

Jaderné reaktory a jak to vlastně funguje



O. Novák

Katedra jaderných reaktorů

24. května 2018

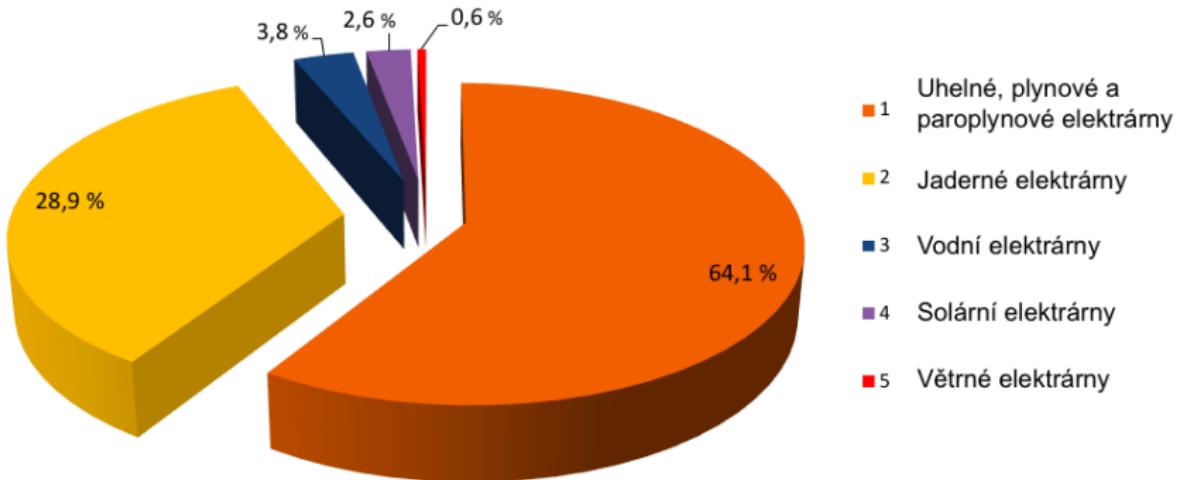
Obsah

- 1 Jederná energetika v České republice
- 2 Jak funguje jaderný reaktor?
- 3 Jaderná elektrárna s tepelným jaderným reaktorem
 - Primární okruh
 - Sekundární okruh
 - Terciární okruh
- 4 Srovnání Dukovan a Temelína

Výroba energie v České republice

- Typy zdrojů elektrické energie provozovaných v ČR:
 - Jaderné elektrárny
 - Uhelné, plynové a paroplynové elektrárny
 - Vodní elektrárny – akumulační, průtočné, přečerpávací
 - Sluneční elektrárny
 - Větrné elektrárny
- V roce 2016 bylo v České republice vyrobeno 83,3 TWh elektrické energie, z toho téměř 30 % pocházelo z jaderných elektráren

Struktura zdrojů elektrické energie



Uvedená struktura zdrojů elektrické energie odpovídá situaci na konci roku 2016, údaje jsou převzaty z Energetického regulačního úřadu.

Elektrárna Dukovany

- Čtyři tlakovodní reaktory typu VVER-440 (typ V-213).
- Výkon reaktorů je 500 MWe.
- Palivo dodává ruská společnost TVEL.



Elektrárna Temelín

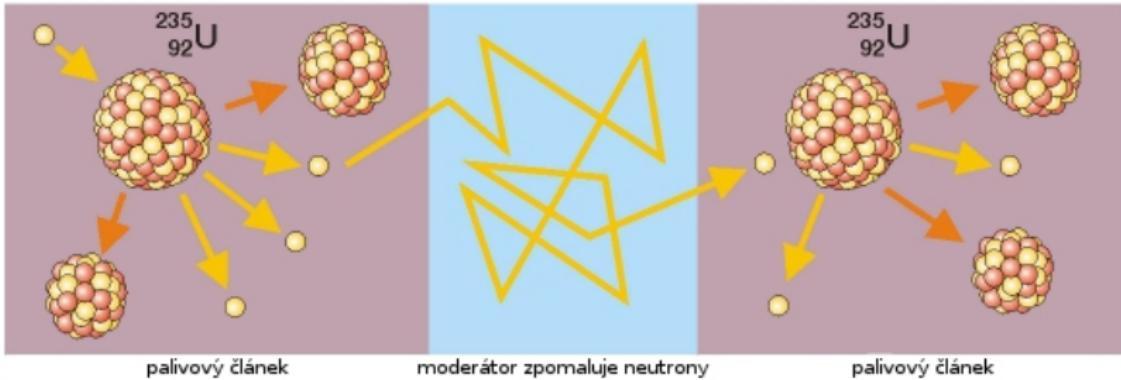
- Dva tlakovodní reaktory VVER-1000 (typ V-320).
- Výkon jednoho bloku je 981 MWe.
- Palivo dodává ruská společnost TVEL (dřívějším dodavatelem byla americká společnost Westinghouse).



