

9. JADERNÁ ENERGETIKA

Jiří Škorpík, ORCID: 0000-0002-3034-1696, skorpik.jiri@email.cz

Úvod 1

Jaderné reaktory 1

- Tlakovodní reaktor 1

Jaderné elektrárny v ČR 3

- EDU 3 • ETE 3 • Ostatní jaderná zařízení 3

Jaderná elektrárna 4

- Barbotážní věž 5 • Schéma zařízení jaderné elektrárny s reaktorem typu VVER 5 • Primární okruh 6 • Sekundární okruh 7

Uran a palivový cyklus 3

- Těžba a úprava uranové rudy 3 • Obohacování uranu 8 • Výroba palivové kazety 9 • Po štěpení v reaktoru 10 • Přepřacovací závod 11 • Mezisklad použitého paliva 11 • Hlubinné (konečné) úložiště jaderného odpadu 12

Jaderná bezpečnost 12

- Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí a uskutečněný příklad dané události [T.87] 13

Odkazy 14

Úvod

Zatím jen štěpení těžkých jader

V jaderné energetice je zdrojem energie vazebná energie⁴⁷ v jádrech atomu. Tato energie je uvolňována změnami v jádrech atomu v jaderných reaktorech (štěpení jader atomů⁴⁷), nebo snad v budoucnu i v termonukleárních reaktorech¹ (jaderná syntéza⁴⁷).

Jaderné reaktory

Rozdělení

Jaderný reaktor je zařízení, ve kterém se realizuje řízená štěpná reakce (viz také podkapitola Zrod jaderného reaktoru¹). Dnes se používá několik typů reaktorů, které lze dělit podle různých kritérií (podle použitého chladicího média aktivní zóny⁴⁷ reaktoru, jestli chladivo dosahuje varu či nikoliv, podle typu moderátoru⁴⁷...). Základním kritériem, podle něhož rozdělujeme reaktory na dvě podstatně odlišné skupiny, je energie neutronů v aktivní zóně. Podle tohoto kritéria rozlišujeme reaktory s termickými (pomalými) neutrony⁴⁷ a reaktory pracující s rychlými neutrony. Naprostá většina energetických jaderných reaktorů světa pracuje se spektrem převážně termických neutronů. Říkáme jim proto reaktory pracující na termických neutronech. Každý takový jaderný reaktor musí obsahovat moderátor (reaktory rychlé pracují s rychlými neutrony a moderátor nepotřebují).

Rozdělení podle použitého moderátoru

Podle typu použitého moderátoru pak lze reaktory dělit na lehkovodní (moderátorem i chladivo je „lehká“ voda), grafitové (moderátorem je grafit), těžkovodní (moderátorem je těžká voda). Do kategorie lehkovodních reaktorů patří i tzv. tlakovodní typ reaktorů (anglická zkratka PWR, ruská VVER), viz *Obrázek 77, s. 2* – jedná se o celosvětově nejrozšířenější typ jaderného reaktoru.

Tlakovodní reaktor

Palivové kazety

Palivo v tlakovodním reaktoru je součástí palivové kazety (viz podkapitola *Výroba palivové kazety, s. 9*). Z palivových kazet je sestavena aktivní zóna uvnitř tlakové nádoby reaktoru. Výměna použitého paliva probíhá jednou za rok a půl při odstavení reaktoru. Obvykle se během této odstávky nahradí třetina palivových kazet.

