

Jaderná elektrárna Temelín (ETE)

Jaderný reaktor **VVER-1000** – Vodou chlazený, Vodou moderovaný Energetický Reaktor



Budovy jaderné elektrárny

1. **Budova reaktoru** – skládá se ze dvou hlavních částí:
 1. **hermetického prostoru** skládajícího se z ochranné obálky (kontejnment) a vnitřních konstrukcí oblasti lokalizace havárie
 2. **nehermetického prostoru**, skládajícího se ze základové části, obestavby a ventilačního komína. V obestavbě se nacházejí prostorově oddělené bloková a nouzová dozorná a pomocné systémy primárního okruhu.
2. **Diesलगенераторové stanice**

Pro případ ztráty hlavního i rezervního elektrického napájení vlastní spotřeby elektrárny je elektrárna vybavena nouzovými zdroji el. energie. Tyto zdroje jsou schopny elektricky napájet systémy, které jsou důležité z hlediska jaderné bezpečnosti. Každý výrobní blok má tři dieselgenerátory, které jsou umístěné ve dvou nezávislých stavebních objektech.
3. **Budova aktivních pomocných provozů** – je tvořena třemi objekty, které plní společné funkce pro oba výrobní bloky. Patří do části elektrárny důležité z hlediska jaderné

bezpečnosti.

1. První objekt je určen ke skladování čerstvého paliva a jsou v něm umístěny speciální dílny.
 2. Druhý objekt – v něm jsou umístěny radiochemické laboratoře a dozorna radiační kontroly.
 3. Třetí objekt obsahuje technologické systémy na speciální čištění radioaktivních vod a systémy na zpracování kapalných a pevných radioaktivních odpadů.
4. **Mezistrojovna** - zde je umístěn systém zajišťující dodávku napájecí vody do parogenerátorů. Mezistrojovna přímo přechází ve strojovnu a je umístěna mezi budovou reaktoru a strojovnou.
5. **Strojovna**
Nachází se zde prvky sekundárního okruhu. Hlavním je turbogenerátor o výkonu 1000 MW, skládající se z parní turbíny a elektrického generátoru. Parní turbína je tvořena jedním vysokotlakým a třemi nízkotlakými díly. Po obou stranách turbíny jsou umístěny horizontální separátory – přehříváky páry.
6. **Budova ústřední elektrické dozorny**
nachází se zde stanoviště směnového inženýra, ústřední elektrická dozorna a informační systém elektrárny.

Základní členění jaderné elektrárny:

1. Primární okruh

Skládá se z:

1. reaktoru
 2. parogenerátorů
 3. kompenzátoru objemu, barbotážní nádrže a hermeticky uzavřených bazénů
 4. hlavních cirkulačních čerpadel
 5. systému doplňování primárního okruhu (tzv. borová regulace)
1. **Jaderný reaktor** - vnitřní části reaktoru (aktivní zóna) jsou umístěny v **tlakové nádobě**. Je zhruba 11 m vysoká a má vnější průměr 4,5 m. Tloušťka stěny její válcové části je 193 mm. Nádobu je navržena na tlak 17,6 Mpa při teplotě 350 stupňů C (provozní tlak je 15,7 Mpa při teplotě 290 – 320 stupňů C). Je vyrobena z nízkolegované chrom-nikl-molybden-vanadové oceli. Ke sledování křehnutí tlakové nádoby v důsledku působení neutronového záření jsou v reaktoru umístěny svědečné vzorky materiálů, které se pravidelně měří a hodnotí. Tato nádoba je opatřena odnímatelným víkem, připevněným hydraulicky předepjatými svorníky a je utěsněna dvěma kovovými samotěsnícími kroužky, jejichž těsnost je nepřetržitě monitorována. Vnitřní části reaktoru tvoří:
1. **šachta aktivní zóny**
 2. **boční plášť** - chrání tlakovou nádobu před účinky neutronového záření
 3. **blok ochranných trubek**

Aktivní zónu reaktoru tvoří palivové a regulační tyče, uspořádané do hexagonálních mříží. Palivové soubory pro ETE dodává americká firma Westinghouse. Každý rok dochází k výměně čtvrtiny palivových souborů. Vyhořelé palivové soubory se ukládají

do bazénu, umístěného vedle tlakové nádoby reaktoru, uvnitř kontejnmentu. Jako palivo se používá slabě obohacený (přibližně 4% ^{235}U , zbytek tvoří ^{238}U) oxid uranický UO_2 . Uran 235 se při srážce s pomalým neutronem (tzv. tepelným neutronem) rozštěpí na dvě lehčí jádra a 2-3 neutrony. Nově vzniklé částice se navzájem odpuzují a tudíž se od sebe vzdalují velkou rychlostí (rychlost pohybu neutronů dosahuje 1/10 rychlosti světla).

