



Jaderné reaktory a jak to vlastně vše funguje

Lenka Heraltová

Katedra jaderných reaktorů

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

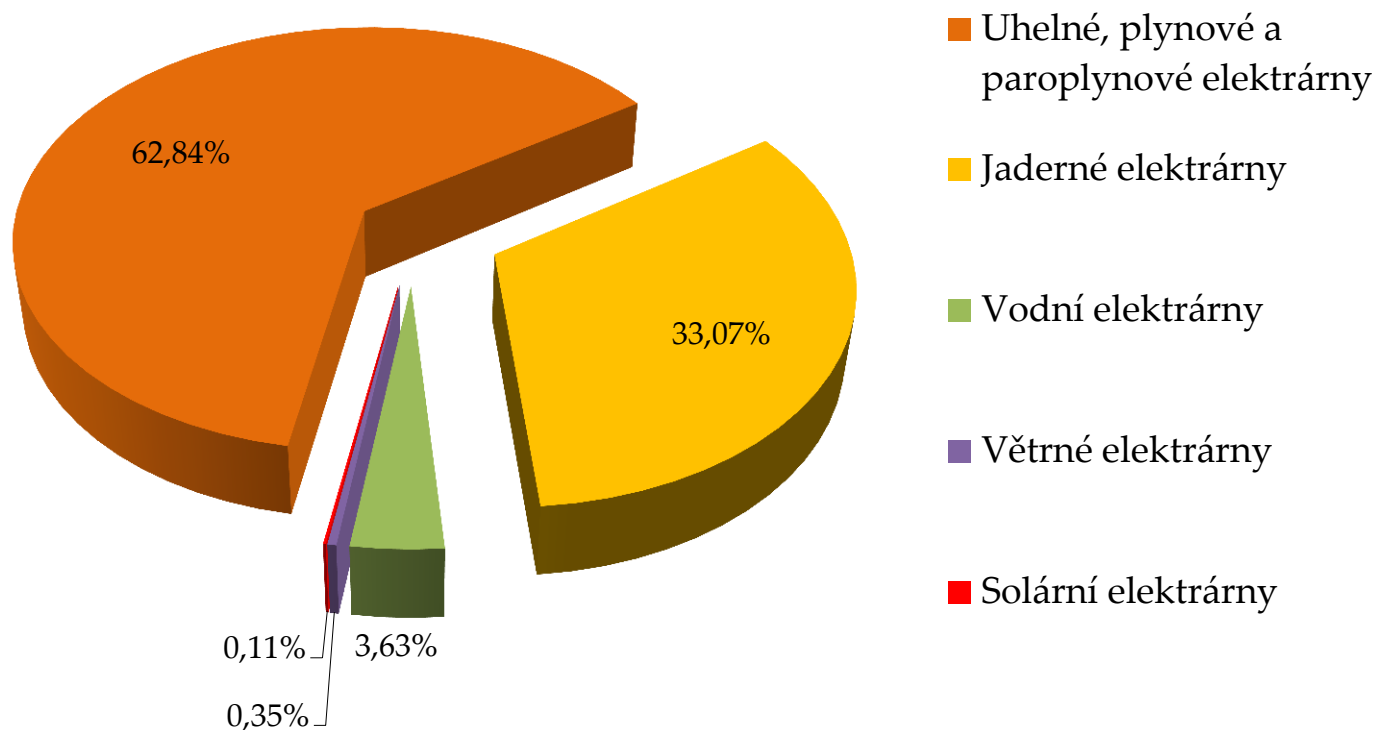
ČVUT v Praze

Výroba energie v České republice

- Typy zdrojů elektrické energie provozovaných v ČR:
 - Jaderné elektrárny
 - Uhlé, plynové a paroplynové elektrárny
 - Vodní elektrárny – akumulční, průtočné, přečerpávací
 - Sluneční elektrárny
 - Větrné elektrárny
- V roce 2009 bylo v České republice vyrobeno 82,25 TWh elektrické energie, z toho 33 % pocházelo z jaderných elektráren.



Struktura zdrojů elektrické energie



Uvedená struktura zdrojů elektrické energie odpovídá situaci na konci roku 2009, údaje jsou převzaty z Energetického regulačního úřadu.



Jaderná elektrárna Dukovany

- Čtyři tlakovodní reaktory typu VVER-440 (typ V-213).
- Výkon reaktorů 1., 3. a 4. bloku je 500 MWe. Blok 2 je provozován na výkonu 456 MWe.
- Palivo dodává ruská společnost TVEL.



Jaderná elektrárna Temelín

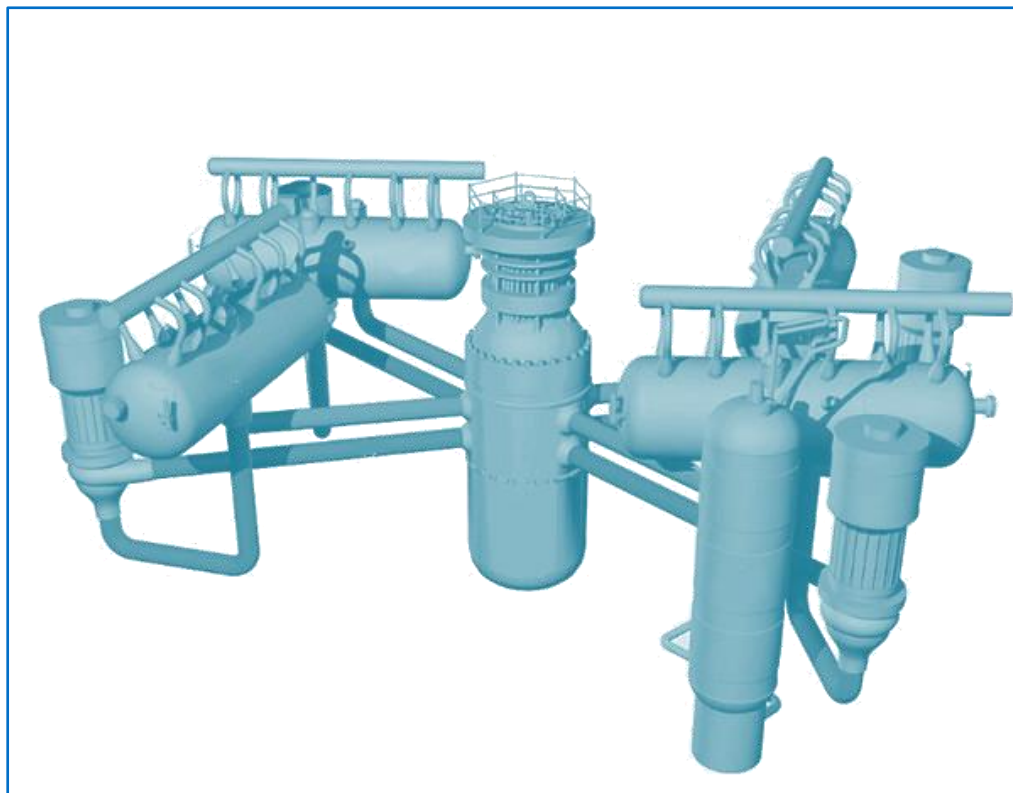
- Dva tlakovodní reaktory VVER-1000 (typ V-320).
- Výkon jednoho bloku je 1000 MWe.
- Palivo dodává ruská společnost TVEL (dřívějším dodavatelem byla americká společnost Westinghouse).



Jaderné štěpení

- Štěpení – rozbitím těžkého jádra se uvolní energie
- První jaderný reaktor – Chicago, 2. prosince 1942
- V současnosti je v provozu 441 energetických a 235 výzkumných reaktorů
- Využití jaderných reaktorů – pohony lodí, ponorek, letadel, medicínské aplikace – výroba radionuklidů, výzkum, výroba elektrické energie
- Fúze – energie se uvolní sloučením dvou lehkých jader





Jak funguje jaderný reaktor?