Zdroje jaderné energie

- Štěpení – rozbitím těžkého jádra se uvolní energie
 - Fúze – energie se uvolní sloučením dvou lehkých jader
-
- První jaderný reaktor – Chicago, 2. prosince 1942
 - V současnosti je v provozu 449 energetických a 223 výzkumných reaktorů
 - Ve výstavbě je 56 energetických reaktorů a 8 výzkumných
 - Využití jaderných reaktorů – pohony lodí, ponorek, letadel, medicínské aplikace – výroba radionuklidů, výzkum, výroba elektrické energie

Štěpná řetězová reakce



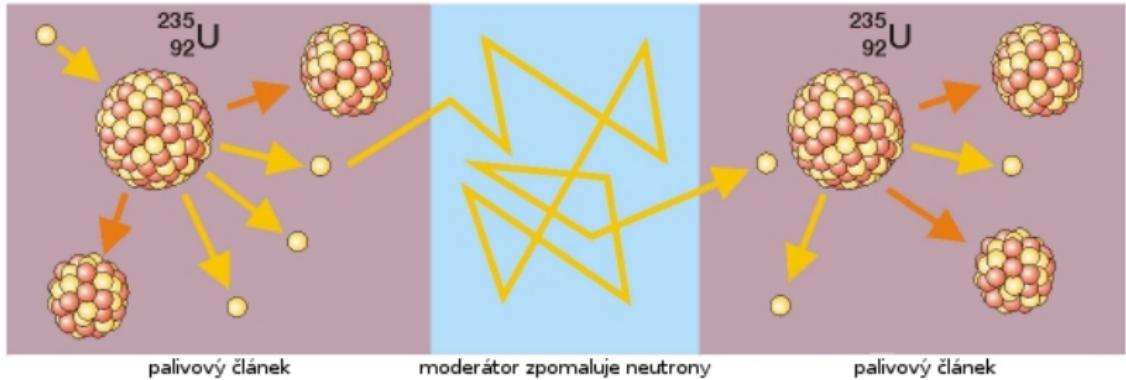
Štěpení a štěpné produkty

- V reaktoru je palivo obsahující štěpný materiál – ^{235}U .
- Ke štěpení potřeba tepelné 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 chladiva odváděno pryč z aktivní zóny
- Kromě štěpných produktů se uvolní také 2 nebo 3 nové neutrony s velkou energií – rychlé neutrony

Moderace neutronů

- Srážkami s moderátorem dochází ke zpomalování
- 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



Regulace reaktoru

- Z každého štěpení vznikají 2 nebo 3 nové neutrony.
 - konstrukční materiály
 - únik pryč
 - další štěpení
- Co s tím? = → regulační orgány - jsou vyrobeny z materiálu, který velmi dobře zachytává tepelné neutrony
 - Např. kadmium, bór, hafnium

Kritický stav

- Počet neutronů se v čase nemění
- Upravuje poloha regulačních orgánů - regulační tyče
- Právě jeden neutron, který vznikne ze štěpení vyvolá další štěpení jádra uranu
- I přes tuto zvláštní terminologii je kritický stav žádaným 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 rychlosť
- Zpomalením štěpných produktů se prostředí zahřívá
- Toto teplo je chladivem 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 , helium, CO_2 , tekuté kovy, tekuté soli