Uran 238 se při srážce s neutronem neštěpí, ale absorbuje ho a tím dochází ke zpomalení štěpné řetězové reakce. Regulační tyče se skládají z kadmia a boru, což jsou prvky, které dobře absorbují neutrony. Slouží k regulaci rychlosti řetězové reakce. Jako **moderátor** (zpomalovač neutronů – neutrony je nutné zpomalovat, protože při nižších rychlostech roste pravděpodobnost dalšího štěpení uranových atomů) je použita **lehká voda** H_2O , do které se přidává v malé koncentraci **kyselina boritá** H_3BO_3 , která slouží k dlouhodobější regulaci štěpné řetězové reakce (ta se používá ke kompenzaci vyhořívání paliva). Díky použití vody jako moderátoru bývá také tento typ reaktoru označován jako **lehkovodní reaktor**. Při zpomalování neutronů předávají tyto část své kinetické energie moderátoru, přičemž dochází k přeměně kinetické energie na vnitřní energii moderátoru, tudíž zde voda zároveň slouží jako chladivo, které odvádí teplo generované štěpnou řetězovou

2. reakcí do **parogenerátoru**, je to výměník, ve kterém voda primárního okruhu předává své teplo vodě sekundárního okruhu. Vzhledem k tomu, že teplota vody v primárním okruhu je značně vyšší než teplota varu vody v sekundárním okruhu (což je způsobeno vysokým tlakem v primárním okruhu) dochází k mohutnému vývinu páry, která je odváděna na vysokotlaký díl turbíny sekundárního okruhu. Chladicí smyčka primárního
3. okruhu dále obsahuje **kompensátor objemu** (nádoba ve spodní části napojená na horkou větev smyčky, na horní část je napojena studená větev smyčky, dále jsou do ní zabudovány elektrické ohřívačky), který vyrovnává změny tlaku a objemu chladiva. O
4. oběh chladiva se starají **hlavní cirkulační čerpadla** (na každý blok ETE připadají čtyři).
5. Dalším prvkem je **systém doplňování primárního okruhu**, kde se dá nastavit požadovaná koncentrace kyseliny borité, přimíchávané do vody.

2. Sekundární okruh

Skládá se z:

1. hlavního parního kolektoru
2. přepouštěcích stanic do atmosféry
3. přepouštěcích stanic do kondenzátoru
4. rychlozávěrných ventilů turbíny
5. regulačních ventilů turbíny
6. turbíny (nizkotlakého a vysokotlakého dílu)
7. separátoru - přihříváku
8. hlavního kondenzátoru
9. kondenzátních čerpadel
10. napájecích čerpadel
11. napájecí nádrže
12. nizkotlakých ohříváků (nizkotlaké regenerace)
13. vysokotlakých ohříváků (vysokotlaké regenerace)

1. Do **hlavního parního kolektoru** ústí vývody páry ze všech parogenerátorů
2. Na hlavním parním kolektoru jsou umístěny ventily **přepouštěcích stanic do atmosféry**, které mají za úkol v případě prudkého nárůstu tlaku páry část upustit do atmosféry, a tím snížit tlak páry. Za ventily přepouštěcích stanic do atmosféry se nacházejí ventily **přepouštěcích stanic do kondenzátoru**, ty v případě prudkého

nárůstu tlaku přepouštějí část páry do hlavního kondenzátoru, používají se ale také v případě odstavení turbíny (např. při odstavení reaktoru).

3. Na ústí hlavního parního kolektoru do vysokotlakého dílu turbíny jsou umístěny **rychlozávěrné ventily**, o nichž bude detailněji pojednáno v části věnované ochranným systémům jaderné elektrárny.