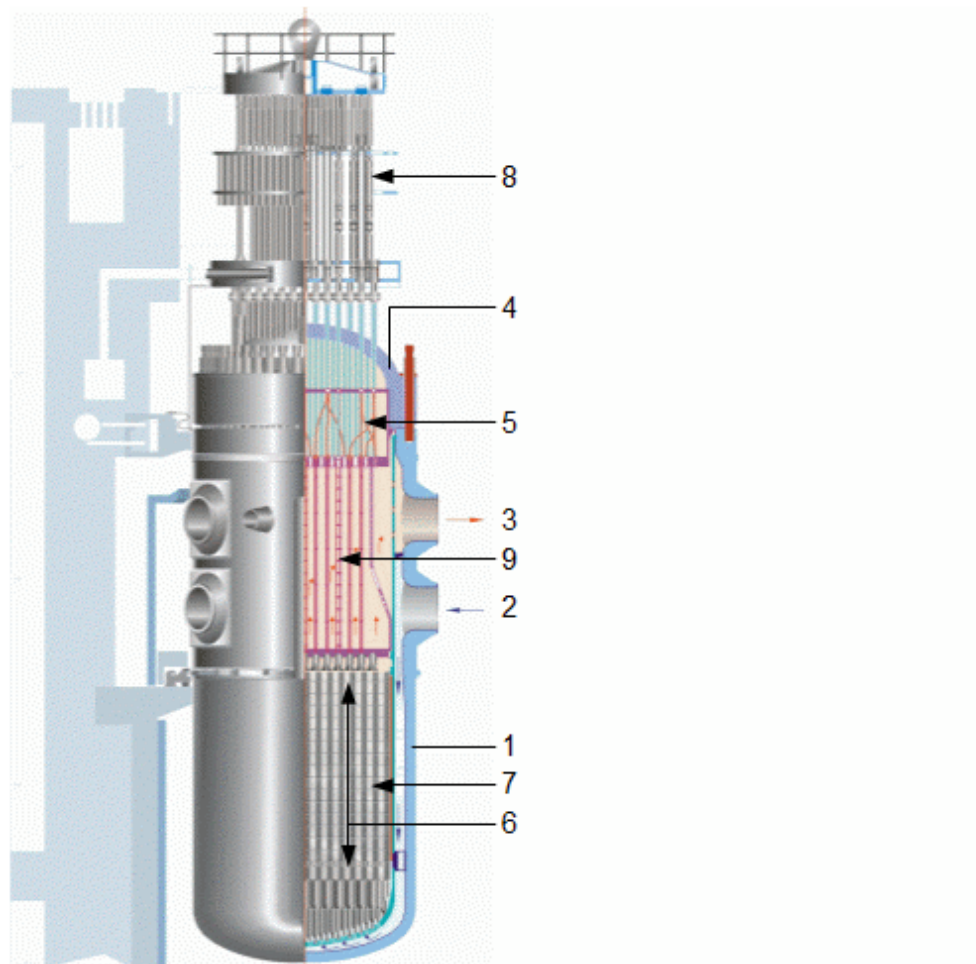
Regulační tyče

Mimo paliva mohou být v aktivní zóně reaktoru přítomny další typy aktivního materiálu ve formě tyčí používané k regulaci výkonu aktivní zóny tzv. regulační tyče. Regulační tyče neobsahují palivo, ale naopak absorbátor v různých koncentracích, podle účelu jejich použití se rozlišují tři typy regulačních tyčí a to tyče kompenzační, řídicí a havarijní.

Kompenzační tyče, reaktivita

Kompenzační tyče obsahují nuklid s vysokým účinným průřezem pro absorpci neutronů⁴⁷. Tyto tyče jsou z počátku do aktivní zóny více zasunuty, aby eliminovaly přebytečnou reaktivitu

77 Jaderný reaktor
VVER 1000
(tlakovodní)



1 tlaková nádoba reaktoru; 2 přívod chladicí vody; 3 odvod ohřáté vody do parogenerátoru; 4 víko tlakové nádoby; 5 vývody vnitroreaktorového měření; 6 rozsah aktivní zóny; 7 palivové a regulační kazety; 8 pohon regulačních tyčí; 9 ochranná trubka regulačních tyčí. Pseudonym autora obrázku: Panther [2], obrázek upraven autorem tohoto článku.

H_3BO_3

(Vzorec 527) a během provozu se postupně vysouvají, když reaktivita klesá v důsledku hromadění produktů štěpení. U tlakovodních reaktorů částečně přebírá roli kompenzačních tyčí kyselina boritá H_3BO_3 přimíchána do chladicí vody. Koncentrace kyseliny borité je ve vodě snižována tak, tak jak se spotřebovává palivo v aktivní zóně.

527 Reaktivita aktivní zóny reaktoru

$$\rho = \frac{k-1}{k}$$

ρ [1] reaktivita; k [-] multiplikační faktor⁴⁷.