Základní terminologie

- Reaktor – zařízení pro udržení kontrolované štěpné řetězové reakce
- Aktivní zóna – oblast reaktoru, kde probíhá štěpení
- Jaderné palivo – směs obsahující štěpné izotopy, nejčastěji používané – ^{235}U , ^{239}Pu
- Moderátor – srážkami neutronu s jádry moderátoru se snižuje kinetická energie neutronu → zpomalování neutronu. Vhodné jsou lehké materiály.



- Chladivo – odvádí energii uvolněnou při štěpení z aktivní zóny
- Regulační orgán – slouží k řízení štěpné řetězové reakce, k regulaci výkonu, slouží pro bezpečnostní odstavení reaktoru. Vyrábí se z materiálů, které s vysokou pravděpodobností absorbují neutrony v energetické oblasti, ve které je reaktor provozován



Štěpení a štěpné produkty

- V reaktoru je palivo obsahující štěpný materiál – ^{235}U . Tento izotop je možné rozštěpit neutrony s velmi malou energií – tepelnými neutrony.
- Rozštěpením jádra uranu vznikají 2 štěpné produkty. Tyto nové prvky mají velkou energii, kterou předávají svému okolí – chladivu ve formě tepla, které je prouděním chladiwa odváděno pryč z aktivní zóny.
- Kromě štěpných produktů se uvolní také 2 nebo 3 nové neutrony s velkou energií – rychlé neutrony.

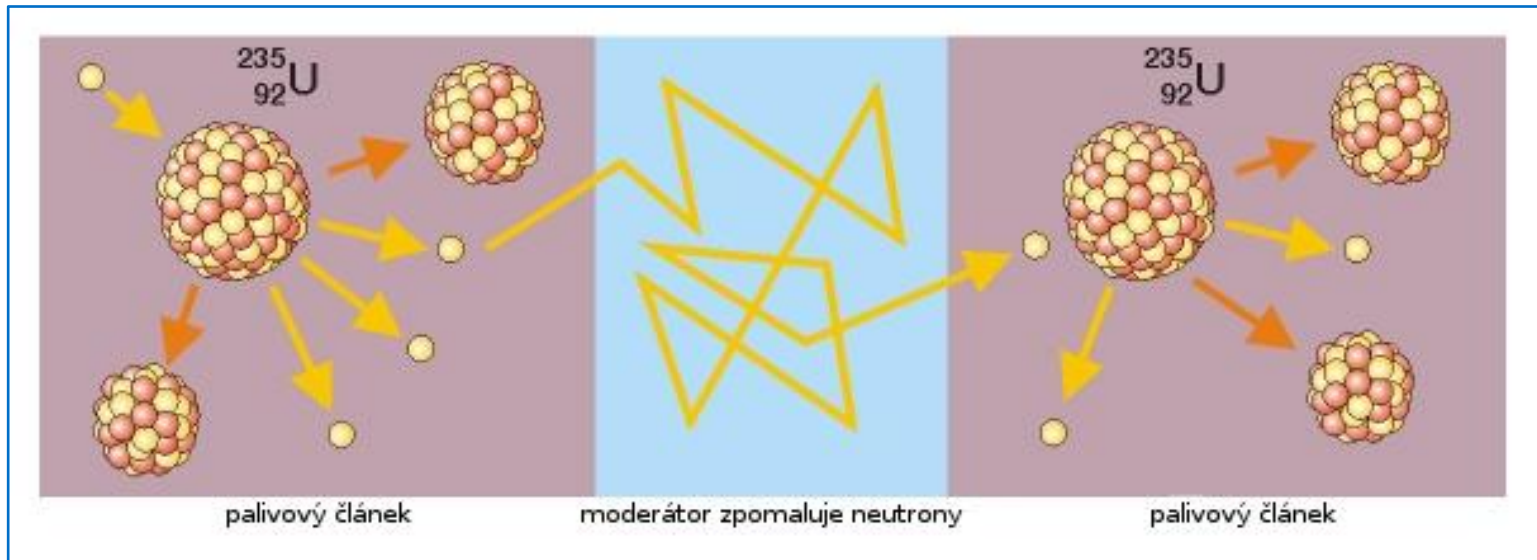


Moderace neutronů

- Aby se nové rychlé neutrony změnily na tepelné, které mohou štěpit další jádra uranu, musí být v reaktoru moderátor. Srážkami rychlých neutronů s jádrem moderátoru tyto neutrony postupně ztrácejí energii až dosáhnou tepelné úrovně.
- Po dalším štěpení se celý cyklus opakuje. Tento proces se nazývá štěpná řetězová reakce.
- Jaké materiály jsou vhodné jako moderátor? Jsou to lehké prvky, které málo pohlcují tepelné neutrony.
 - Např. lehká voda, těžká voda, grafit, polyetylén, parafín



Štěpná řetězová reakce



(zdroj Fyzika kolem nás, Scientia 1998)



Regulace reaktoru

- Z každého štěpení vznikají 2 nebo 3 nové neutrony. Některé z nich se zachytí v konstrukčních materiálech nebo mohou uniknout z reaktoru, ale i tak z každého štěpení zůstává víc než 1 neutron, který může dále štěpit uran → počet neutronů v reaktoru se zvyšuje
- Co s tím? Potřebujeme nějaký prostředek, kterým můžeme cíleně ovlivňovat počet neutronů v reaktoru. K tomu slouží regulační orgány, které jsou vyrobeny z materiálu, který velmi dobře zachytává tepelné neutrony
 - Např. kadmium, bór, hafnium



Kritický stav

- V aktivní zóně jaderného reaktoru probíhá štěpná řetězová reakce. Nastavením vhodné pozice regulačních orgánů operátor reaktoru upravuje počet neutronů v aktivní zóně.
- Stav, kdy je počet neutronů v reaktoru konstantní, nazýváme kritický stav jaderného reaktoru.
To znamená, že právě jeden neutron, který vznikne ze štěpení vyvolá další štěpení jádra uranu.
- I přes tuto zvláštní terminologii je kritický stav žadáným optimálním stavem reaktoru.



