

Jaderné elektrárny

Vazební energie jádra

- Klidová hmotnost jádra všech prvků a izotopů je menší než je součet hmotností všech nukleonů -> hmotnostní defekt Δm_j

$$\Delta m_j = Nm_n + Zm_p - m_j$$

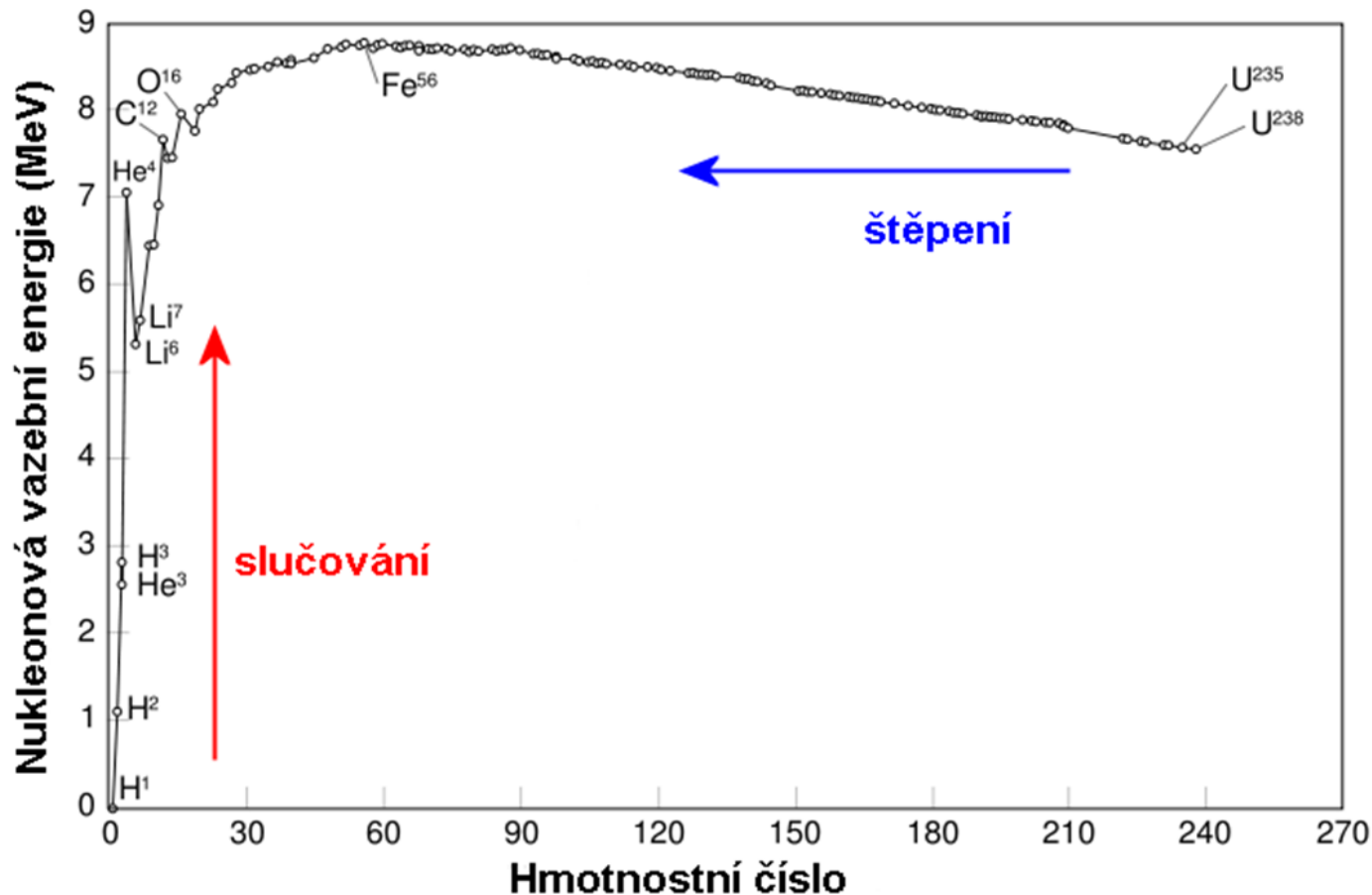
- Kde m_n je klidová hmotnost neutronů, m_p je klidová hmotnost protonů, N neutronové číslo, Z protonové číslo, m_j hmotnost jádra
- Vazební energii jádra pak můžeme vyjádřit jako:

$$W_j = \Delta m_j c^2$$

- Nukleonová vazební (separační) energie

podíl vazební energie a hmotnostního (nukleonového) čísla:

$$\epsilon_j = \frac{W_j}{A}$$



Radioaktivní rozpad

- Zákon radioaktivního rozpadu

$$\frac{dn}{dt} = -\lambda n$$

kde n je původní počet atomů a λ (s^{-1}) je rozpadová konstanta, počet přeměněných atomů v čase t je:

$$n = n_0 e^{-\lambda t}$$

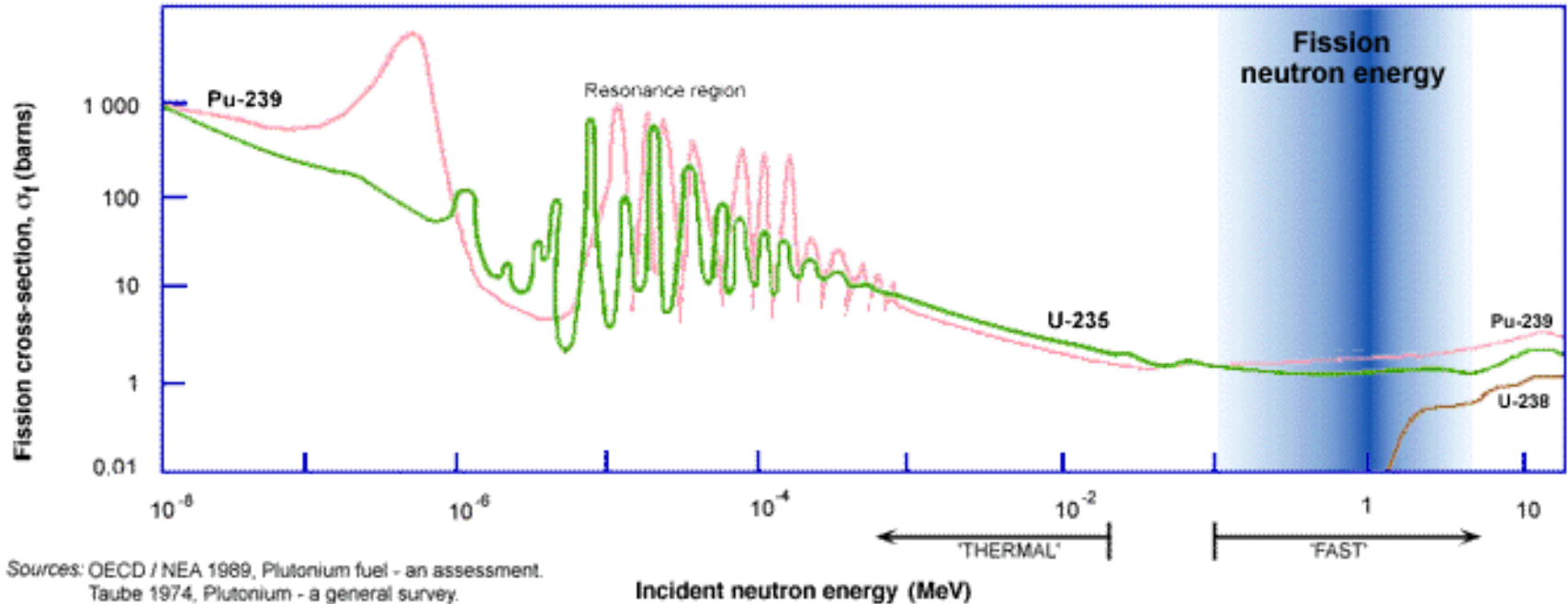
- Poločas rozpadu $T_{1/2}$ je doba za kterou se z počátečního počtu atomů přemění právě polovina ($T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$)
- Nově vzniklé nuklidy se mohou dále přeměňovat s jinou rozpadovou konstantou

