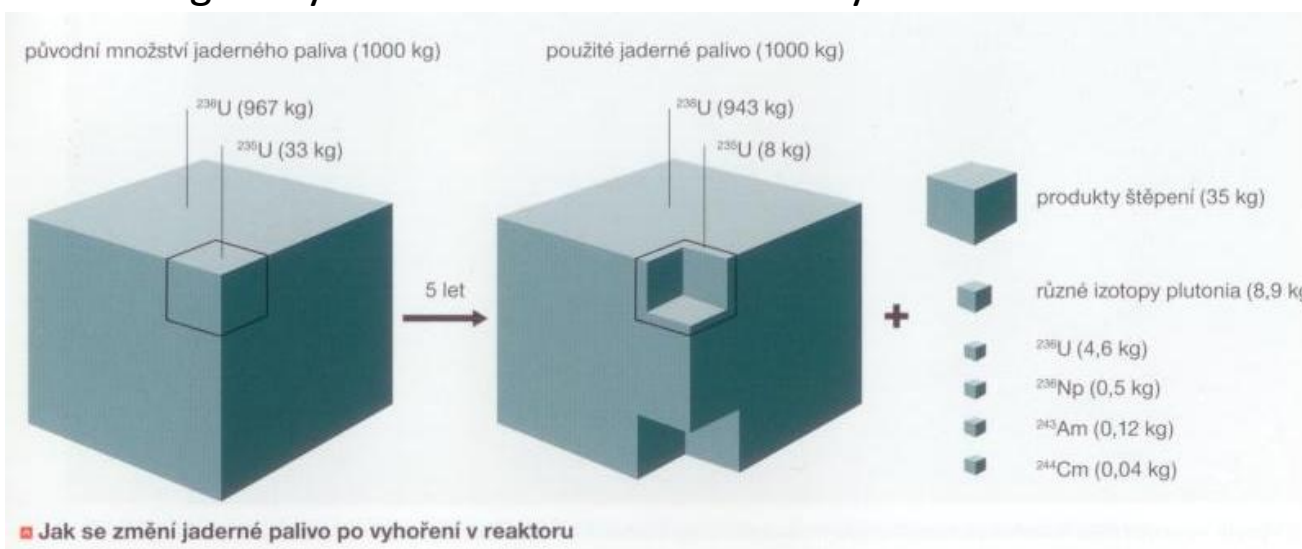
# Dlouhodobá kinetika aktivní zóny

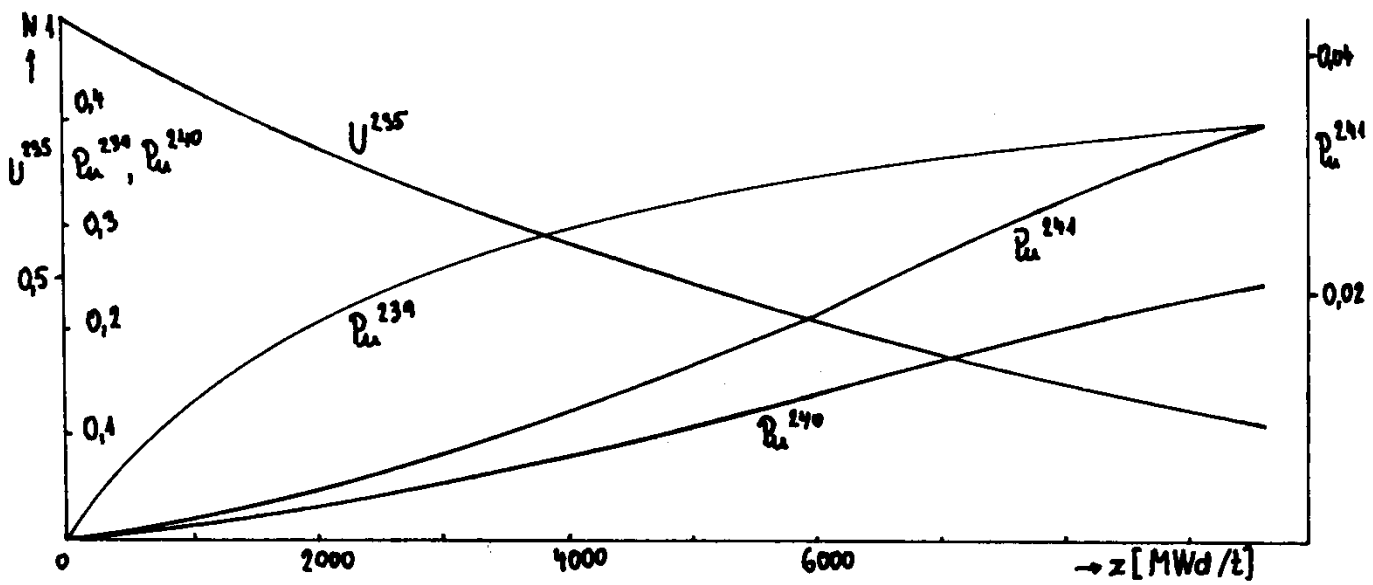
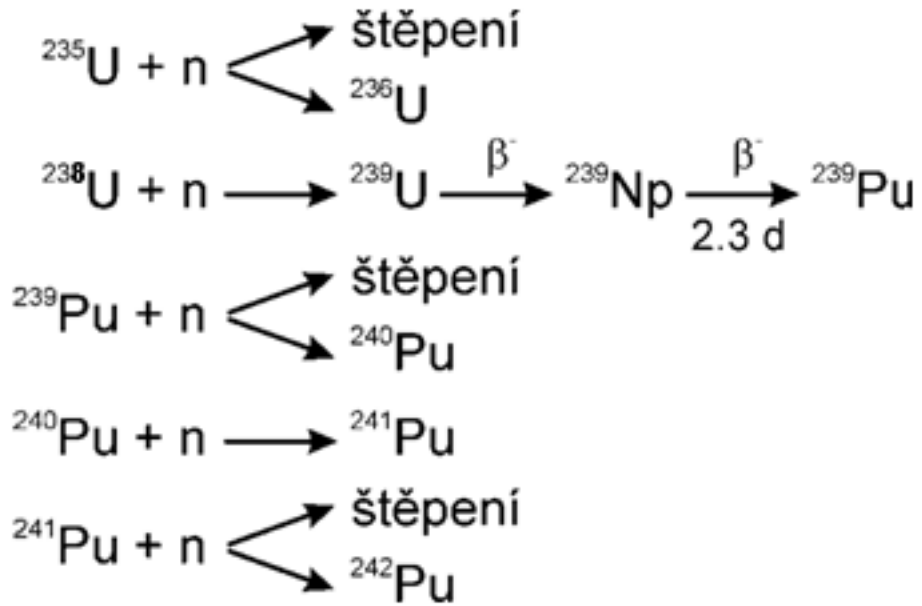
Doba práce reaktoru s jednou náplní se nazývá **kampaň reaktoru**. Z ekonomického hlediska je vhodné dobu kampaně maximalizovat.

Délka kampaně reaktoru je omezena jednak zásobou reaktivity reaktoru a jednak hromaděním produktů štěpení. Ty totiž zaujmají větší objem než původní štěpící se materiál a při větším nahromaděním produktů dochází ke vzniku trhlin, vzduť a deformací palivových článků.

Za celou dobu kampaně reaktoru nechť ubude DM paliva. Pak poměr **(DM/M).100 %**

, kde M je hmotnost paliva na začátku kampaně, se nazývá vyhoření paliva. Obecně lze v energetických reaktorech dosáhnout vyhoření 5-10%.