Části jaderné elektrárny

- Primární okruh

- Uvolnění tepla v jaderném reaktoru a jeho přenos do dalších částí elektrárny

- Sekundární okruh

- Výroba elektrické energie

- Terciární okruh

- Chladící věže - chlazení kondenzující páry vystupující z turbíny

Jaderná elektrárna s tepelným jaderným reaktorem

Řez výrobním blokem

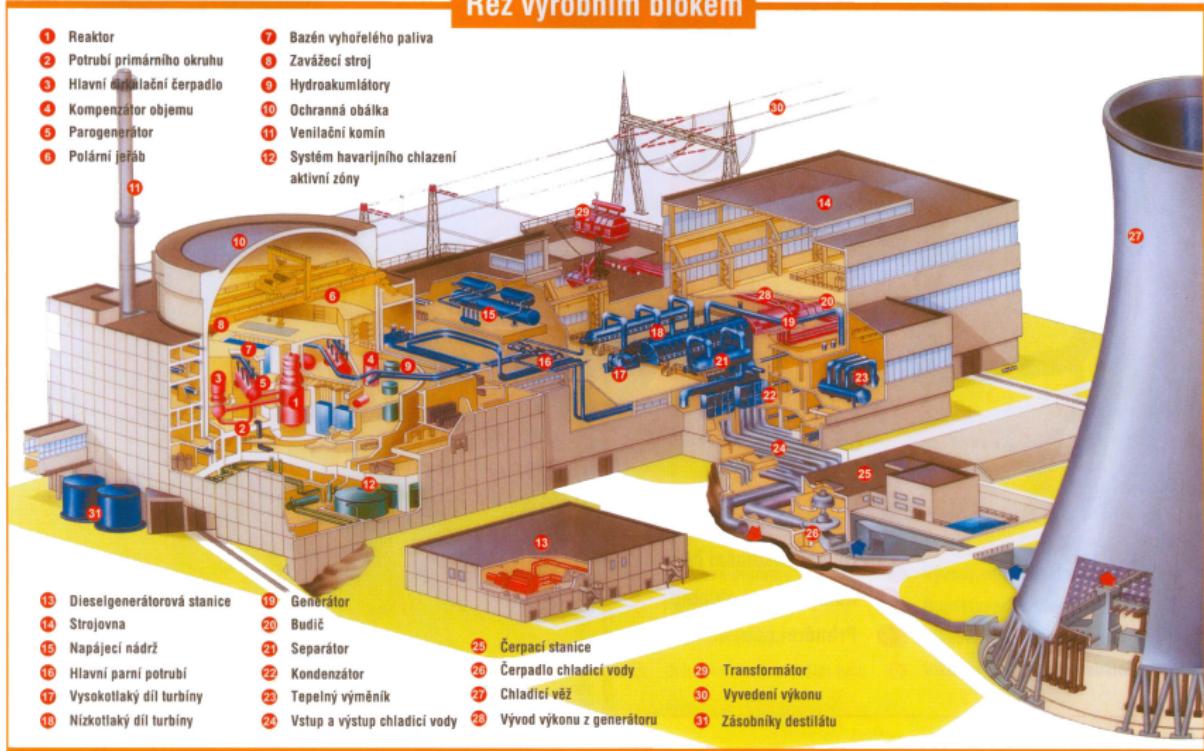
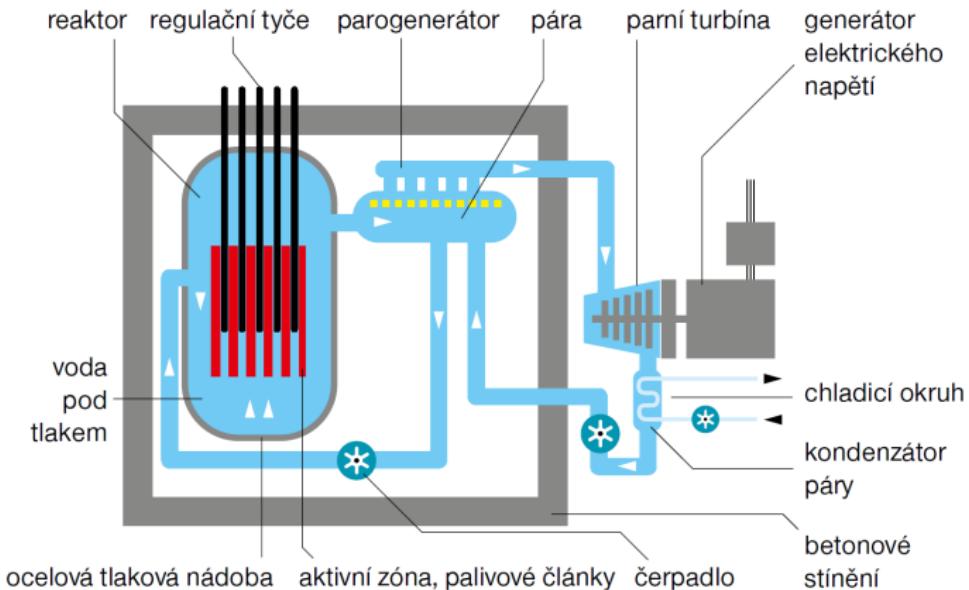
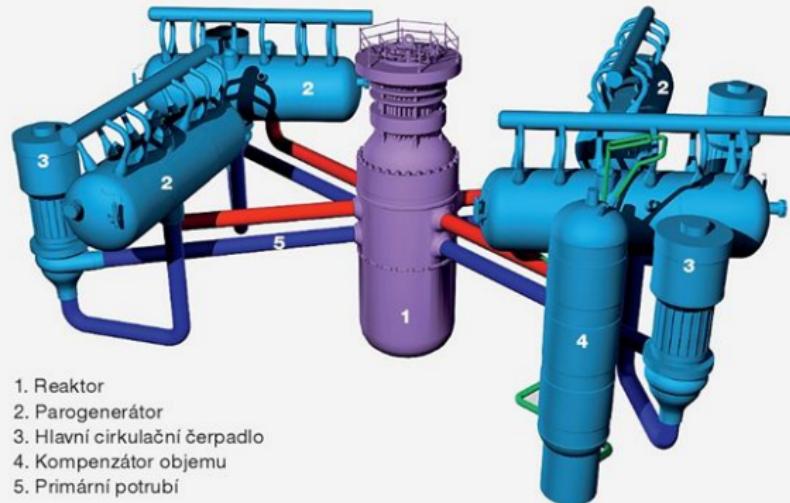