Jaderné reakce

- Přeměna jádra atomu působením elementárních částic nebo jádra jiného atomu
- Neutronu stačí podstatně menší energie k uskutečnění jaderné reakce než jiným částicím
- **Tepelné neutrony** – energie $< 0,5$ eV
- **Rychlé neutrony** – energie $> 0,1$ MeV
- **Epitermální (rezonanční) neutrony** – energie mezi tepelnými a rychlými neutrony

Pravděpodobnost jaderné reakce

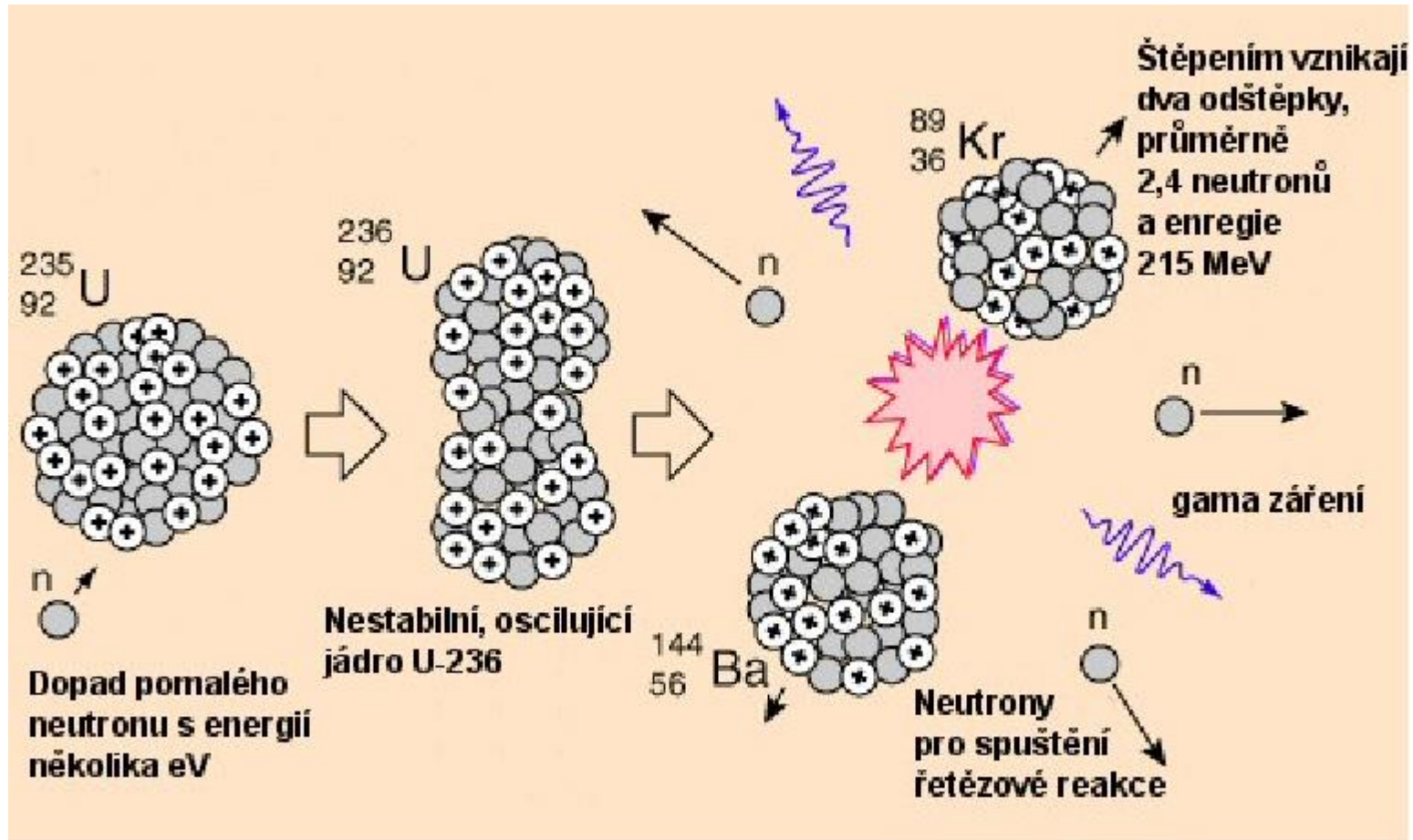
NEUTRON CROSS-SECTIONS FOR FISSION OF URANIUM AND PLUTONIUM



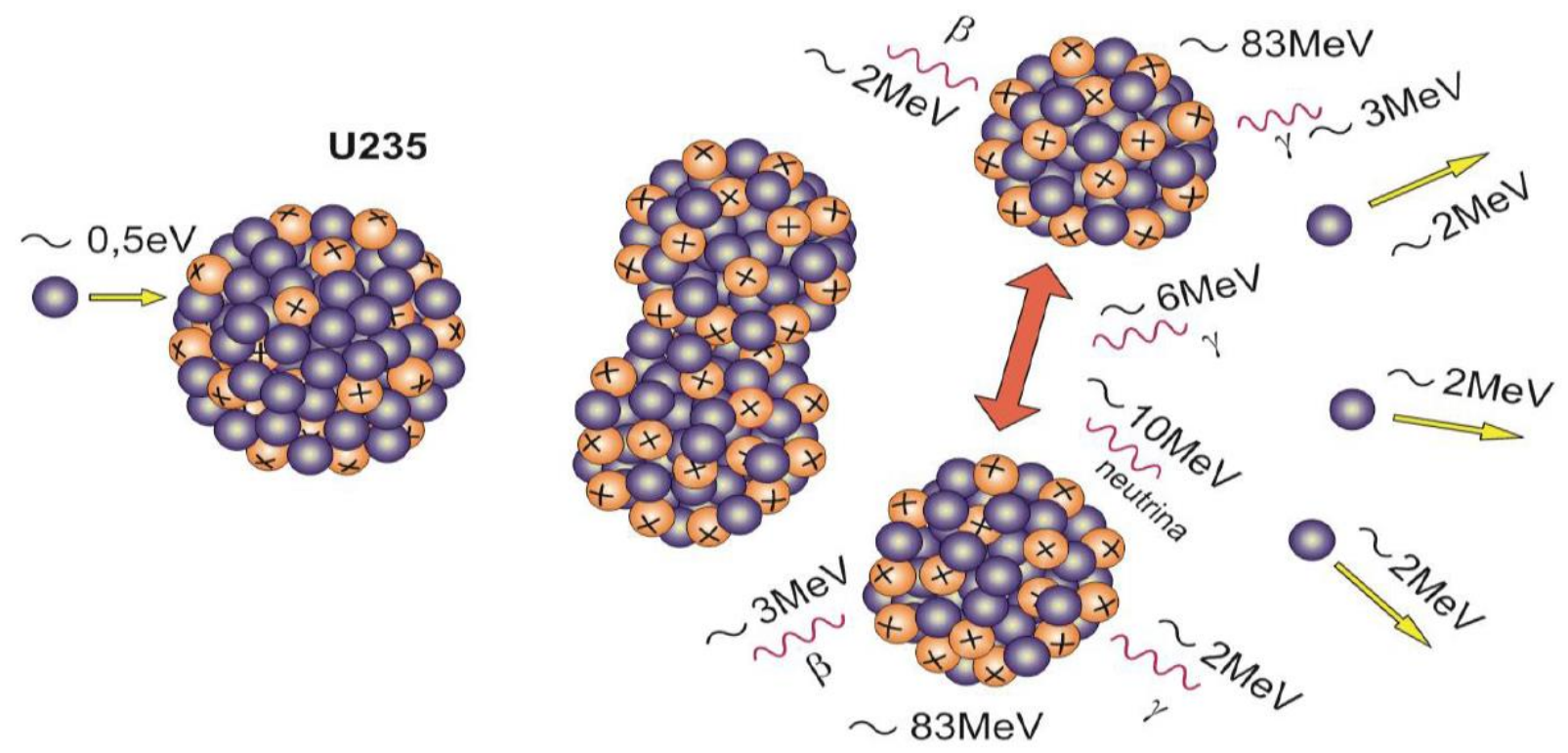
Sources: OECD / NEA 1989, Plutonium fuel - an assessment.
 Taube 1974, Plutonium - a general survey.
 1 barn = 10^{-28} m², 1 MeV = 1.6×10^{-13} J