Další stavy reaktoru

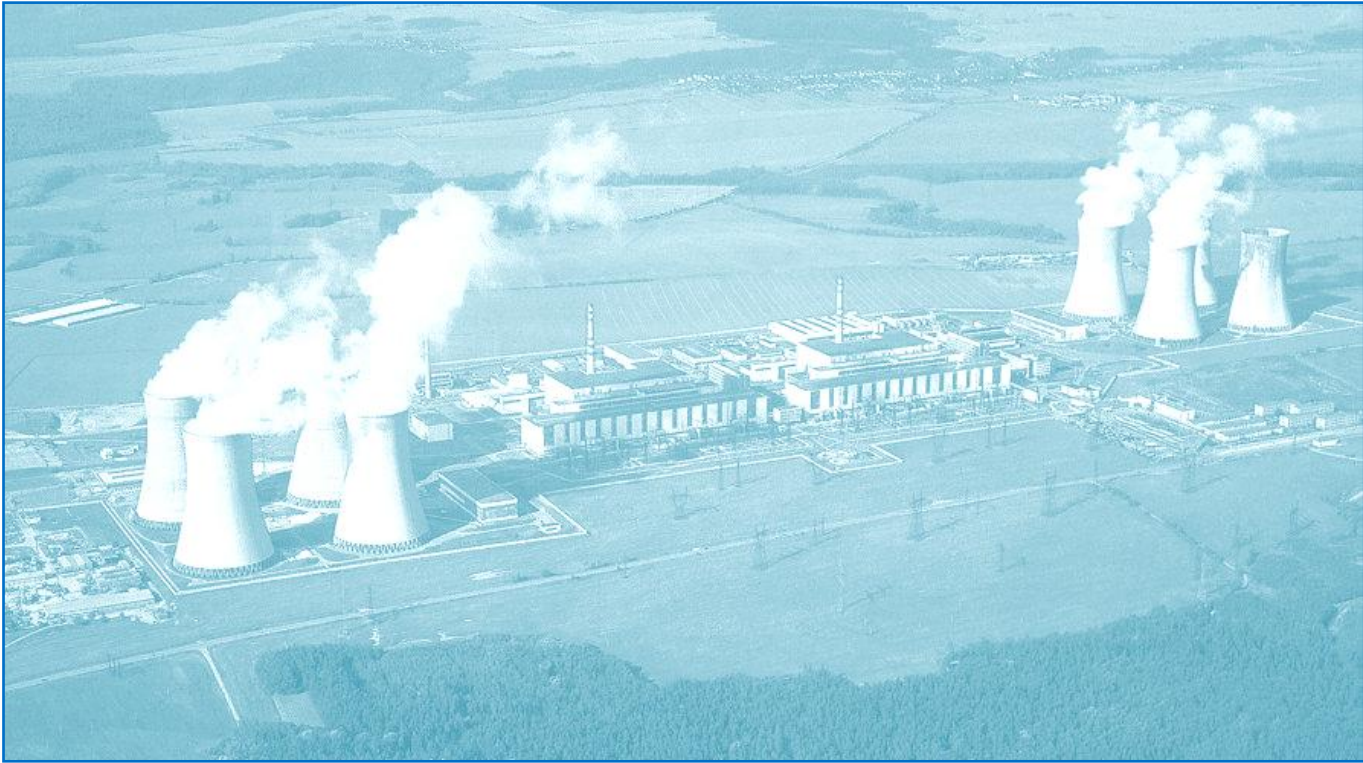
- Podkritický reaktor – v reaktoru není dostatek neutronů, které by způsobily další štěpení a štěpná řetězová reakce se postupně zastavuje.
- Nadkritický reaktor – více než 1 neutron ze štěpení vstupuje do procesu štěpení a počet neutronů v aktivní zóně se zvyšuje a výkon roste.



Odvod tepla z aktivní zóny

- Vznikající štěpné produkty mají velkou kinetickou energii, tj. vysokou rychlost
- Zpomalením štěpných produktů se prostředí zahřívá
- Toto teplo je chladičem odváděno ven z aktivní zóny
- Jaké materiály jsou vhodné?
 - Dobře známé vlastnosti, velká tepelná kapacita, nízký bod tání, vysoký bod varu, netoxické, levné
 - Např. H_2O , D_2O , hélium, CO_2 , tekuté kovy, tekuté soli





Jaderná elektrárna s tepelným jaderným reaktorem



Části jaderné elektrárny

- Primární okruh
 - Uvolnění tepla v jaderném reaktoru a jeho přenos do dalších částí elektrárny
- Sekundární okruh
 - Výroba elektrické energie na parní turbíně
- Terciální okruh
 - Chladicí věže - chlazení kondenzující páry odcházející z turbíny



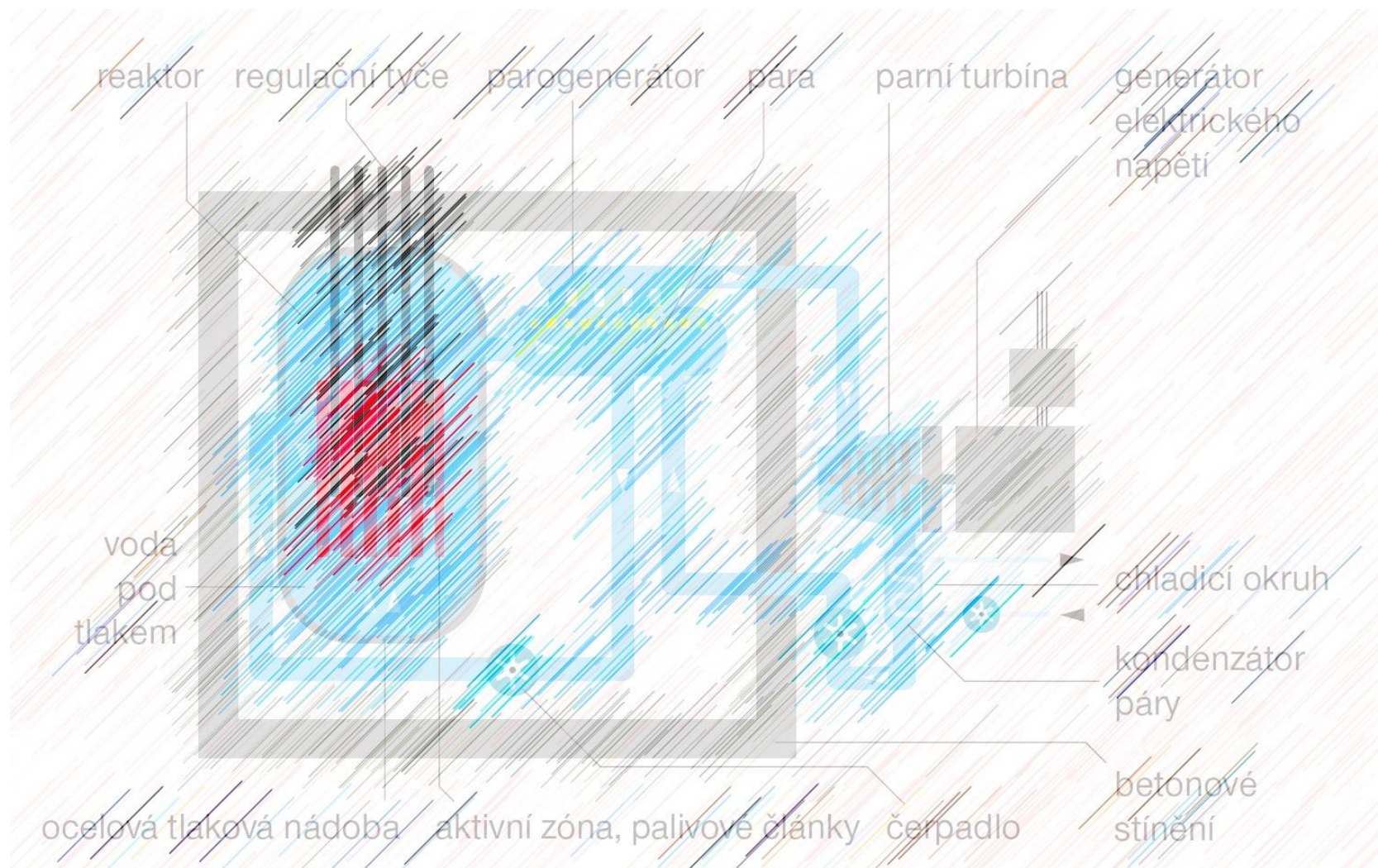
Reaktorová budova

- 1 Reaktor
- 2 Potrubí primárního okruhu
- 3 Hlavní čerpadlo
- 4 Kompenzátor objemu
- 5 Paragenerátor
- 6 Požární jeřáb
- 7 Bazén vyhořelého paliva
- 8 Zavážecí stroj
- 9 Hydraulický akumulátor
- 10 Ochranná obálka
- 11 Ventilační komín
- 12 Systém havarijního chlazení aktivní zóny

- 13 Dieselgenerátorová stanice
- 14 Strojovna
- 15 Napájecí nádrž
- 16 Hlavní parní potrubí
- 17 Vysokotlaký díl turbíny
- 18 Nízkotlaký díl turbíny
- 19 Generator
- 20 Budič
- 21 Separator
- 22 Kondenzátor
- 23 Tepelný výměník
- 24 Vstup a výstup chladicí vody
- 25 Čerpací stanice
- 26 Čerpadlo chladicí vody
- 27 Chladicí věž
- 28 Vývod výkonu z generatoru
- 29 Transformátor
- 30 Vывod výkonu
- 31 Zásobník destilátu

(zdroj ČEZ a.s.)