Turbína ETE (v popředí vysokotlaký díl, v pozadí nízkotlaké díly, po stranách jsou přehříváky páry)

4. Hlavní parní kolektor ústí do **turbíny (vysokotlakého dílu)**, kde se přeměňuje vnitřní energie páry na rotační mechanickou energii rotoru turbíny. Tlakový spád páry se mění v rozvaděcích lopatkách statoru v kinetickou energii páry, která je předávána prostřednictvím oběžných lopatek rotoru. Rotor turbíny je spojen s rotorem generátoru, kde se transformuje kinetická energie rotoru na energii elektrickou.

Kondenzátor je tepelný výměník, v němž je pára z turbíny chlazená vodou terciálního okruhu a kondenzuje.

Voda z kondenzátoru je **kondenzátními čerpadly** hnána do **nízkotlakých ohříváků**, které slouží k ohřátí kondenzátu před vstupem do napájecí nádrže. Kondenzát je ohříván parou odebranou z turbíny (po částečné expanzi). Voda z NTO pokračuje do **napájecí nádrže**, která slouží jako zásobník vody pro napájecí čerpadla, do ní je přiváděna pára z turbíny, která zde slouží pro ohřívání napájecí vody a pro odplynění kondenzátu v odplynovací nádrži. Voda z napájecích nádrží je čerpána napájecími čerpadly do vysokotlaké regenerace. Tato čerpadla jsou na ETE celkem 3, při normálním provozu běží 2, jedno je záložní. Vysokotlaké ohříváky mají podobnou funkci jako nízkotlaké. Z vysokotlakých ohříváků pokračuje kondenzát již přímo do parogenerátoru.

3. Terciální okruh

Jeho hlavní funkcí je vytvořit v kondenzátoru co největší podtlak, aby účinnost turbíny byla co největší. Čím nižší je teplota vody v terciálním okruhu, tím vyšší je podtlak v kondenzátoru. Skládá se z:

1. chladících věží
2. oběhových čerpadel
3. potrubí a kanálů chladicí vody



Prostor pro nasávání vzduchu do chladicí věže

1. Chladicí věž je železobetonová stavba ve tvaru rotačního hyperboloidu, která slouží k zajištění tahu vzduchu pro chlazení vody a k uchycení vestaveb zajišťujících rozstřík chladicí vody. Skupenské teplo potřebné k odparu je hlavním důvodem snížení teploty chladicí vody. Ve spodní části věže je kruhový bazén, v němž se ochlazená voda shromažďuje a čerpadly chladicí vody je dopravována zpět do kondenzátoru turbín.
2. Oběhová čerpadla zajišťují oběh vody mezi kondenzátorem turbín a chladíci věžemi.
3. Potrubí a kanály chladicí vody mají největší průměr na elektrárně.

Bezpečnostní systémy

Systémy, které jsou určeny k plnění bezpečnostních funkcí v jaderné elektrárně jsou označeny jako

systémy důležité z hlediska jaderné bezpečnosti. Tyto jsou podle své funkce a významu pro jadernou bezpečnost rozdělovány na:

1. bezpečnostní systémy
2. systémy související s jadernou bezpečností (patří sem ochranné, výkonné a podpůrné systémy. Zahrnují přístrojové vybavení pro monitorování bezpečnostně důležitých veličin a stavů jaderné elektrárny a pro automatické spouštění výkonných bezpečnostních systémů, tj. takových, které na základě signálů od ochranných systémů zajišťují plnění příslušných bezpečnostních funkcí).

Výkonné bezpečnostní systémy na ETE:

- pasivní systém chlazení aktivní zóny reaktoru. Tento systém je tvořen čtyřmi hydroakumulátory a slouží k rychlému zaplavení aktivní zóny při havarijních situacích, které jsou spojeny s náhlým poklesem tlaku v primárním okruhu.
- Čtyři aktivní systémy zálohované 3x100%.
 - Nízkotlaký systém havarijního chlazení aktivní zóny. Systém slouží k havarijnímu dochlazování aktivní zóny a k dlouhodobému odvodu zbytkového tepelného výkonu reaktoru.
 - Vysokotlaký systém havarijního chlazení aktivní zóny. Systém slouží k udržování této zóny v podkritickém stavu při zachování vysokého tlaku a k chlazení aktivní zóny při malé a střední havárii typu LOCA, tj. při havárii spojené se ztrátou chladiva.
 - Sprchový systém ochranné obálky. Systém zajišťuje snížení tlaku v hermetických prostorech po havárii typu LOCA, tj. zabráňuje únikům radioaktivních látek do životního prostředí.
 - Vysokotlaký havarijní doplňovací systém. Ten slouží k potlačení havárií s rychlým nárůstem výkonu reaktoru.