Účinný průřez – pravděpodobnost, že dojde k interakci mezi jedním jádrem, nacházejícím se v terčové ploše 1 m^2 a jedním dopadajícím neutronem, který projde kolmo touto plochou. (jednotka: m^2 , nebo: $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$)

Jaderné štěpení



Jaderné štěpení



Řetězová reakce

- **Multiplikační činitel k** – poměr počtu volných neutronů jedné generace k počtu neutronů předchozí generace
 - $k > 1$ soustava je nadkritická
 - $k = 1$ soustava je kritická
 - $k < 1$ soustava je podkritická
- **Řízená jaderná reakce** – dosažení a udržení multiplikačního činitele $k=1$

Jaderný reaktor

- Hlavní části jaderného reaktoru
 - Jaderné palivo
 - Moderátor
 - Chladicí látka
 - Hermetický systém
 - Stínění a reflektor
 - Množivá zóna a systémy řízení, měření, ochran a diagnostiky

Jaderný reaktor

- **Homogenní** – palivo je rozptýleno v moderátoru ve formě roztoku, chemické sloučeniny, slitiny apod.
- **Heterogenní** – palivo je odděleno od moderátoru uložením v palivových elementech
- V energetice se využívají převážně heterogenní reaktory

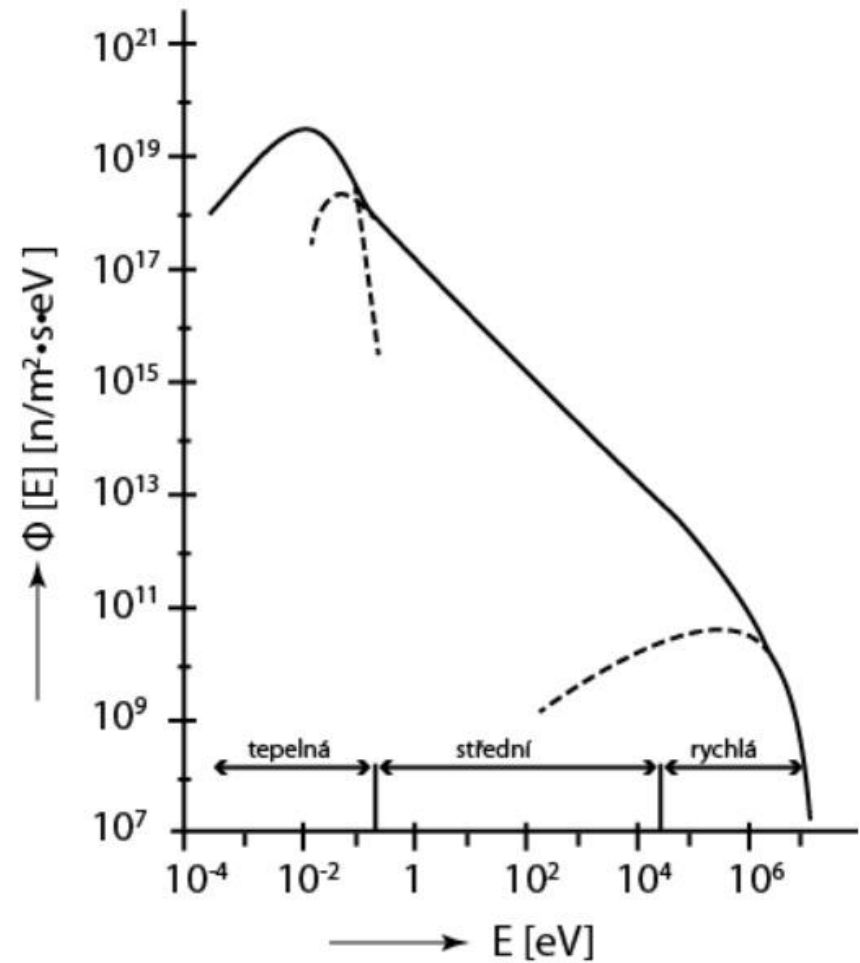
Jaderné reaktory

- **Tepelné reaktory** - štěpení jaderného paliva především tepelnými neutrony (do 1eV), musí obsahovat moderátor ke snížení energie (zpomalení) neutronů
- **Rychlé (množivé) reaktory** - štěpení jaderného paliva především rychlými neutrony (nad 0,1 MeV), zároveň vzniká nový štěpitelný materiál, reaktory tohoto typu nemají moderátor

Spektrum neutronů v tepelném reaktoru

Typické diferenciální spektrum neutronů v dobře moderovaném tepelném jaderném reaktoru:

Φ ... diferenciální tok neutronů
 ($\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{eV}^{-1}$), ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MeV}^{-1}$), ...

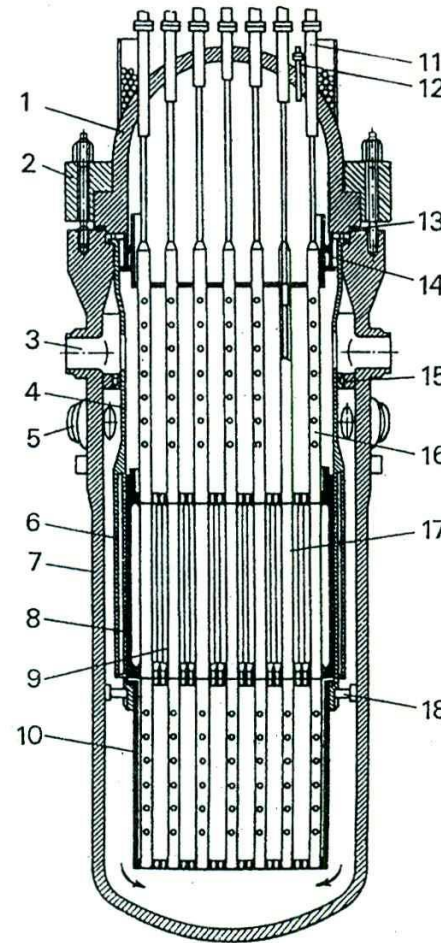
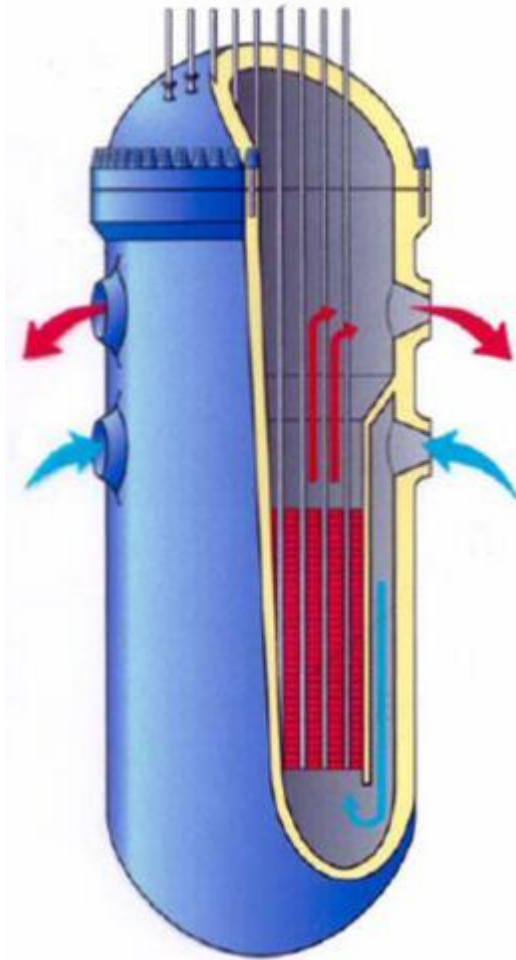