(zdroj ČEZ a.s.)



Primární okruh

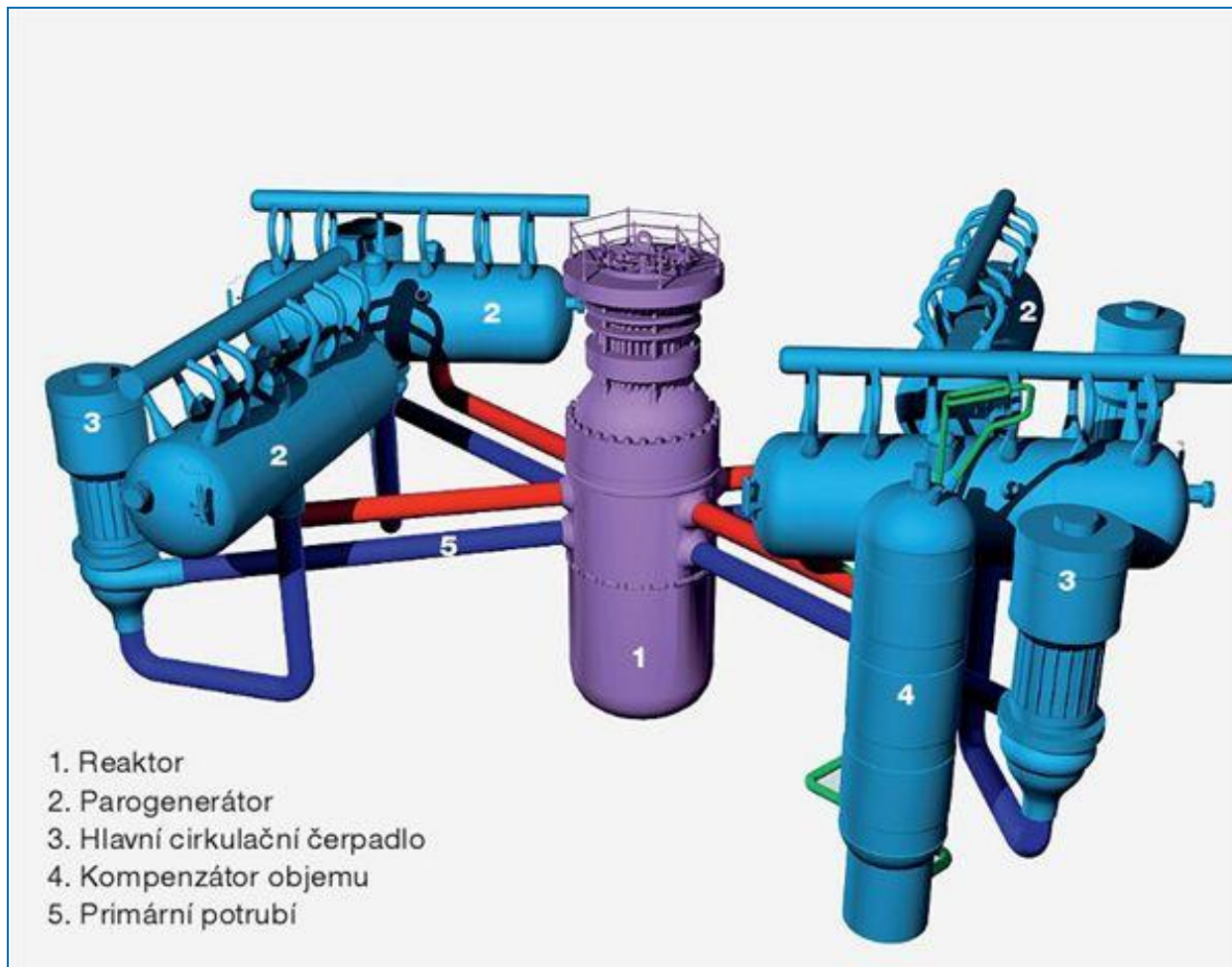


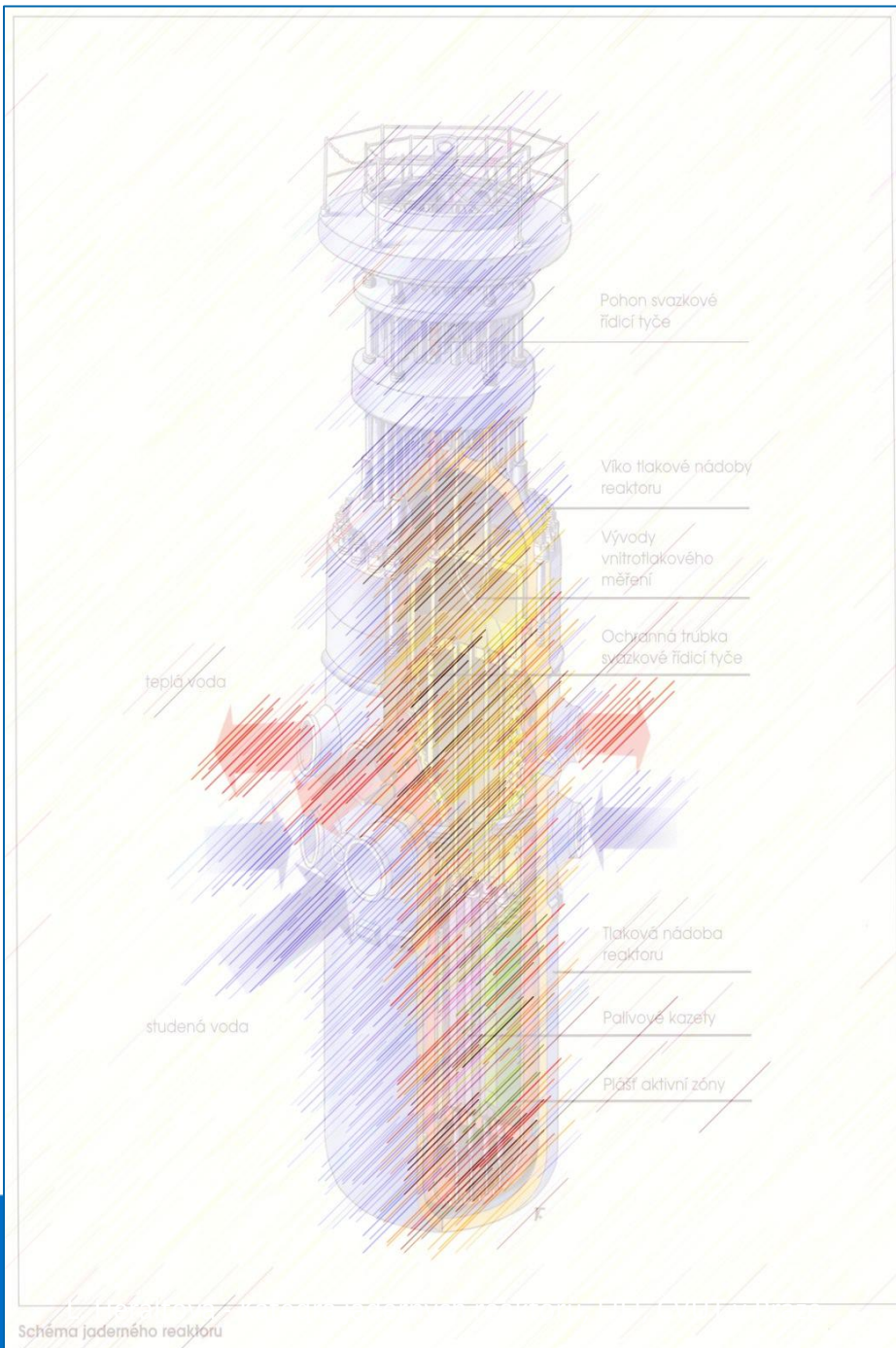
Schéma odpovídá rozmístění primárního okruhu reaktorů VVER-1000 (zdroj ČEZ a.s.)