Řídící tyče

Řídící tyče upravují okamžité změny výkonu reaktoru způsobené jinými faktory. Tyto tyče reagují na jakoukoliv změnu výkonu a podle okamžité potřeby se do aktivní zóny zasouvají nebo se z ní vysouvají, tím se udržuje stav aktivní zóny $k=1$. Účinnou složkou řídicích tyčí, která absorbuje neutrony je většinou bór ve formě oceli legované bórem, řidčeji kadmium nebo hafnium ve formě slitin.

Havarijní tyče

Havarijní tyče nejsou v aktivní zóně za normálního provozu zasunuty a slouží k okamžitému zastavení štěpné reakce jejich

zasunutím do aktivní zóny při rychlém nárůstu výkonu či jiných závažných poruchách apod. Havarijní tyče mají podobné složení jako řídicí tyče.

Kazety, klastry

U moderních reaktorů typu PWR/VVER přejímají všechny tři výše uvedené funkce zařízení nazývané havarijními a regulačními soubory. Ty mohou mít tvar šestihranných kazet nebo tzv. klastrů. Klastry jsou trubičky v palivovém souboru, ve kterých se pohybují havarijní a regulační tyče, viz *Obrázek 531, s. 10*.

*Meze použitelnosti
Kritická teplota vody*

Teploto vzniklé v aktivní zóně reaktoru je odváděno ve formě ohřáté vody pod vysokým tlakem tak, aby nedošlo k varu chladicí vody (odtud tlakovodní reaktor). Teplota vyrobené páry v tlakovodním jaderném reaktoru nesmí přesáhnout kritickou teplotu vody. Teplota vyrobené páry bývá ale nižší cca 320 °C (obvykle <300 °C), a to z technických (přestup tepla v parogenerátoru) a bezpečnostních důvodů. Na druhou stranu jaderné reaktory mohou být zdrojem tepla o vysokém výkonu.

Výkony reaktorů

Maximální tepelné výkony jaderných reaktorů se pohybují od několik kilowattů (experimentální) přes několik desítek megawattů (lodě, ponorky) až po jednotky GW (elektrárny).

Jaderné elektrárny v ČR

35 %/18 %

V České republice jsou v současnosti dvě jaderné elektrárny a několik dalších jaderných zařízení. V roce 2019 dodaly uvedené dvě elektrárny cca 35 % z celkového množství dodané elektřiny do sítě v ČR přičemž představují pouze cca celkově instalovaného výkonu v ČR [10].

EDU

Kraj Vysočina, čtyři bloky

Jaderná elektrárna Dukovany byla dána do provozu v roce 1985 (dosažení kritického stavu u prvního bloku) a leží v kraji Vysočina v okrese Třebíč. V areálu jsou 4 bloky, respektive jaderné reaktory VVER-440 s celkovým elektrickým výkonem po proběhlých rekonstrukcích 1822 MWe.

ETE

J. Čechy, dva bloky

Jaderná elektrárna Temelín byla dána do provozu v roce 2000. Leží v jihočeském kraji na sever od Českých Budějovic. V areálu jsou 2 bloky, respektive jaderné reaktory VVER-1000 s celkovým elektrickým výkonem 2000 MWe (před rekonstrukcí turbín).

Ostatní jaderná zařízení

VR-1 Vrabc

V České republice jsou mimo jaderných reaktorů v elektrárnách Temelín a Dukovany ještě 2 jaderné reaktory. V Praze při fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT je školní reaktor nazývaný

Vrabc. Je to reaktor bazénového typu s výkonem $0,1$ až 1 kW. Používá uran obohacený na $19,7$ % (pojem obohacování uranu je popsán kapitole *Uran a palivový cyklus*, s. 8). Je zde umožněno vkládat vedle aktivní zóny vzorky k ozařování.