Rozdělení jaderných reaktorů

Energie neutronů	Moderátor	Chladivo	Označení
Tepelné	Voda (H ₂ O)	H ₂ O	Tlakovodní (PWR, VVER)
			Varný (BWR)
	Grafit	CO ₂	Plynem chlazený (GCR), zdokonalený (AGR)
		He	Vysokoteplotní (HTGR)
		H ₂ O	Vodou chlazený (LWGR)
	Těžká voda (D ₂ O)	D ₂ O	Těžkovodní (CANDU) (PHWR)
		H ₂ O	Těžkovodní chlazený lehkou vodou (HWLWR)
		CO ₂	Těžkovodní chlazený plynem (HWGCR)
Rychlé	-	Na	Rychlý, množivý (FBR)

Heterogenní jaderný reaktor

(*oddělené palivo a moderátor – lepší využití neutronů ve štěpné reakci*)

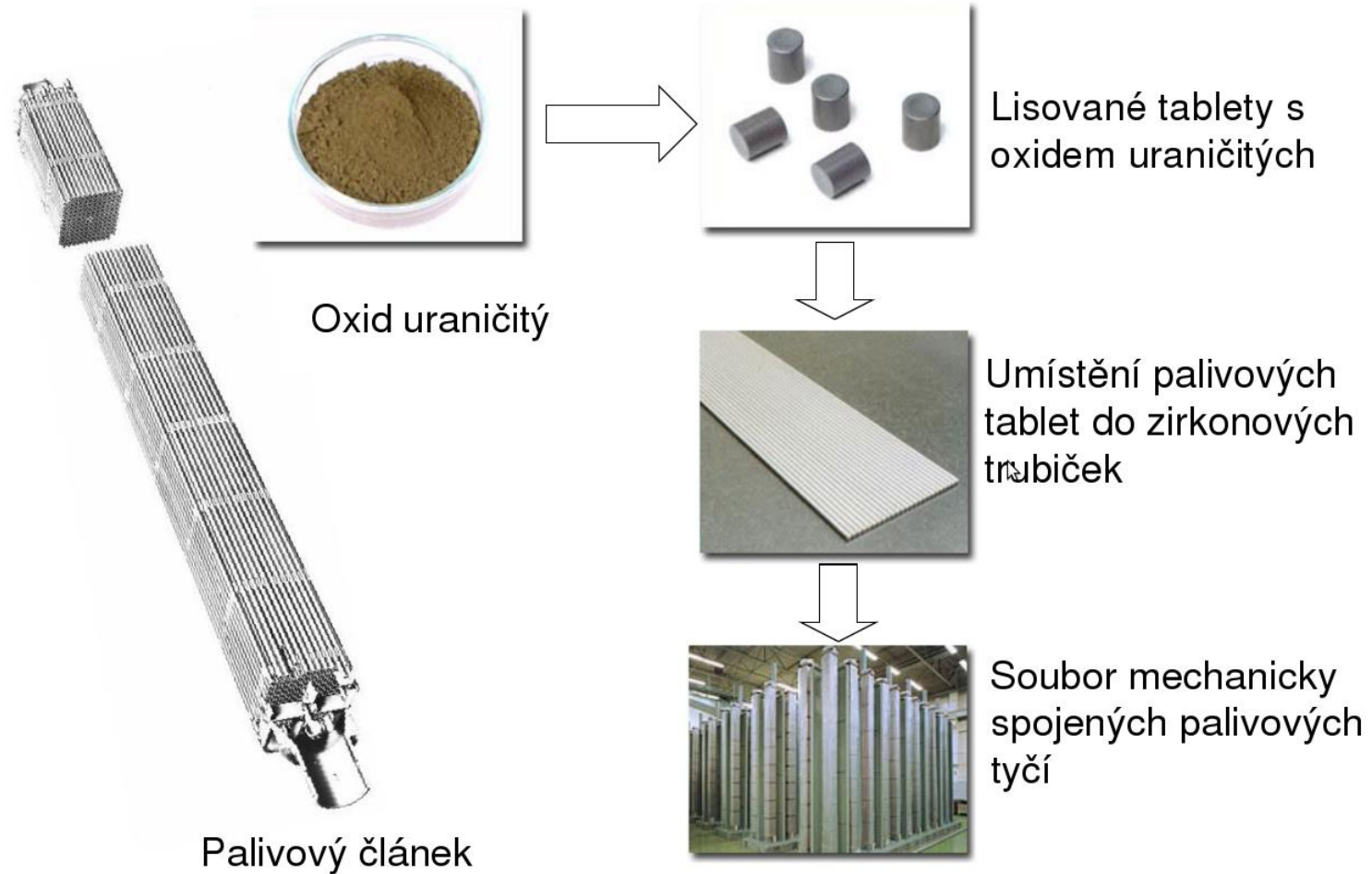


- 1) Víko tlakové nádoby
- 2) Příruba
- 3) Výstupní hrdlo
- 4) Šachta reaktoru
- 5) Vstupní hrdlo
- 6) Tepelný štít
- 7) Tlaková nádoba reaktoru
- 8) Koš aktivní zóny
- 9) Palivový článek (kazeta)
- 10) Dno nosného válce (dno šachty)
- 11) Vývodová trubka
- 12) Výstupní hrdlo pro instrumentaci
- 13) Těsnění víka
- 14) Těsnění na bloku ochranných trub
- 15) Hradící nákrůžek
- 16) Ochranná trubka
- 17) Regulační článek (kazeta)
- 18) Distanční konzola šachty reaktoru

Jaderné palivo

- Jaderným palivem v reaktoru jsou nejčastěji
 - Přírodní uran (U238 - 99,276%, U235 – 0,7%)
 - Přírodní uran obohacený uranem U235 až na průměrnou hodnotu 3%
 - Směsné palivo MOX – vyrobené z ochuzeného uranu nebo plutonia
- Vyrábí se ve formě kovu nebo v keramické formě jako oxid (UO_2)

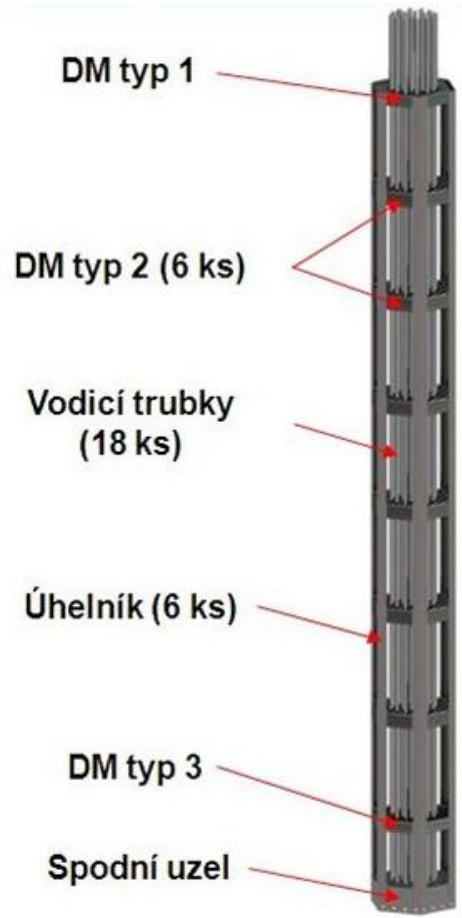
Jaderné palivo



Palivový proutek:



Č.	Legenda
1	Horní záslepka
2	Horní svar
3	Pružinová západka
4	Palivové tablety
5	Obálka/pokrytí
6	Spodní svar
7	Spodní záslepka

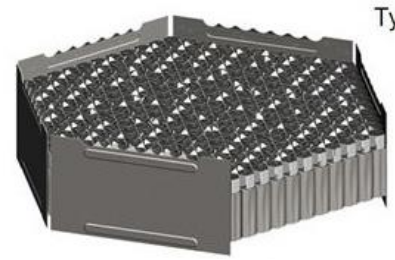
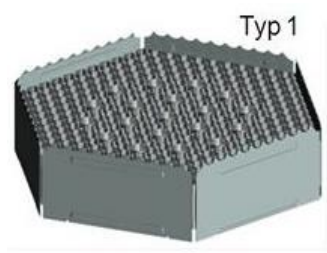


Palivový soubor TVSA-T pro Temelín:

Kostra palivového souboru



Distanční mřížky:



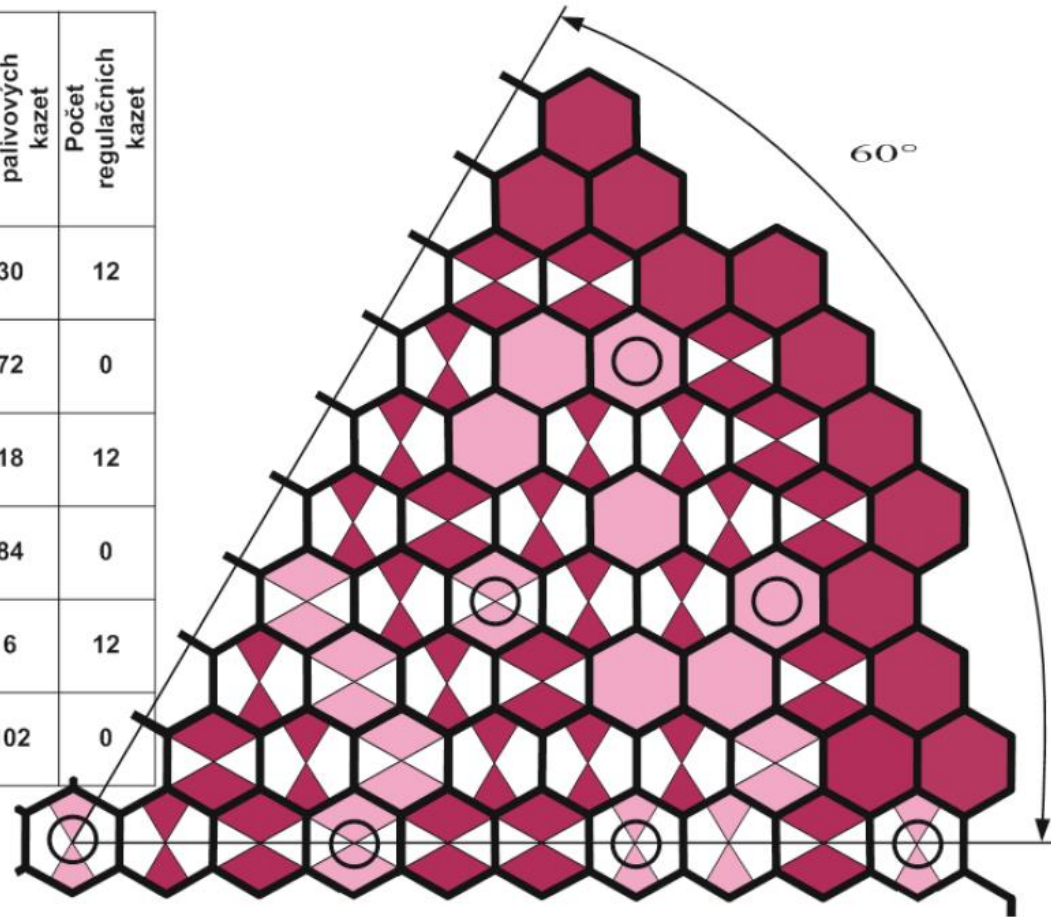
Typ 2 Buňky jsou shodné jako u distanční mřížky Typu 1 a 3. Lamely jsou spojené s deflektory pomocí laserových svarů a jsou bodově přivařené k věnci.

Výměna paliva

- Kampaň reaktoru - doba, po kterou je reaktor v provozu bez výměny nebo přeskupení paliva
- Během kampaně dochází k vyhořívání paliva a za určitou dobu již nelze udržet reaktor v kritickém stavu
- K udržení řetězové reakce (kritického množství) se musí palivo buď průběžně měnit, nebo na začátku kampaně vložit do aktivní zóny více paliva (nadkritické množství) a nepříznivý přebytek reaktivity eliminovat přidavnými absorbéry
- Pokud palivo vyhoří na určitou úroveň, je třeba palivo v aktivní zóně vyměnit a přeskupit

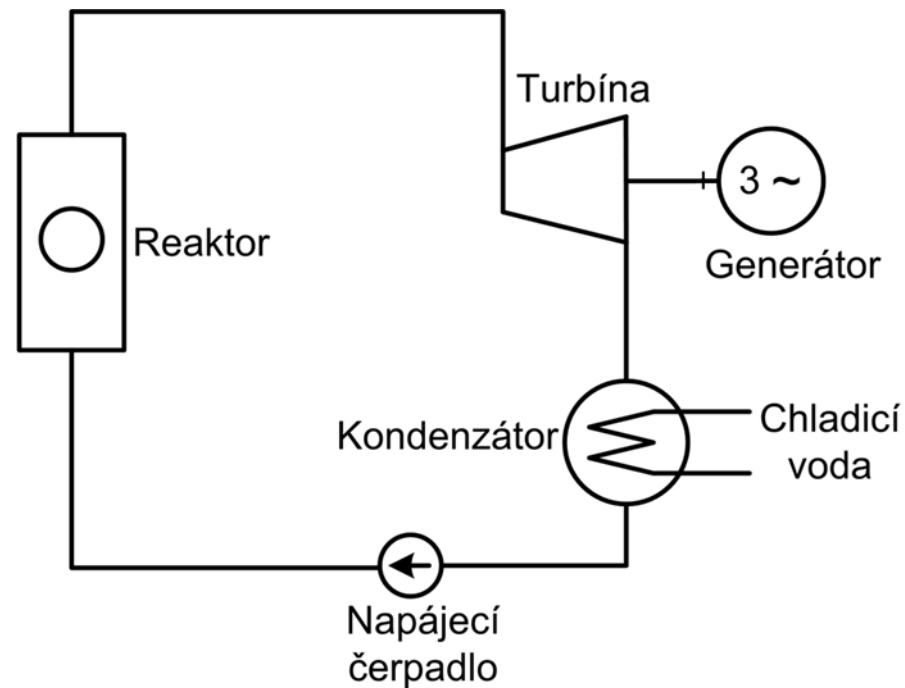
Kartogram části aktivní zóny reaktoru (1/6 zóny VVER 440)