# Časové změny v tepelném reaktoru

Při stacionárním stavu se tedy hustota neutronů a jejich tok nemění. Nyní se budeme zabývat neustáleným stavem reaktoru, tj. případem, kdy se mění hustota neutronů. Příčinou změny hustoty neutronů v čase může být např. vyjmutí paliva, změna polohy regulačních tyčí, atd. Při tom se poruší rovnováha v jednotlivých generacích a neutrony ubývají nebo přibývají.

Doba, za niž se velikost toku neutronů změní  $e$ -krát ( $e=2,71828$ ), se nazývá periodou reaktoru a označuje se  $T$ . Platí pro ni vztah

$$T = t_e / (k - 1)$$

,  $t_e$  - průměrná doba života neutronu v konečném prostředí,  $k$  – multiplikační koeficient

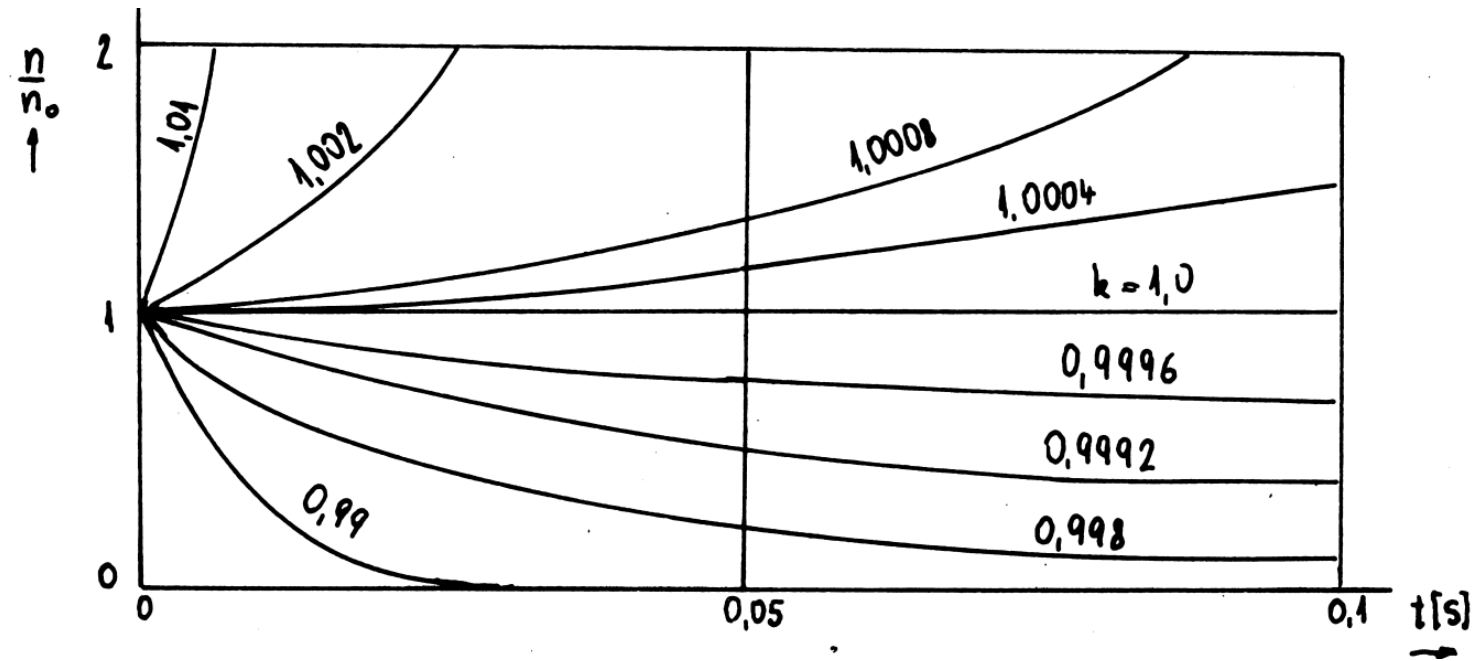
Pro tok tepelných neutronů v reaktoru při neustáleném stavu pak platí vztah