LVR-15

Druhý neelektřárenský reaktor je také lehkovodního typu a je v provozu v Ústavu jaderného výzkumu v Řeži u Prahy. Tento reaktor do roku 2010 pracoval uranem obohaceným na 36 %, ale z legislativních důvodů se od roku 2010 snížilo obohacení na $19,7$ %, [11]. Maximální tepelný výkon reaktoru je 10 MW. Reaktor má řadu ozařovacích kanálů, v nichž tok neutronů dosahuje $10^{17} \dots 10^{18}$ neutronů $m^{-2} \cdot s^{-1}$. Reaktor slouží k výrobě radioaktivních⁴⁷ nuklidů pro diagnostickou a terapeutickou nukleární medicínu a pro ozařovací zařízení v průmyslu, k aktivační analýze a ke studiu problémů reaktorové fyziky [5, s. 216].

Jaderná elektrárna

Areál EDU

Jaderná elektrárna je komplex několika průmyslových budov, kde se zajišťuje provoz elektrárny a nakládání s palivem. Na *Obrázku 528* je celkový pohled na jadernou elektrárnu Dukovany, jejíž zařízení je zde popisováno. Samotný areál JE obsahuje následující provozy: budovy reaktorů a bezprostředně souvisejících provozů (etážerky – jedná se o konstrukce uvnitř budovy reaktoru na nichž jsou umístěny například dozorovny a další technická zařízení, jako jsou různé nádrže apod.), strojovny (zde jsou parní turbosoustrojí a s tím související zařízení), zásobní nádrže demivody, provozní budovy, administrativní budovu, úpravny vody, hasičský útvar, diesel generátorové stanice a naftové hospodářství, budovy aktivních pomocných provozů, zpracování nízko a středně aktivních odpadů, mezisklad použitého paliva, dílny a sklady strojní a stavební údržby, nízkotlaká turbokompresorová stanice a zdroje chladu, čerpací stanice chladicí vody, chladicí věže⁴³, ventilační komíny, úložiště nízkoaktivních odpadů, elektrorozvodny a trafostanice, vrátnice, čistící stanice



528 Celkový pohled na areál jaderné elektrárny Dukovany
Fotografie: [4, 2007].

průmyslové kanalizace. Mimo areál se většinou vyskytují další sklady a napojení na infrastrukturu (napojení na železnici, silnice atd.), parkoviště, ale často i informační centra...

VE Dalešice
Rozvodna Slavětice

K samotné elektrárně jsou přidružené přímo další závody, které nemusí být v bezprostřední blízkosti elektrárny. Především se jedná o zdroje chladicí vody, rozvodny elektřiny, ze které je elektřina z elektrárny distribuována do nadřazené sítě apod. V případě EDU se jedná o přečerpávací elektrárnu⁵² Dalešice (výkon $4 \times 112,5 \text{ MW}$, reverzní Francisovy turbíny, spád 90 m), která je tvořena vodními nádržemi Dalešice a Mohelno sloužící zároveň jako zásobárna vody pro jadernou elektrárnu (chlazení atd.). Za součást EDU můžeme považovat i rozvodnu Slavětice, kde se elektřina z EDU napojuje přímo na celorepublikovou přenosovou soustavu.

Barbotážní věž

Zařízení ke snížení tlaku v reaktorové budově prostřednictvím kondenzace

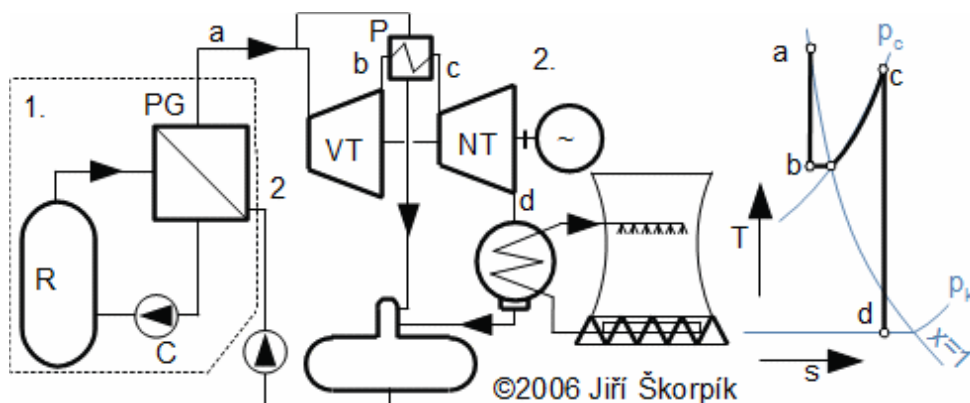
Jedná se o pasivní bezpečnostní prvek pro snížení tlaku na budovu reaktoru při náhlém úniku chladiva reaktoru – barbotážní věž přímo navazuje na reaktorovou budovu, případně je její součástí. Při úniku páry z reaktoru by při průchodu nádržemi se studenou vodou pára kondenzovala a nekondenzující plyny by byly zadrženy ve speciálních prostorech. Kondenzací páry by došlo k podstatnému snížení tlaku působící na stěny budovy reaktoru.