Primární okruh – tlakovodní reaktor

- Typy reaktorů - VVER, PWR
- Lehká voda – H_2O – se používá jako moderátor a chladivo
- Teplota chladící vody na vstupu do reaktoru:
260-290 °C
- Teplota chladící vody na výstupu z reaktoru:
290-320 °C
- Tlak primární vody – 12-16 MPa → tlaková nádoba
 - Vysoký provozní tlak je důsledkem nízkého bodu varu vody při atmosférickém tlaku, zvýšení tlaku vede ke zvýšení teploty varu a tím se zlepší přestup tepla v parogenerátoru





(zdroj ČEZ a.s.)



Model reaktoru VVER-440

Pohled do reaktorové nádoby reaktoru VVER-440

Vnitřní části reaktorové nádoby reaktoru VVER-440



(zdroj soukromé fotografie)



Jaderné palivo

- Nejznámějším jaderným palivem je uran, izotop ^{235}U .
- V přírodě se vyskytuje uranová ruda s procentuálním zastoupením ^{235}U přibližně 0,7 %. Zbývající část tvoří převážně ^{238}U a stopové množství ^{234}U .
- Po vytěžení se ruda upravuje mechanickými i chemickými procesy a finálním produktem je diuranát amonný, tzv. žlutý koláč.
- V energetických jaderných reaktorech se používá palivo s procentuálním zastoupením do 5 % ^{235}U .
- Zvýšení obsahu ^{235}U se provádí obohacováním paliva.
- Chemická úprava na oxid uraničitý – UO_2



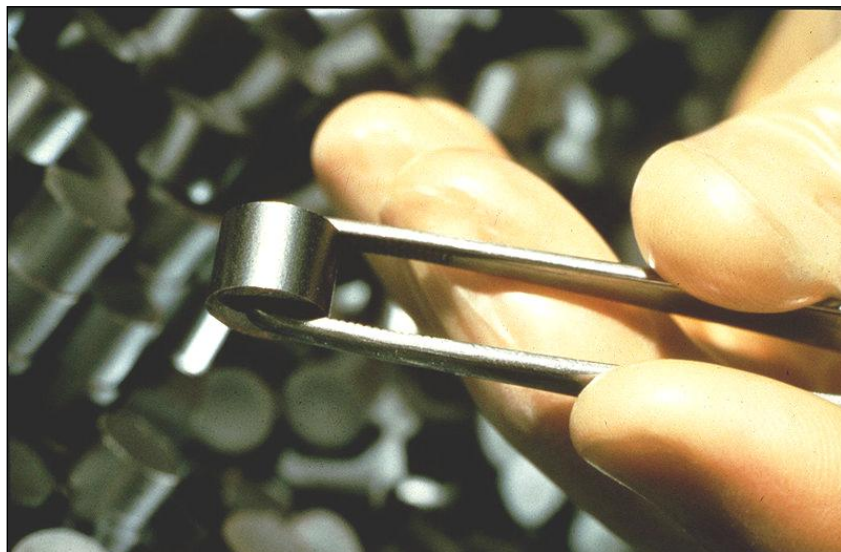
Palivové soubory

- Tablety z oxidu uraničitého UO_2 (průměr 7,6 mm, výška 0,9 -1,1 mm)
- Tablety jsou uzavřeny v povlakové trubce ze slitiny zirkonia → palivový proutek
- Povlaková trubka zabraňuje úniku štěpných produktů
- Z jednotlivých proutků jsou sestaveny palivové soubory
- Palivový soubor
 - Centrální trubka, vodící trubky
 - Palivové proutky
 - Distanční mřížky, obálka





Žlutý koláč (diuranát amonný) –
polotovar pro výrobu jaderného
paliva (zdroj DIAMO, s.p.).



Palivová tableta – UO_2 (zdroj U.S. NRC).



Palivo v transportním kontejneru
(VVER-1000)



(zdroj ČEZ a.s.)



Primární okruh - parogenerátor

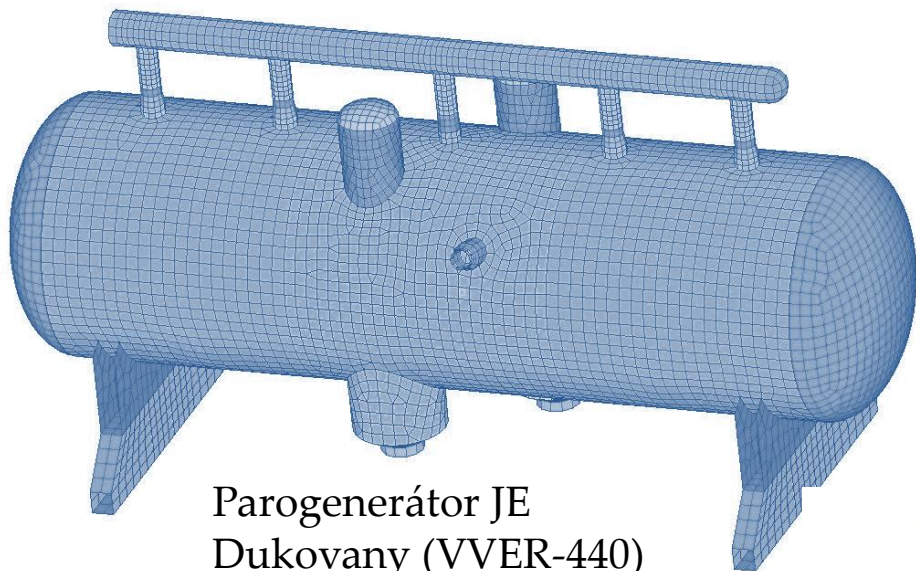
- Zajišťuje předání tepla z primárního okruhu do sekundárního a produkci nasycené páry, která na turbíně vyrábí elektrickou energii
 - Systém stovek trubek uvnitř tlakové nádoby
 - Sekundární voda proudí vně trubek, primární uvnitř
-
- Pouze reaktory vyrobené v Rusku mají horizontální parogenerátory, ostatní používají vertikální



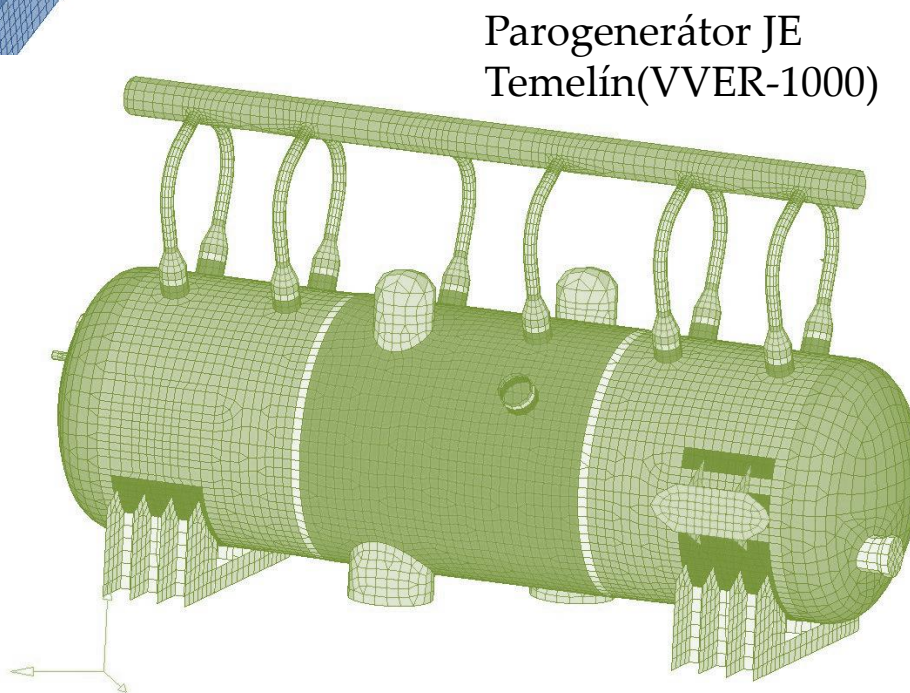
- 
- 1 Těleso parogenerátoru
 - 2 Přívod a rozvod napájecí vody
 - 3 Přívod horké primární vody z reaktoru
 - 4 Teplosměnné trubky
 - 5 Separátor vlhkosti páry (děrovaný plech)
 - 6 Sběrač páry
 - 7 Parní kolektor
 - 8 Odvod ochlazené primární vody z parogenerátoru

(zdroj ČEZ a.s.)