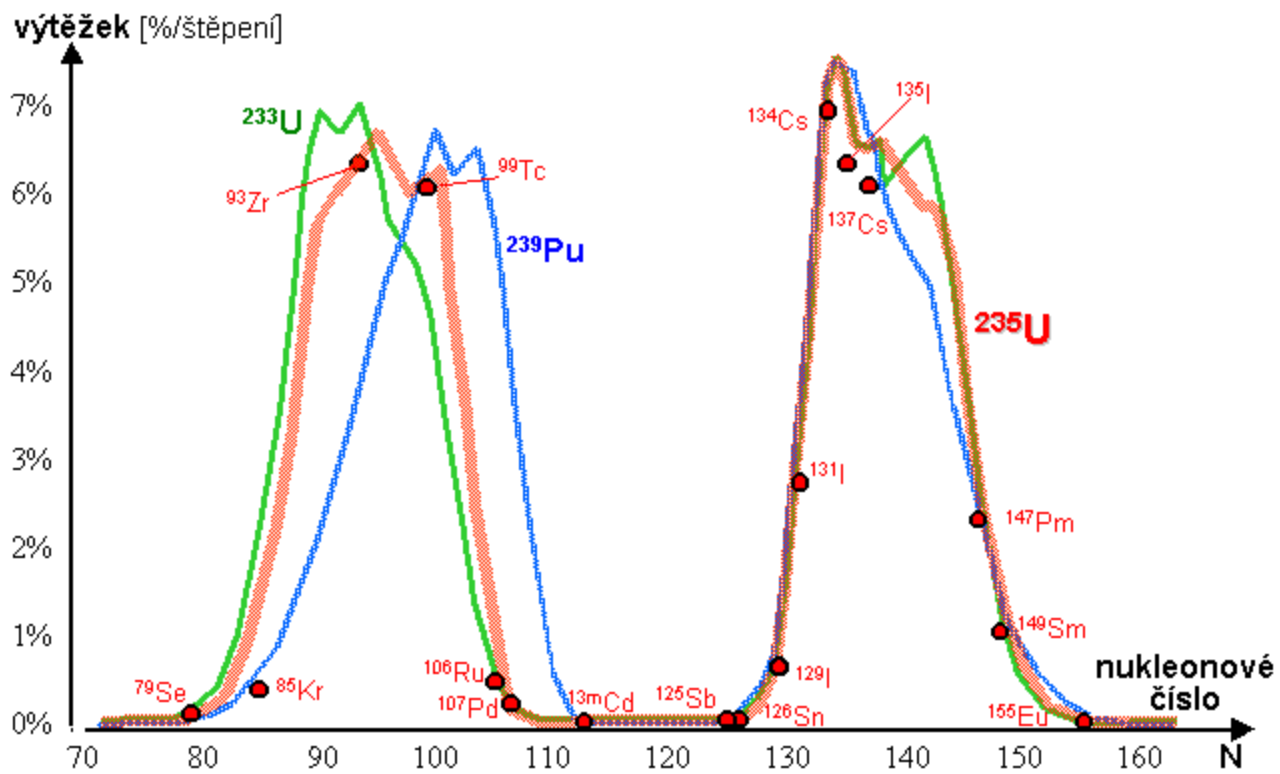
$$F = F_0 e^{(t/T)}$$

Ve velkém tepelném reaktoru je průměrná doba života tepelného neutronu řádově  $10^{-3}$  s. Při změně  $k$  o 0,01 je tedy  $T = 0,1$  s a za 1 s se tok změní jako  $e^{10}$  tedy 20000 krát. **Při těchto změnách by nebylo možno reaktor řídit!**