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



Základní schémata jaderných elektráren

- Jednookruhové schéma

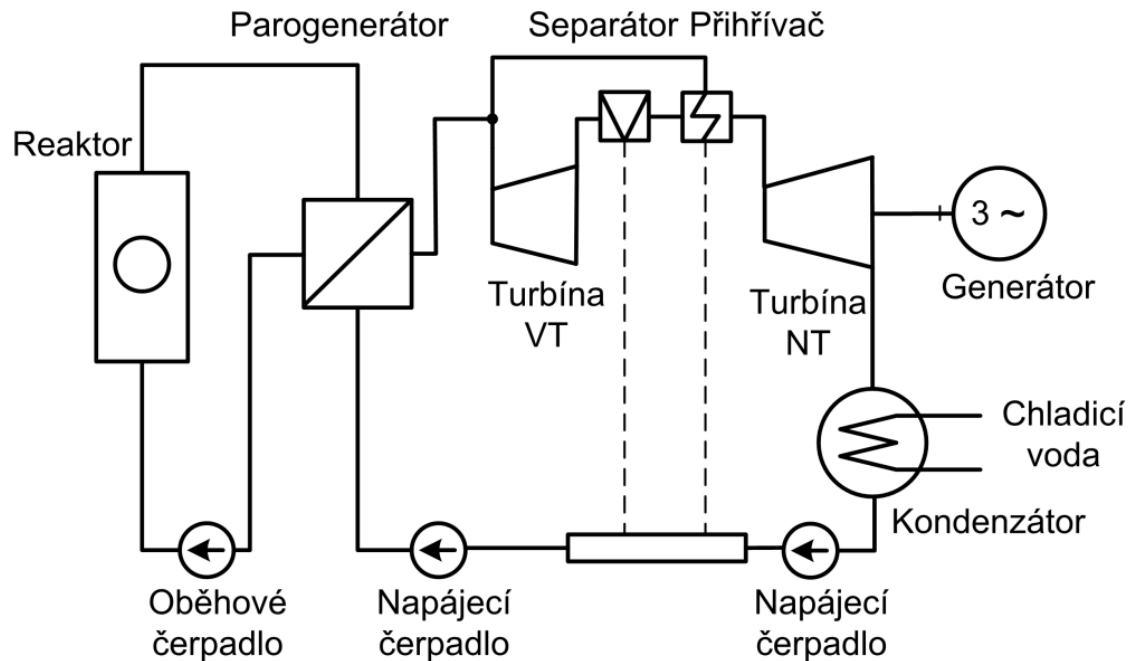


Základní schémata jaderných elektráren

- Chladivo reaktoru je zároveň pracovní látkou v turbíně.
- Jednookruhové schéma se používá zejména u varných reaktorů
- Výhodou je jednodušší tepelný cyklus a jeho vyšší účinnost (nejsou ztráty vznikající v tepelných výměnících)
- Nevýhodou je průchod chladiva obsahujícího radioaktivní látky všemi hlavními částmi jaderné elektrárny -> zvláštní bezpečnostní opatření i zvýšení nároků na spolehlivost a životnost

Základní schémata jaderných elektráren

- Dvouokruhové schéma

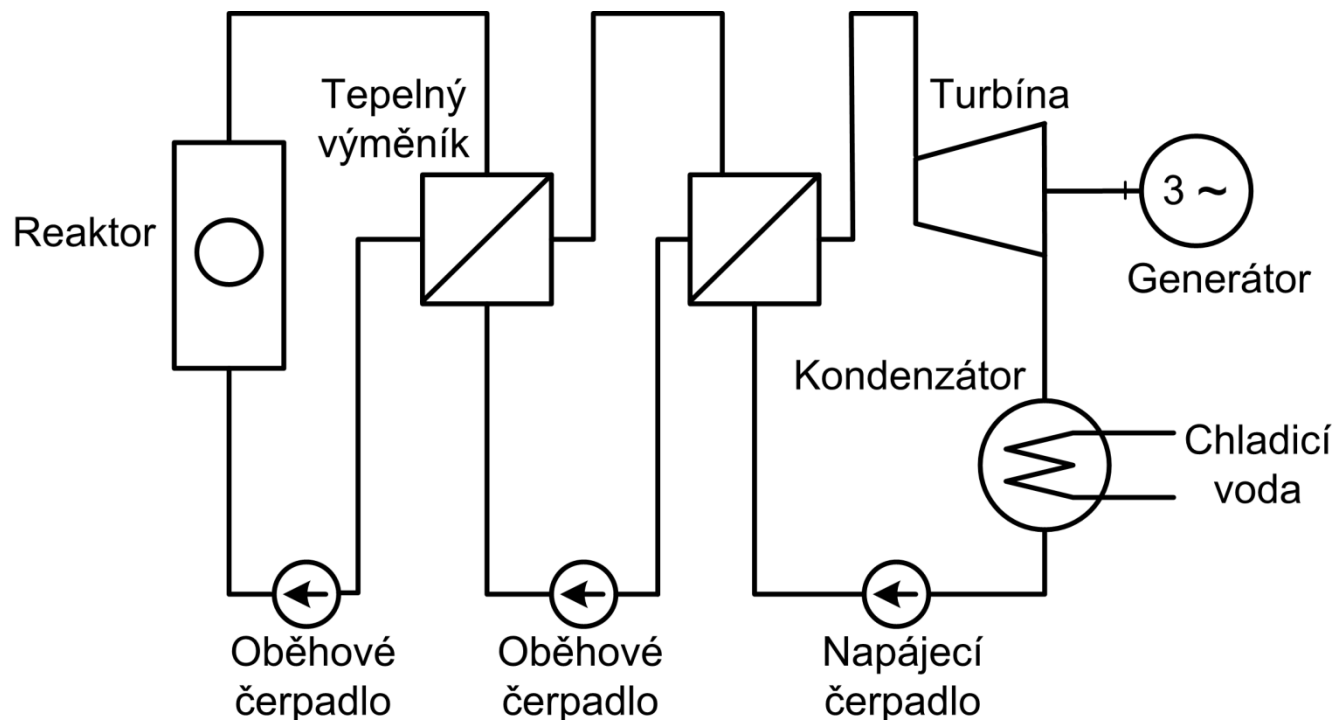


Základní schémata jaderných elektráren

- Oddělení primárního okruhu umožňuje použití různých druhů chladiwa reaktoru -> nepřítomnost radioaktivních látek mimo reaktorovou část
- Páru z parogenerátoru lze využít stejně jako v konvenční tepelné elektrárně
- Strojovna má podstatně jednodušší bezpečnostní systémy než u jednookruhových elektráren