Parogenerátor JE
Dukovany (VVER-440)



Parogenerátor JE
Temelín(VVER-1000)

(zdroj ÚAM Brno)





Primární okruh – hlavní cirkulační čerpadlo



Kontejnment – VVER-1000

- Ochranná obálka primárního okruhu vystavěná z oceli a betonu
- Izoluje hermetický prostor primárního okruhu od vnějšího prostředí, uvnitř je podtlak
- V případě havárie zamezí úniku štěpných produktů do vnějšího prostředí
- Těsnost kontejnmentu musí být zaručena i při vysokých rozdílech tlaku
- Zároveň slouží jako ochrana primárního okruhu proti vnějším útokům





Montáž vrchlíku kontejneru



Struktura ocelové konstrukce



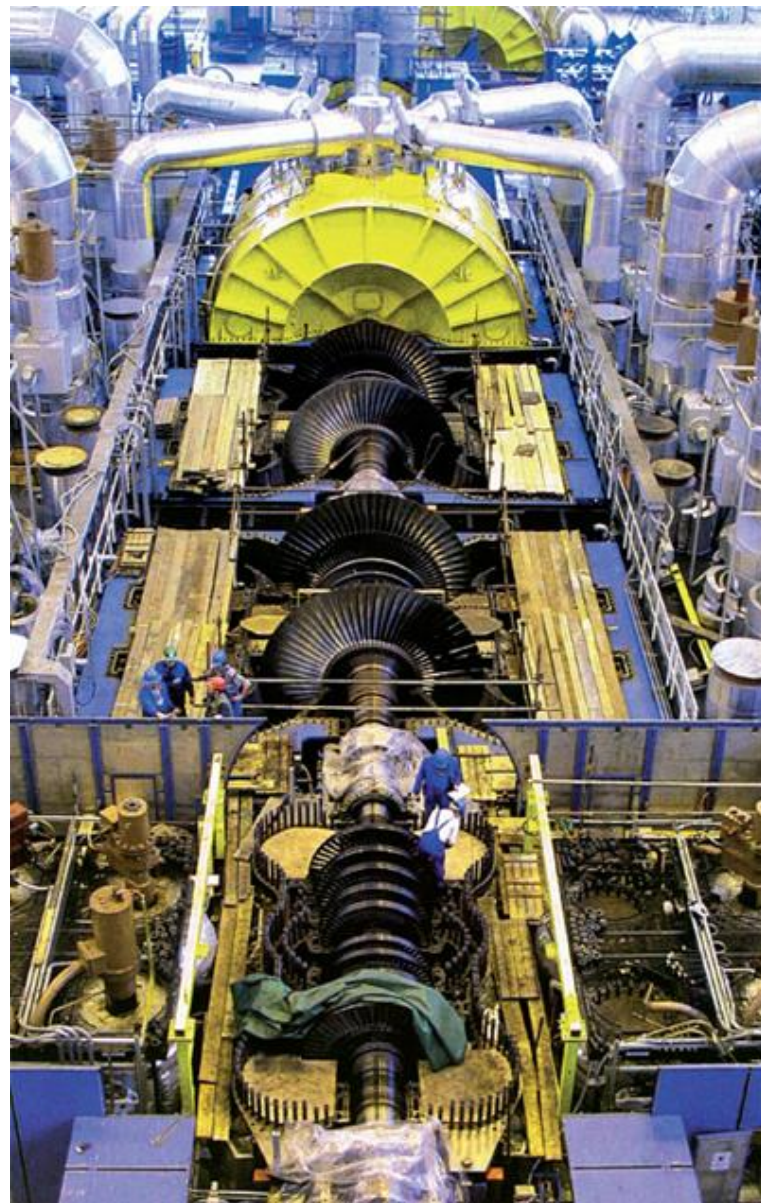
(zdroj ČEZ a.s.)



Sekundární okruh - turbína

- Přeměňuje energii páry na kinetickou energii rotoru turbíny
- Sytá pára o vysoké teplotě postupně expanduje na jednotlivých stupních turbíny
- S klesajícím tlakem páry roste její objem → prodlužují se lopatky turbíny
- Turbína má dvě části – vysokotlakou a nízkotlakou
 - Pouze jeden díl by vedl k příliš velkým rozměrům turbíny





(zdroj ČEZ a.s.)



Sekundární okruh - kondenzátor

- Pára po expanzi na turbíně vstupuje do kondenzátoru
- Trubkový tepelný výměník
- Uvnitř trubek proudí terciální voda, která způsobuje kondenzaci páry
- Voda (zkondenzovaná pára) po výstupu z kondenzátoru proudí do napájecí nádrže a dále do parogenerátoru
- Pro zvýšení termodynamické účinnosti sekundárního okruhu voda cirkuluje přes regenerační tepelné výměníky

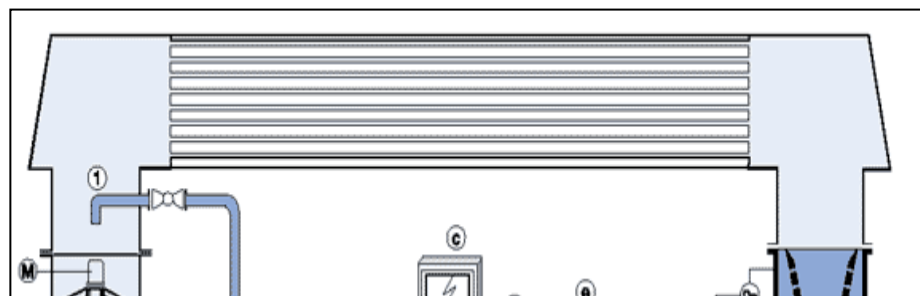




Napájecí čerpadla VVER-440
(zdroj ČEZ a.s.)



Kondenzátory
parní turbíny
VVER-440 (zdroj
ČEZ a.s.)