Schéma zařízení jaderné elektrárny s reaktorem typu VVER

Primární okruh
Sekundární okruh

V jaderné elektrárně dochází k transformaci tepla na elektřinu stejným způsobem jako v klasických elektrárnách. Rozdíl je pouze ve způsobu získávání tepla. Schéma zařízení jaderné elektrárny tvoří dva okruhy, a to primární a sekundární okruh, viz *Obrázek 80*. V primárním okruhu obíhá chladicí médium, které chladí reaktor a získané teplo předává v parogenerátoru přes teplosměnnou plochu do okruhu sekundárního, který je tvořen klasickým parním oběhem⁶ a technologiemi k nim náležejícími.

80 Schéma zařízení jaderné elektrárny s reaktorem VVER a expanze v parní turbíně



1. zařízení náležející do primárního okruhu; 2. zařízení náležející do sekundárního okruhu; **R** jaderný reaktor; **C** cirkulační čerpadlo¹¹; **PG** parogenerátor; **P** přihřívák²⁵; **VT**, **NT** vysokotlaké a nízkotlaké díly turbíny. **T** [K] absolutní teplota; **s** [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] měrná entropie⁴³ vody/vodní páry; **x** [-] suchost páry; **p_k** [Pa] tlak kondenzace; **a** sytá pára; **b** mokrá pára (po expanzi); **c** přehřátá pára; **d** mokrá pára.

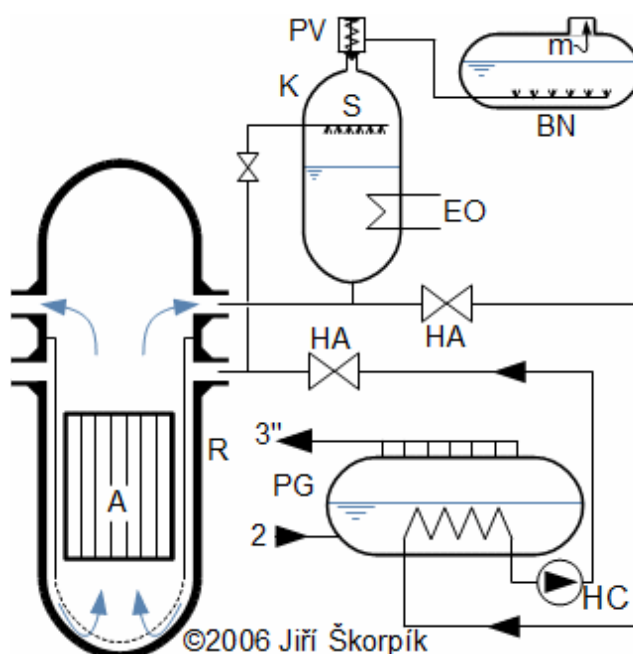
Účinnost

Tepelná účinnost⁴³ jaderných elektráren je přibližně 25 % až 30 % (záleží na typu) bez započítání účinnosti zdroje, která se u jaderných elektráren nezapočítává – v jad. el. Temelín se z 1 kg paliva vyrobí přibližně 350 MWh elektřiny, při vztažení na obsah ^{235}U v palivu, kterého je v palivu 5 % a energie uvolněné při štěpení ^{235}U ⁴⁷ bez započítání tepla z rozpadu produktu štěpení je čistá účinnost bloku přibližně 8,5 %).

Primární okruh*Hlavní části*

Hlavními částmi primárního okruhu jaderného reaktor VVER jsou: jaderný reaktor a 6 chladicích okruhů (smyček), přičemž každá obsahuje cirkulační čerpadlo, parogenerátor + potrubí a armatury (Obrázek 81). Jeden z chladicích okruhů obsahuje také kompenzátor objemu a zařízení pro regulaci koncentrace kyseliny borité v chladicí vodě.