Základní schémata jaderných elektráren

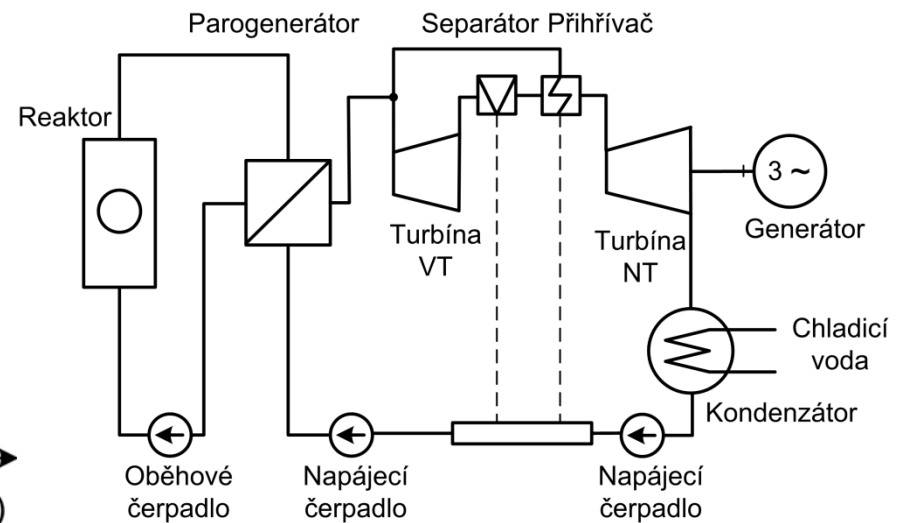
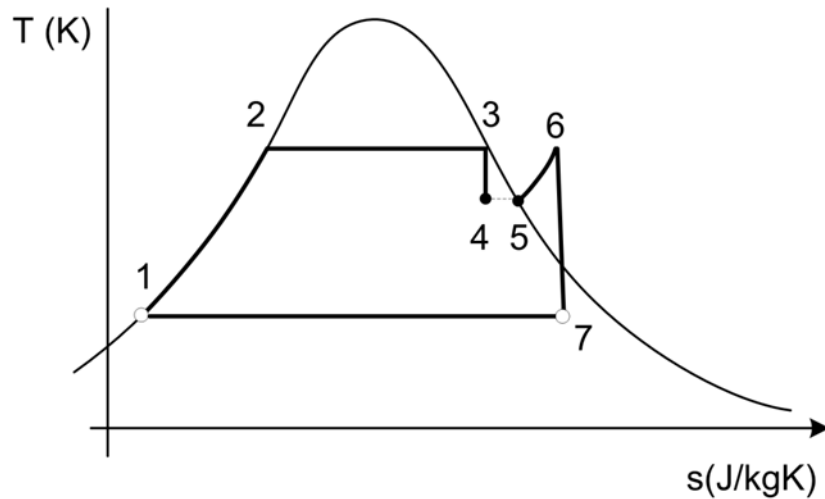
- Tříokuhové schéma s chladičem ve formě tekutého kovu



Základní schémata jaderných elektráren

- Zvýšená bezpečnost u jaderných elektráren s rychlými reaktory (reaktory chlazené tekutým kovem)
- Vložený okruh mezi primární a sekundární okruhu je nutný ze dvou důvodů:
 - bezpečnější izolace radioaktivních izotopů obsažených v kovovém chladiči (vyšší tlak ve vloženém okruhu než v primárním)
 - při průniku páry ze sekundárního do primárního okruhu netěsnostmi ve výměníku by mohla vysoká afinita sodíku způsobit havárii -> přenesení rozhraní sodík/voda do sekundární oblasti

Tepelný oběh dvouokruhové jaderné elektrárny



Primární okruh tlakovodního reaktoru

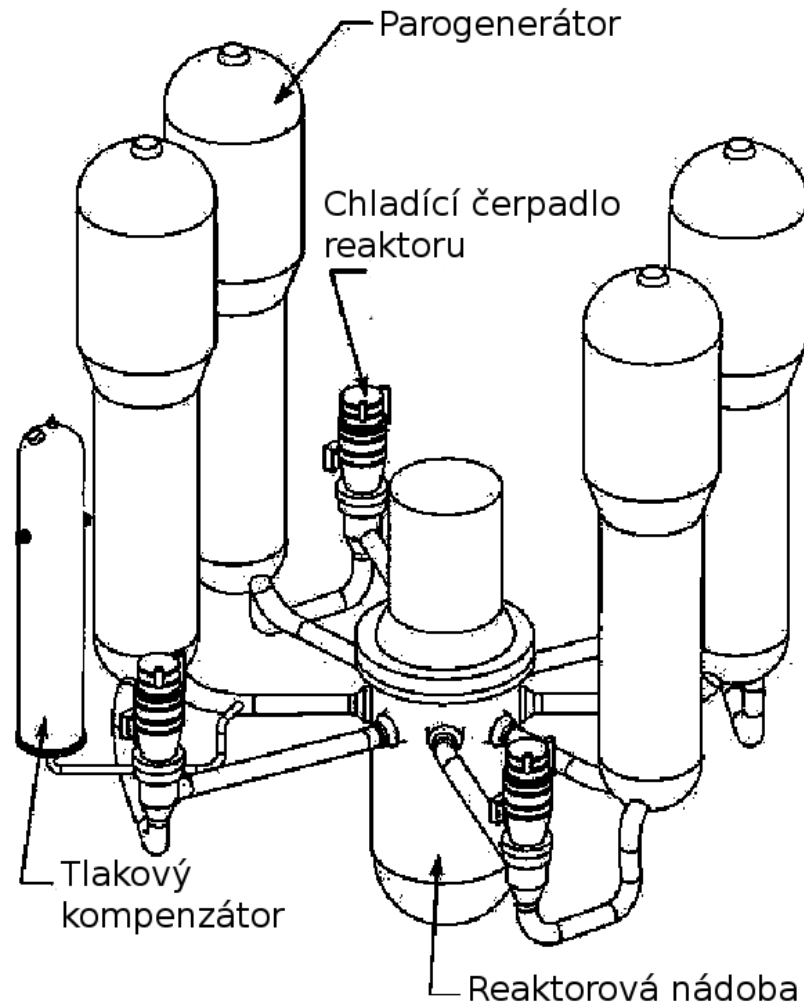
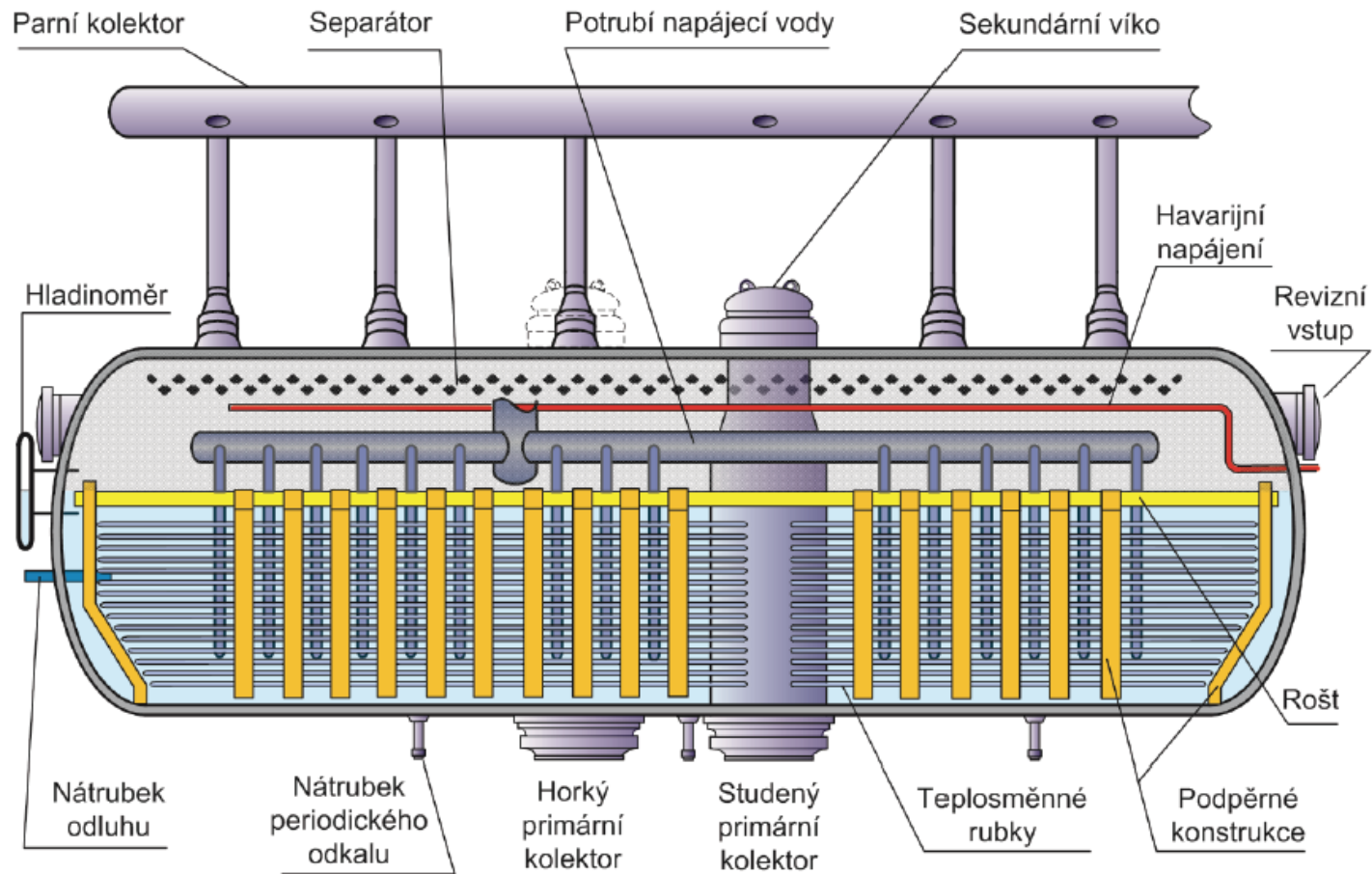
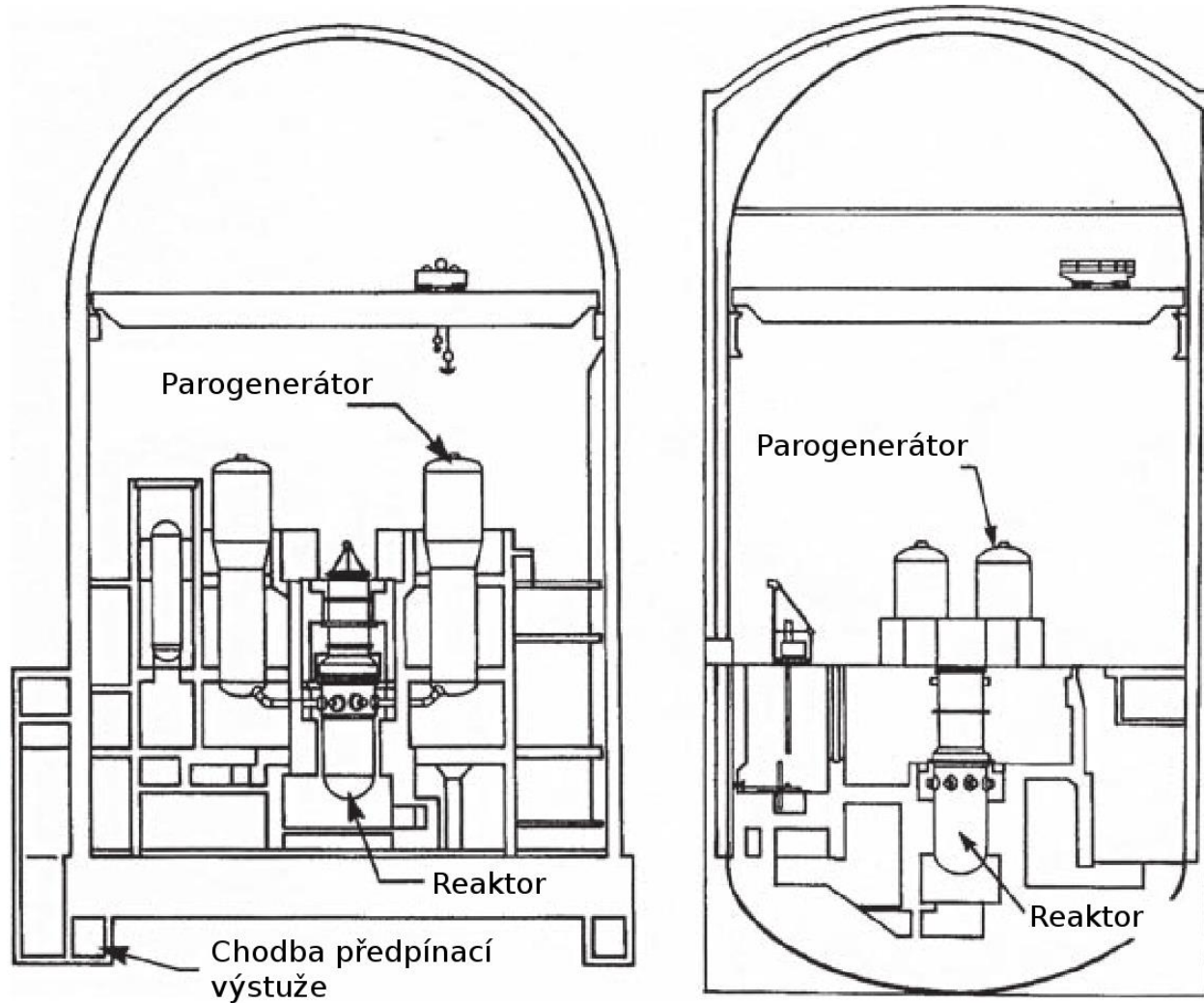