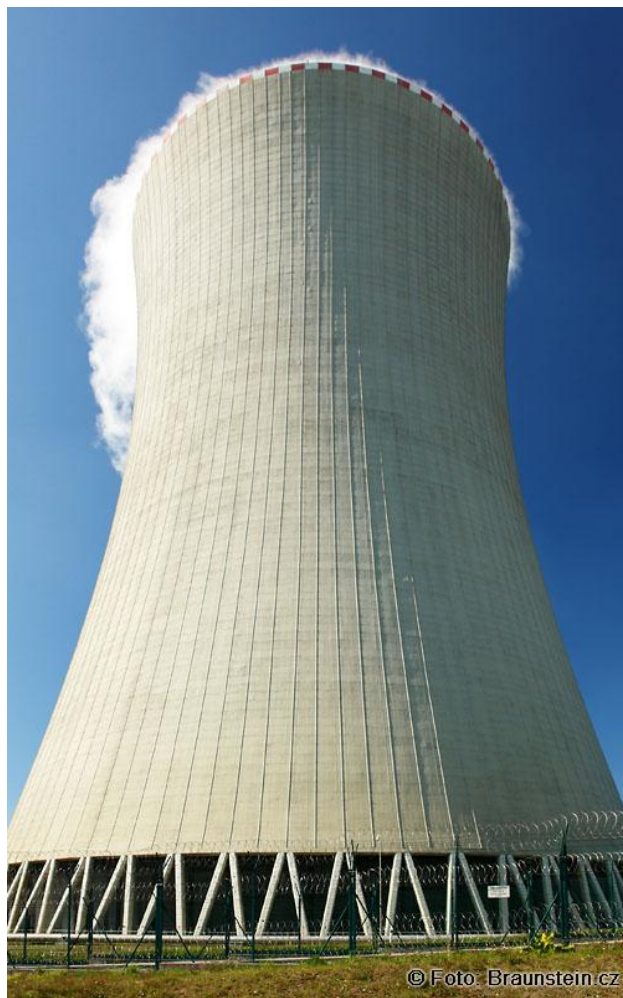


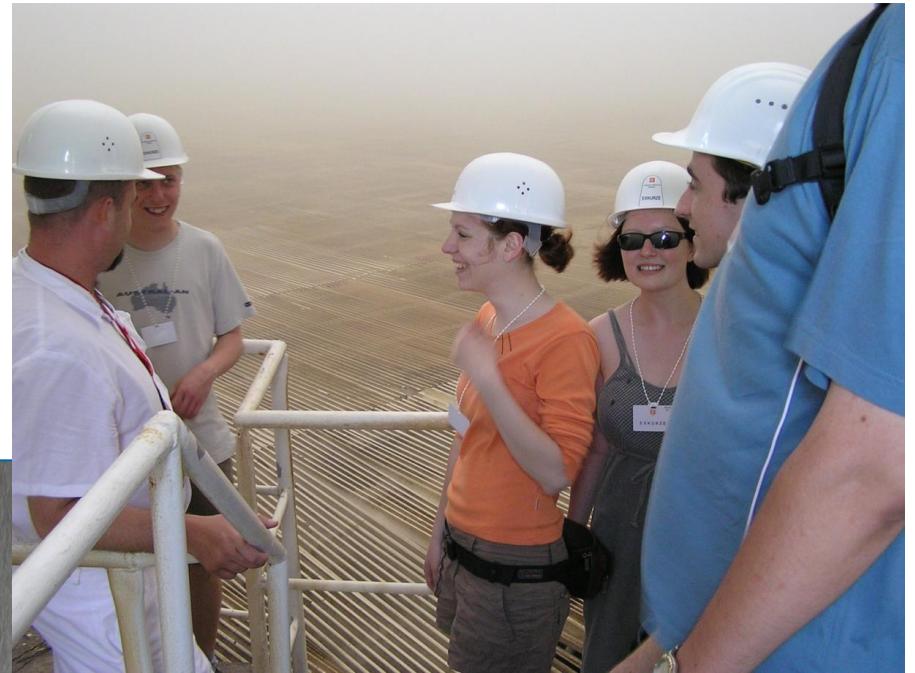
Terciální okruh

- Chladí vodu pro napájení kondenzátorů parní turbíny
- Čím je nižší teplota kondenzátu tím vyšší termická účinnost oběhu
- Řešení terciálního okruhu
 - Chladicí věže – ČR
 - Chlazení v řece nebo moři
- Největší potrubí a největší čerpadla jaderné elektrárny



Terciální okruh – chladicí věže

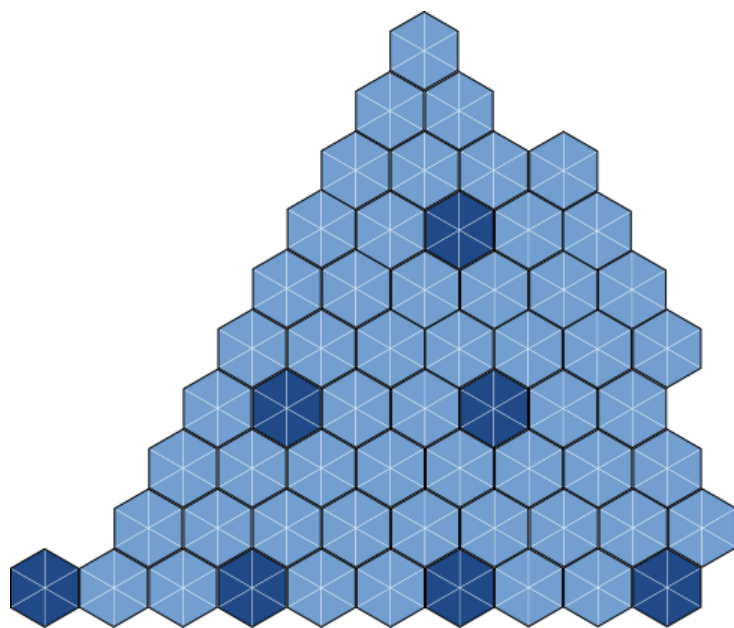




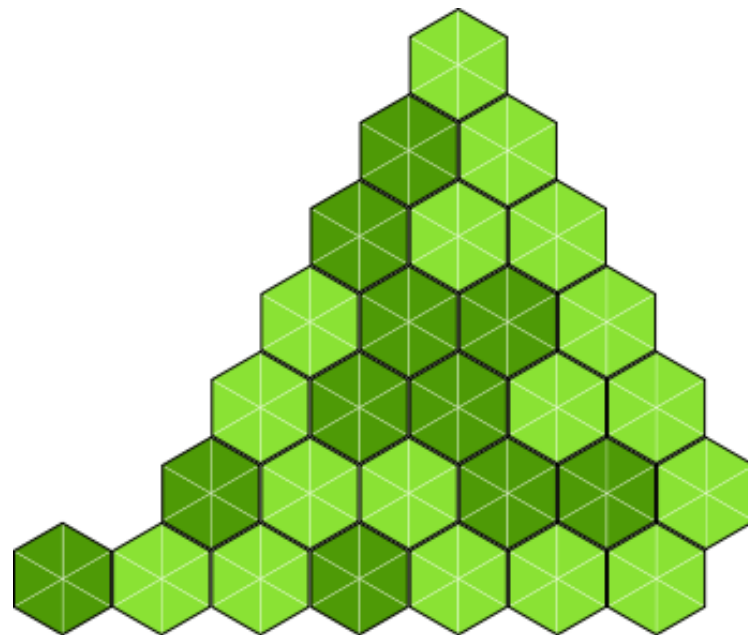
Dukovany a Temelín, jsou stejné?

	JE Dukovany	JE Temelín
Výška reaktoru/vnitřní průměr tlakové nádoby	23,67 m / 3,5 m	10,9 m / 4,5 m
Tloušťka stěny válcové nádoby	340 mm	193 mm
Počet smyček primárního okruhu	6	4
Počet palivových souborů v aktivní zóně	349 (z toho 37 regulačních)	163
Počet proutků v palivovém souboru	126	312 (+18 vodících trubek)
Hmotnost UO_2 v aktivní zóně	42 t	92 t
Regulační orgány	Regulační kazety	Regulační tyče (klastry)
Pracovní tlak	12,3 MPa	15,7 MPa
Teplota chladiva na vstupu/výstupu z reaktoru	267 °C /297 °C	290 °C /320 °C
Průtok chladiva reaktorem	42000 m ³ /hod	85000 m ³ /hod
Kontejnment	Ne – Barbotážní věž	Ano
Teplota páry vstupující na turbínu	256 °C	278,5 °C
Tlak páry vstupující na turbínu	4,3 MPa	6,3 MPa
Výška chladících věží	125 m	155 m

Aktivní zóna



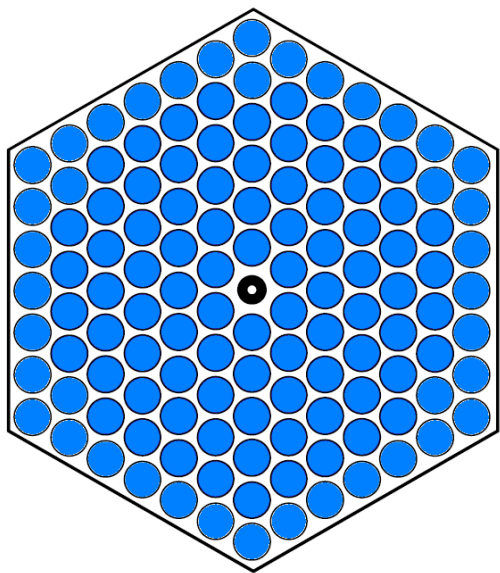
JE Dukovany (VVER-440)