1. Inherentní bezpečnost

je podmíněna fyzikálními zákony. U tlakovodního reaktoru je dána fyzikálními vlastnostmi uranu a vody, které se podílejí na procesu jaderného štěpení. Voda, která slouží jako moderátor (zpomalovač neutronů, viz výše), zvětšuje v důsledku růstu teploty svůj objem. To znamená, že dochází ke zvětšování vzdáleností mezi jednotlivými molekulami vody, což má za následek snížení moderačního účinku vody (viz první odstavec, kde je uvedena fyzikální podstata štěpení uranu).

Fyzickou vrstvu ochrany jaderné elektrárny tvoří

1. matrice paliva (v matici uranových tablet se zachytávají téměř všechny štěpné produkty vzniklé při štěpení, což je podmíněno fyzikálními vlastnostmi uranu 238)
2. pokrytí palivových proutků (tzv. cladding, které je provedeno ze speciální slitiny zirkaloye tak, aby bylo po celou dobu plánovaného využití hermetické a aby bránilo úniku štěpných produktů.
3. konstrukce primárního okruhu. Tlaková nádoba reaktoru a potrubí primárního okruhu tvoří bariéru, která odolává teplotnímu a radiačnímu zatížení.
4. kontejnment – v něm je umístěn celý primární okruh. Je konstruován ze železobetonu, vysoký 56 m, skládá se z válce a kulového vrchlíku. Stěny válce jsou silné 1,2 m. Konstrukce kopule je pouze o 10 cm slabší. Vnitřní průměr kontejnmentu je 45 m. Ochranná funkce kontejnmentu je zajištěna několika, převážně pasivně působícími prvky:
 - vnitřní povrch kontejnmentu je pokryt 8 mm silnou vrstvou oceli, která hermeticky uzavírá vnitřní prostor kontejnmentu a tak brání úniku radionuklidů do okolí,
 - kontejnment je projektován na maximální přetlak 0,49 Mpa při 150 stupních C,

- trvalé udržování podtlaku uvnitř kontejnmentu umožňuje v případě malých úniků radioaktivity její odfiltrování a nízkoaktivní zbytek kontrolovaně odvést do ventilačního komína. Vypnutí systému ventilace při větších haváriích umožňuje lokalizovat radioaktivitu uvnitř kontejnmentu,

- konstrukce kontejnmentu je provedena z předpjatého betonu. Předepnutí je provedeno ocelovými předepínacími lany, která procházejí celou konstrukcí kontejnmentu. Kromě výše zmíněných funkcí zajišťuje kontejnment ochranu uvnitř umístěných zařízení proti vnějším vlivům. Například diverzní akce, pád letadla, tlaková vlna od výbuchu.

Přístup personálu a doprava materiálu do hermetického prostoru kontejnmentu jsou umožněny pomocí zdvojených hermetických vstupů, mezi kterými je vyrovnávací komora. Tyto vstupy lze otvírat pouze dovnitř. Při otevření prvních dveří nelze otevřít druhé dveře. Potrubí a elektrické kabely procházejí přes hranici hermetického prostoru speciálními hermetickými průchodkami, jejichž spolehlivost je průběžně sledována.



Hermetický vstup do kontejnmentu

2. Dále je bezpečnost jaderné elektrárny garantována vysokou kvalifikací obsluhujícího personálu. Je kladen důraz na výběr lokality (ze seismického hlediska atp.), výběr kvalitních komponent.

Zdroje:

1. Materiály ČEZ (<http://www.cez.cz/>)
2. Anglická verze Wikipedie (<http://en.wikipedia.org/>)
3. Encyklopedie Fyziky Jaroslava Reichla (<http://fyzika.jreichl.com>)