# Časové změny v tepelném reaktoru

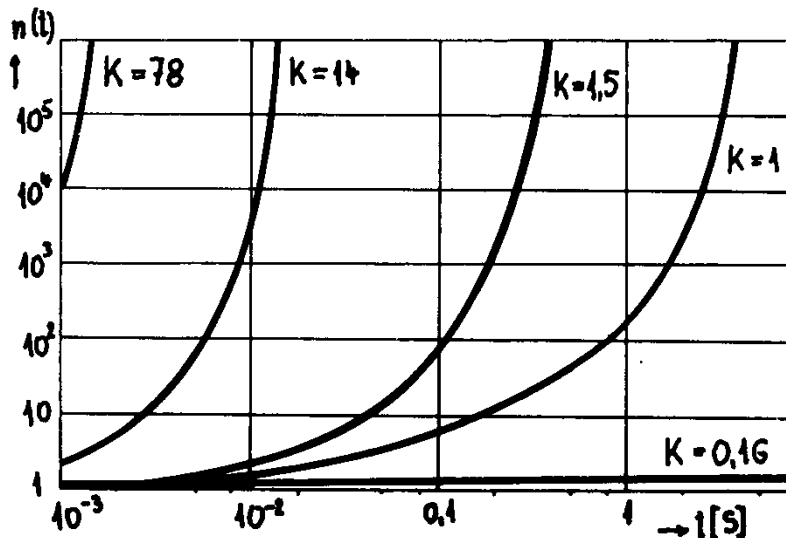




# Opožděné neutrony

Opožděné neutrony mají původ v radioaktivních rozpadech úlomků štěpení. Jádra (fragmenty) vznikající při štěpení mají nadbytek neutronů, kterých se zbavují přeměnou  $\beta$  nebo emisí opožděných neutronů. Z celkového počtu neutronů uvolněných při štěpení uranu je asi 1% opožděných.

- existuje více než 50 štěpných produktů, které se rozpadají  $\beta$  s následnou emisí n
- většinou se zavádí 6 pseudoskupin
- přestože jsou výtěžky  $\beta_i$  malé, hodnoty  $\tau_i$  podstatně prodlouží střední dobu života – a to až o 2 řády



| $^{235}\text{U}$ |           |
|------------------|-----------|
| $\tau_i$ (s)     | $\beta_i$ |
| 0.258            | 0.000168  |
| 0.715            | 0.000824  |
| 3.22             | 0.00263   |
| 8.65             | 0.00121   |
| 31.5             | 0.00137   |
| 78.7             | 0.000246  |
| $\Sigma \beta_i$ | 0.006448  |

| $^{239}\text{Pu}$ |           |
|-------------------|-----------|
| $\tau_i$ (s)      | $\beta_i$ |
| 0.312             | 0.000073  |
| 0.793             | 0.000216  |
| 3.02              | 0.000687  |
| 7.50              | 0.000452  |
| 32.2              | 0.000584  |
| 77.5              | 0.000080  |
| $\Sigma \beta_i$  | 0.002092  |

=> Možnost řídit výkon reaktoru!

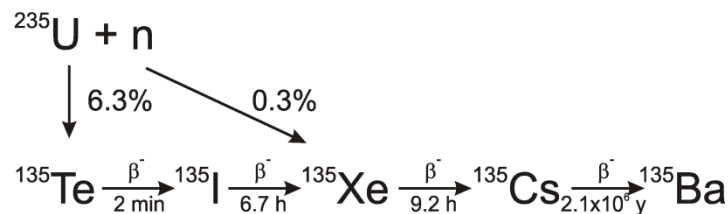
# Otrava reaktoru

Při provozu reaktoru se hromadí četné produkty rozpadu a některé z nich mohou silně absorbovat neutrony. Tvoří-li se takové otravující absorbátory ve značném množství, porušují neutronovou rovnováhu v reaktoru a snižují  $k_0$ , čímž dojde k tzv. **otravě reaktoru**. Pro otravu reaktoru mají velký význam nuklidy  $^{135}\text{Xe}$  ( $3,5 \cdot 10^6$  b), 0,3 % a  $^{149}\text{Sm}$  díky svým velkým účinným průřezům pro absorpci tepelných neutronů.