81 Schéma primárního okruhu jaderné elektrárny Dukovany



R reaktor; **A** aktivní zóna; **HC** hlavní cirkulační čerpadlo; **HA** hlavní uzavírací armatura; **K** kompenzátor objemu; **S** sprchy kompenzátoru objemu; **PV** pojišťovací ventil; **BN** barbotážní nádrž; **m** pojistná membrána; **EO** elektroohřívák.

Cirkulace v primárním okruhu

V reaktoru je chladicí voda ohřívána pod teplotu meze sytosti kapaliny (nesmí dojít k varu uvnitř reaktoru). Tato voda cirkuluje mezi parogenerátorem a reaktorem pomocí hlavního cirkulačního čerpadla (zajišťuje cirkulaci chladicího média při stálém tlaku). Ohřáté chladicí médium je odváděno do parogenerátoru, což je povrchový tepelný výměník. V parogenerátoru se přivádí k varu voda sekundárního okruhu, která opouští parogenerátor ve stavu syté páry.

Voda v reaktorech EDU a ETE

Parametry chladicí vody jaderného reaktoru ETE: vstup 290 °C, výstup 320 °C, tlak 15,7 MPa; EDU: vstup 267 °C, výstup 297 °C, tlak 12,25 MPa.

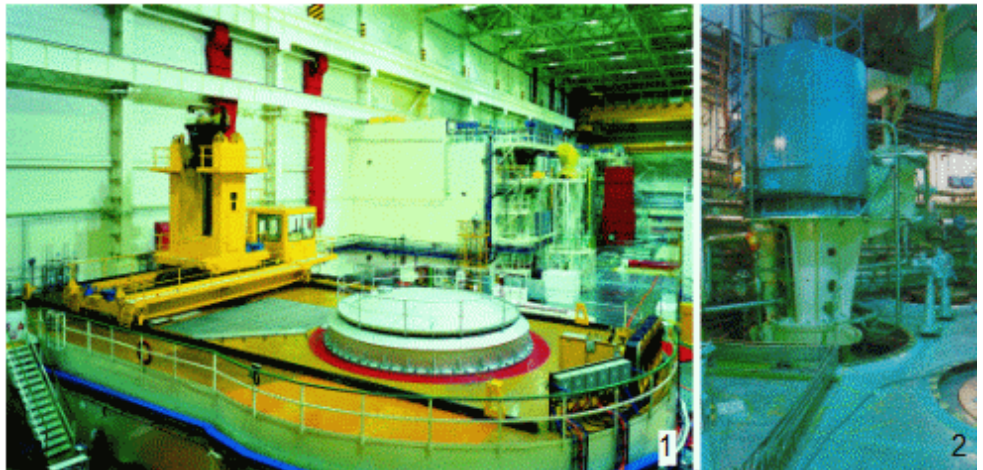
Kompenzátor objemu

Důležitým předpokladem správného chlazení reaktoru je udržování stálého tlaku chladicího okruhu. To se děje pomocí kompenzátoru objemu následujícím způsobem: Kompenzátor objemu je částečně zaplaven vodou a z části sytou párou o stejné teplotě jako má voda v kompenzátoru, respektive teplota syté páry odpovídá tlaku v primárním okruhu. V případě, že by tlak vody stoupal bude stoupat i tlak, ale zároveň i teplota páry, proto se sprchou pustí do kompenzátoru objemu studená voda, tak aby se teplota páry snížila, a tím i tlak na požadovanou hodnotu. Kompenzátor objemu reaguje i na pokles tlaku v primárním okruhu. Při poklesu tlaku totiž hrozí, že chladicí voda v aktivní zóně reaktoru začne vřít. Tím se naruší přestup tepla z paliva na chladicí vodu a hrozí natavení nebo až roztavení aktivní zóny. V takovém případě bude klesat tlak a teplota vody a páry v kompenzátoru objemu. Pro tento případ jsou v kompenzátoru objemu instalovány elektroohřívaky, které ohřejí vodu, a tím se začne uvolňovat pára a opět vzrůstá tlak v celém primárním okruhu.