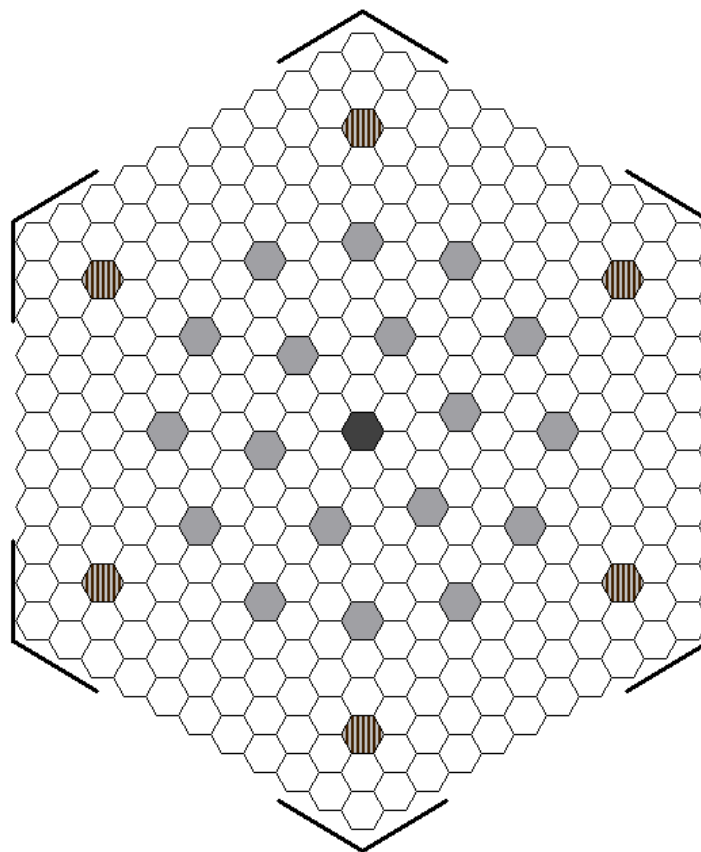
JE Temelín (VVER-1000)



Palivové soubory



JE Dukovany (VVER-440)



JE Temelín (VVER-1000)

(zdroj ČEZ a.s.)



Regulační kazety a regulační tyče

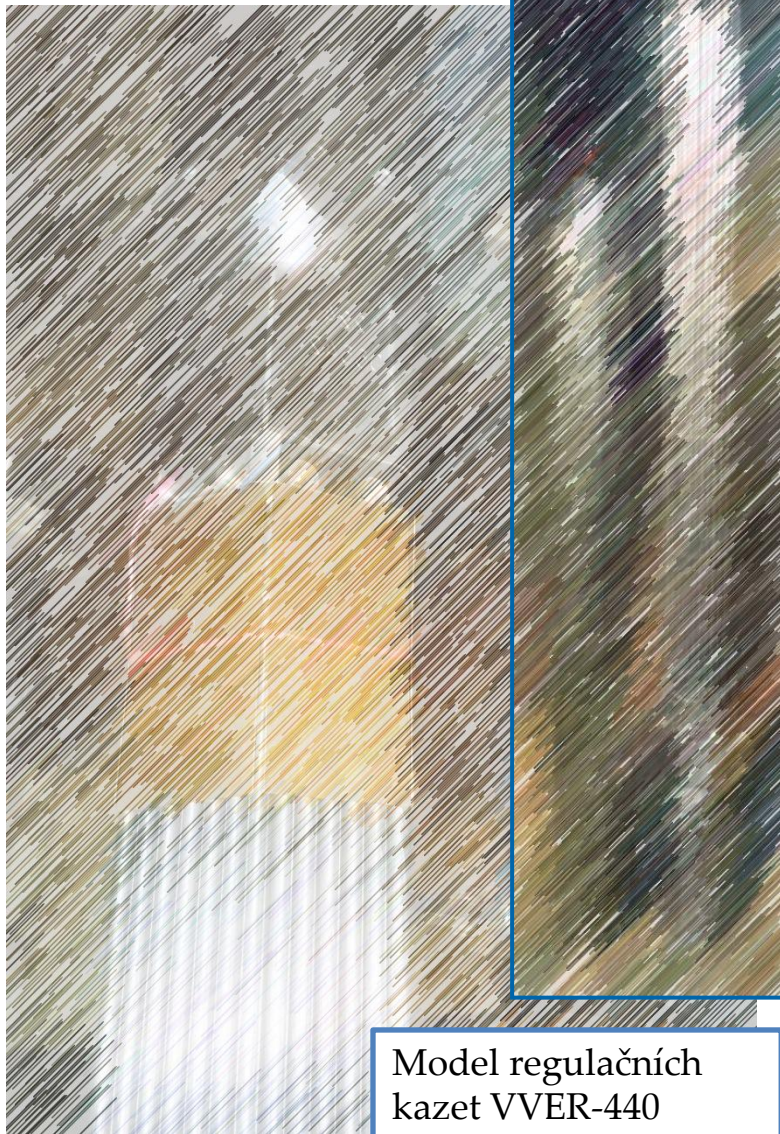
■ Regulační kazety

- Speciální regulační kazety jsou umístěny na vybraných pozicích aktivní zóny
- Skládají se ze dvou částí
 - Palivová část
 - Absorpční část (je umístěna nahoře)
- Jsou pevně spojeny a při zasouvání absorpční části je zároveň palivová část vysouvána ven z aktivní zóny

■ Regulační tyče (klastry)

- Tyčky z karbidu bóru – B_4C
- Zasouvají se do vodících trubek palivových souborů na vybraných pozicích

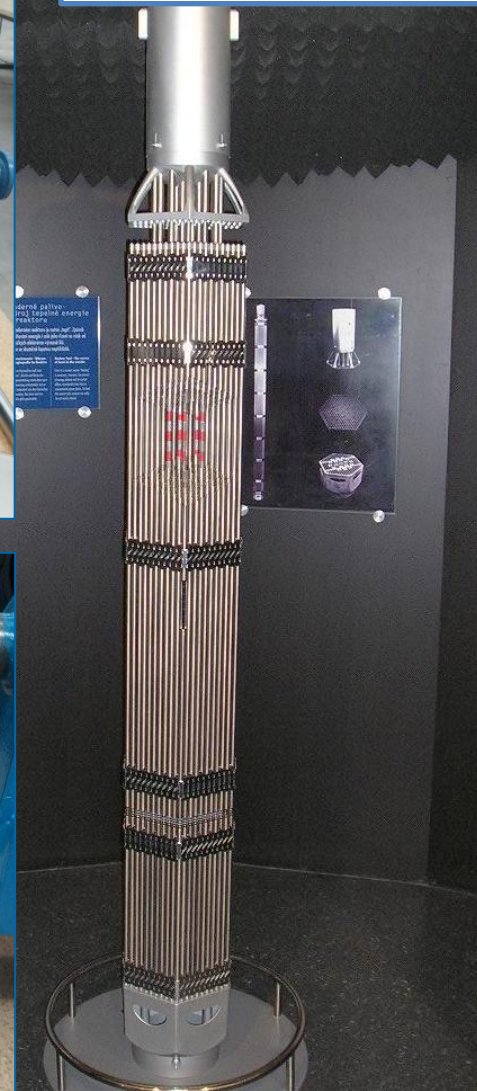




Model regulačních
kazet VVER-440



Model palivového
souboru VVER-1000
s regulačními tyčemi



Děkuji Vám za pozornost.