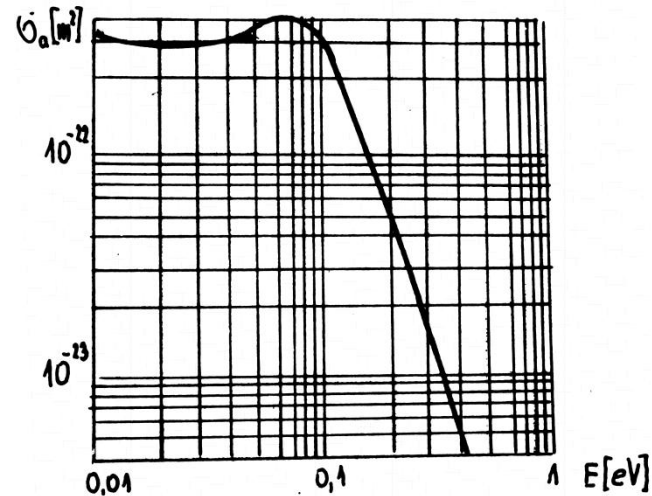
Můžeme produkty rozdělit na:

- absorpce stabilními, nebo dlouhodobými isotopy – zastruskování
- absorpce krátkodobými isotopy - otrava

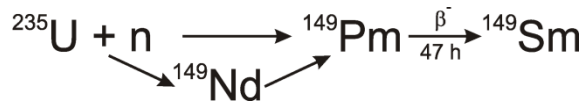
Poněvadž tvoření  $^{135}\text{Xe}$  (jodová jáma) závisí na neutronovém toku v reaktoru, kdežto jeho rozpad je určen poločasem, má otrava xenonem význam pouze u reaktorů s velkou hustotou neutronového toku. Je třeba poznamenat, že poločas  $^{135}\text{Xe}$  je větší než poločas  $^{135}\text{I}$ . To znamená, že je-li reaktor zastaven, bude zpočátku koncentrace  $^{135}\text{Xe}$  vzrůstat, což vyvolá další zmenšení reaktivity. Reaktor pak může být neschopen znovu začít pracovat po dobu několika desítek hodin, než se  $^{135}\text{Xe}$  rozpadne. Říkáme, že reaktor je v xenonové (nebo jódové) jámě.



# Otrava reaktoru, Zastruskování reaktoru



- Vedle silných absorbátorů s krátkou dobou života je nutno počítat i s dlouho žijícími isotopy, nejvýznamější struskou je  $^{149}\text{Sm}$



| struska           | výtěžek (%) | $\sigma$ (b)       |
|-------------------|-------------|--------------------|
| $^{113}\text{Cd}$ | 0.014       | 19 500             |
| $^{149}\text{Sm}$ | 1.3         | $6.82 \times 10^4$ |
| $^{151}\text{Sm}$ | 0.445       | 70 000             |
| $^{155}\text{Eu}$ | 0.03        | $1.4 \times 10^4$  |
| $^{157}\text{Gd}$ | 0.015       | $1.6 \times 10^5$  |

# Literatura

- <http://physics.muni.cz/~blazkova/dp/Reaktor1.htm>
- <http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/krticka/lectures/aplik.html>  
Doc. Mgr. Milan Krtička, Ph.D. , Ústav částicové a jaderné fyziky, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova
- [http://katedra-reaktoru.cz/?page\\_id=392](http://katedra-reaktoru.cz/?page_id=392), Fyzika jaderných reaktorů, J. Frýbort, L. Heraltová, Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze,
- Energie z Vysočiny, Energie z jižních Čech – Skupina ČEZ, propagační materiály, [www.cez.cz](http://www.cez.cz)