Schéma parogenerátoru



Kontejnment jaderné elektrárny



Zpracování vyhořelého jaderného paliva

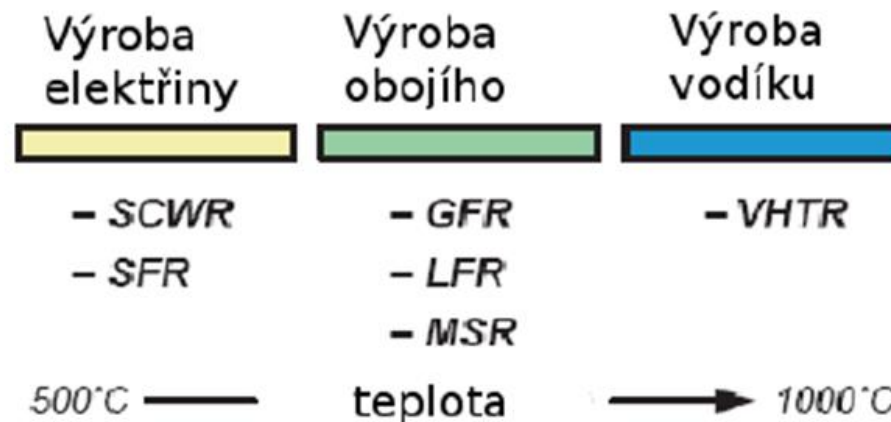
- Mokrý způsob
 - skladování v bazénu vedle reaktoru nebo mimo něj
 - voda odvádí teplo a ochrana před zářením
 - stálé chlazení a čištění vody
 - vyšší náklady
- Suchý způsob
 - skladování ve stíněných kontejnerech
 - ukládání z bazénu vyhořelého paliva
 - nižší náklady

Nové koncepce jaderných reaktorů

- **Generace I** – rané prototypy reaktorů
- **Generace II** – dnešní velké jaderné reaktory
- **Generace III** – pokročilé reaktory s lehkou vodou a novými bezpečnostními prvky
- **Generace IV** – reaktory příští generace (navrženy a postaveny v příštích dvaceti letech)
- Mezinárodním fórem bylo vybráno šest perspektivních návrhů reaktorů IV generace:
 - Přísná kritéria v oblasti bezpečnosti, spolehlivosti, ekologie a ekonomiky
 - Jednoduchost a vysoká účinnost
 - Uzavřený palivový cyklus
 - Výroba elektřiny, vodíku, tepla a odsolování vody

Jaderné reaktory IV generace

- **GFR** – rychlé reaktory chlazené plynem
- **LFR** – rychlé reaktory chlazené tekutým olovem
- **MSR** – reaktory chlazené tavenými solemi
- **SFR** – reaktory chlazené tekutým sodíkem
- **SCWR** - reaktory chlazené vodou se superkritickými parametry
- **VHTR** – velmi vysokoteplotní plynem chlazené reaktory



GFR – Gas Cooled Fast Reactor