Barbotážní nádrž

V případě, že tlak v primárním okruhu vzroste nad povolenou mez je otevřen pojistný ventil a část páry z kompenzátoru objemu je vyfouknuta do barbotážní nádrže (barbotážní nádrž je směšovací kondenzátor – pára probublává studenou vodou čímž kondenzuje a zároveň vodu ohřívá kondenzačním teplem). V případě nárůstu tlaku v barbotážní nádrži praskne pojišťovací membrána a část páry z barbotážní nádrže unikne do hermeticky uzavřeného prostoru, ve kterém je nádrž umístěna.

82 Reaktorový sál (1)
jaderné elektrárny
Dukovany a cirkulační
čerpadlo (2)



Fotografie: [4, informační materiál: Jaderná elektrárna Dukovany, A4, 22 stran].

Sekundární okruh*Expanze v turbíně*

V sekundárním okruhu je zařazena parní turbína, ve které expanduje sytá pára, respektive mírně přehřátá o několik stupňů Celsia. Při expanzi syté páry z tak vysokého tlaku by pára na konci turbíny měla nízkou suchost páry, proto je expanze páry rozdělena na dvě části, viz *Obrázek 80, s. 5*. Pára nejdříve o stavu sytosti a vstupuje do vysokotlaké dílu turbíny, kde expanduje do tlaku p_c .

Z vysokotlakého dílu turbíny neproudí pára do dalších dílů turbíny přímo, ale přes přehřívák, kde se její teplota zvýší téměř na teplotu páry v parogenerátoru, tedy při tlaku p_c bude výrazně přehřátá. Ještě před přehřívákem je ale separátoru vlhkosti z proudu páry. Další dílech turbíny pára expanduje do tlaku v kondenzátoru.

Pára v EDU a ETE

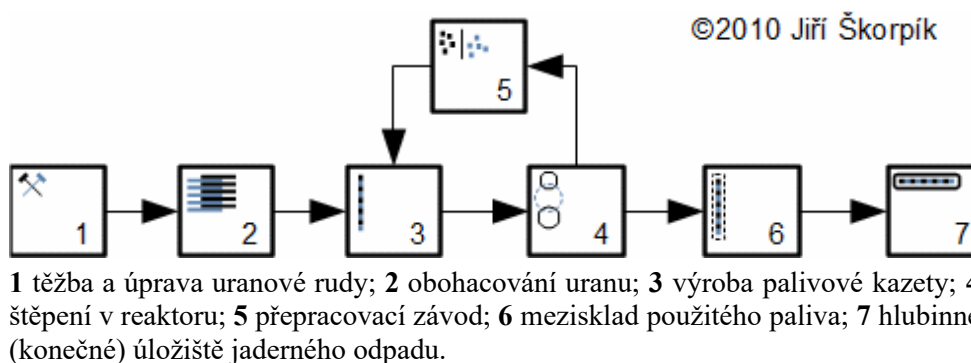
Parametry páry na výstupu z parogenerátoru v ETE: 278,5 °C při tlaku 6,3 MPa; v EDU 4,61 MPa při teplotě 260 °C.

Uran a palivový cyklus

Technologicky náročný proces s radioaktivním odpadem na konci

Energie obsažená v jednom kilogramu uranu je sice ohromná, ale získat kilogram uranu ve formě vhodné pro jaderný reaktor je technologicky složitý a drahý proces, navíc při štěpení uranu ^{235}U vznikají v aktivní zóně reaktoru radionuklidy⁴⁷, proto použité palivo nelze jednoduše zneškodnit přírodní cestou, pouze recyklovat (přepřacovat) nebo trvale uložit na bezpečné místo. Proces od těžby uranové rudy přes použití vytěženého uranu v reaktoru až po jeho recyklaci či uložení se nazývá palivový cyklus, viz *Obrázek 83*.

83 Schéma palivového cyklu



Těžba a úprava uranové rudy

Přírodní uran

Uran se těží obvykle klasickým hornickým způsobem. Přesněji těží se uranová ruda (*Obrázek 529*), ze které se dalšími úpravami separuje uran (například loužením) tzv. přírodní uran.