Schéma elektrárny



Primární okruh



Parametry primárního okruhu

- 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

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.

Palivové soubory

- Tablety z oxidu uraničitého UO₂ (průměr 7,6 mm, výška 0,9 až 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

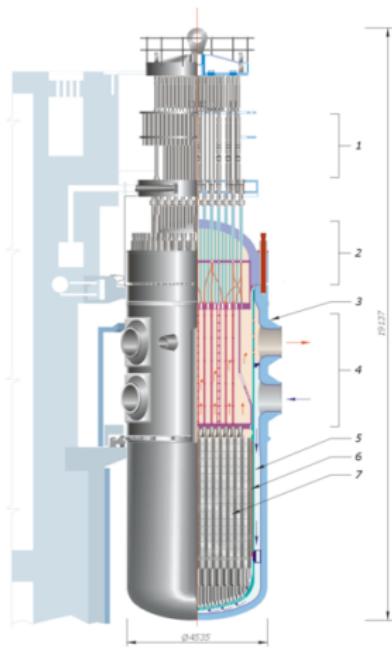
Palivové soubory



VVER-440 Reaktorová nádoba



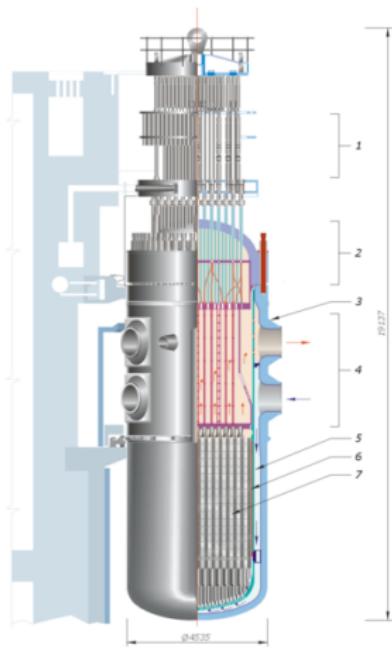
VVER-1000 Montáž reaktoru



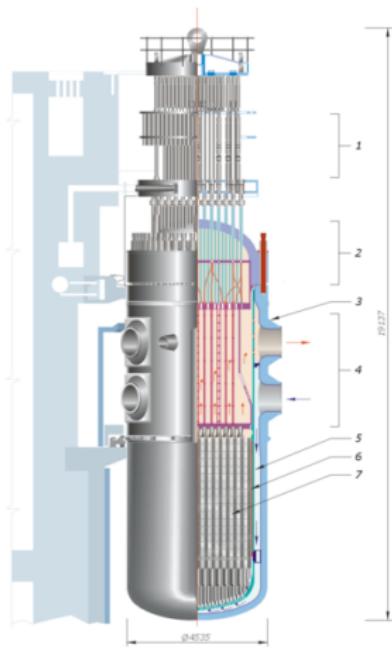
VVER-1000 Utahovák



VVER-1000 Blok ochranných trub



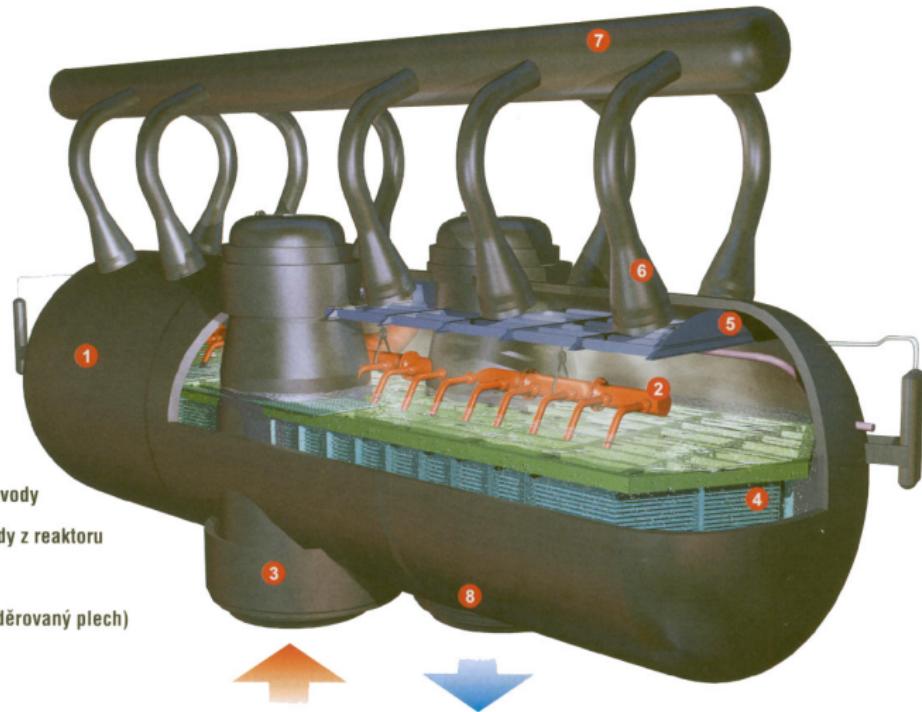
VVER-1000 Dokončena montáž reaktoru



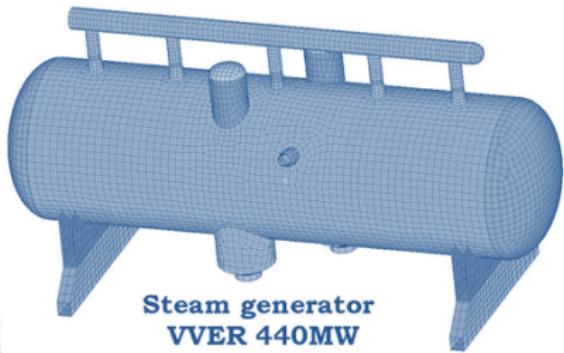
Parogenerátor

- 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

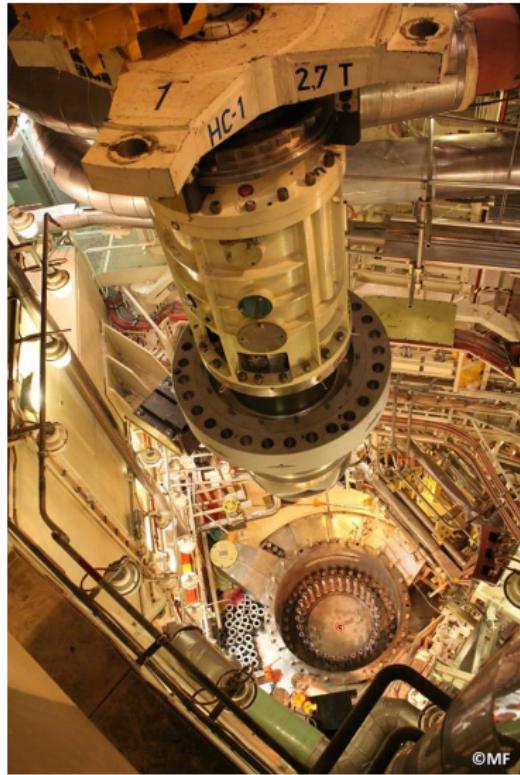
Schéma parogenerátoru



Modely parogenerátoru



Hlavní cirkulační čerpadlo



VVER-1000 Kontejnment

- 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

Kontejnement



Montáž vrcholku kontejnmentu



Parní 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

Hlavní cirkulační čerpadlo



Turbína při odstávce



Kondenzátor turbíny

- 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

Kondenzátor turbíny



Další zařízení sekundárního okruhu

- Separátor vlhkosti/mezipřihřívák
- Napájecí čerpadla
- Napájecí nádrž
- Výměníky pro regenerační ohřev - nízkotlaké, vysokotlaké



Terciární okruh

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

Chladící věž



Chladící věž



Dukovany a Temelín, jsou stejné?

	Dukovany	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 reg.)	163
Počet proutků v palivovém souboru	126	312 (+18 vodících tr.)
Hmotnost UO ₂ v aktivní zóně	42 t	92 t
Regulační orgány	kazety	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
Kontejnement	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

Děkuji za pozornost