Dolní Rožínka

V ČR byl uzavřen poslední důl na uranovou rudu v Dolní Rožínce v roce 2017. Úprava uranové rudy, která probíhala v MAPE Mydlovary nese sebou velkou ekologickou zátěž – laguny toxického a radioaktivního odpadu, které vznikly při loužení dodnes zůstávají na místě. Podle některých zdrojů došlo i ke kontaminaci místních podzemních vod.

Obohacování uranu

^{235}U

Pro některé reaktory (včetně lehkovodních reaktorů) je potřebná koncentrace izotopu ^{235}U v palivu vyšší, než je v přírodním uranu. Zvyšování koncentrace jednoho izotopu uranu v palivu na úkor

529 Úlomek uranové rudy



Koncentrace uranu v uranové rudě závisí na nalezišti. Chudá rudná žíla obsahuje jen asi 2 až 3 g uranu na tunu rudy, bohaté rudné žíly obsahují od 10 do 30 kg uranu na tunu rudy [6]. Přírodní uran je složen z izotopu ^{238}U (tvoří 99,282 % hmotnosti), izotopu ^{235}U (tvoří 0,712 % hmotnosti) a izotopu ^{234}U (tvoří 0,006 % hmotnosti) [7, s. 21]. Obrázek [4, informační materiál: Vyhořelé jaderné palivo ve světě, A4, 23 stran].

jiného je možné, buď oddělováním nežádoucích izotopů nebo obohacování/přidáváním požadovaného izotopu [7, s. 21].

UF_6

Obohacování je velmi složitý a finančně náročný technologický proces. Obohacování se provádí v obohacovacích závodech, které jsou pouze ve státech, které mají velkou spotřebu jaderného paliva, jako jsou USA, Německo, Rusko, Japonsko a další. Před obohacováním musí být původní uranová ruda přeměněna kombinací chemických a fyzikálních metod na uranový koncentrát zvaný „žlutý koláč“ (jak již název napovídá jedná se o jasně žlutou hmotu). Z něj je během dalšího zpracování získán UF_6 (fluorid uranový). Tento fluorid má vhodné mechanické vlastnosti pro obohacování, na druhou stranu je vysoce toxický a silně korozivní.

Obohacený uran
 UO_2
Palivové tablety
Palivový proutek

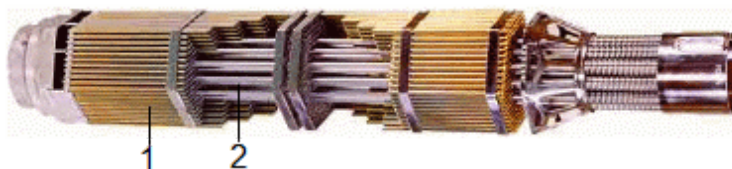
Obohacování se provádí například plynou difúzí, odstřediváním a nebo nejmoderněji pomocí laseru [3] – obohacený přírodní uran obsahuje 95 % izotopu ^{238}U a až 5 % ^{235}U . Poté se obohacené palivo ve formě oxidu uraničitého UO_2 lisuje a spéká do palivové tablety o průměru cca 1 cm a výšce 1 až 9 cm podle typu reaktorů, pro které jsou určeny (jsou hnědé barvy). Tyto tablety se na sebe skládají v trubičce ze slitiny zirkonia, přičemž mezi stěnou trubičky a tabletami je mezera vyplněná heliem. Tyto trubičky se hermeticky uzavřou a vznikne palivový proutek.

Výroba palivové kazety

Specifika výroby,
strojírenský produkt

Výroba palivové kazety může probíhat mimo obohacovací závod z dodaných palivových proutků, viz *Obrázek 531, s. 10*. Výroba palivové kazety je přesný, přesto nepříliš složitý strojírenský proces a tyto závody jsou ve více státech (například ve Švédsku). Materiál palivové kazety je opět slitina zirkonia a nebo i z nerezové austenitické oceli.

531 Palivová kazeta
pro VVER 1000 od
firmy TVEL



1 palivové proutky (312 ks); 2 trubičky pro klastrovou regulaci. Hmotnost kazety: 681 kg, délka kazety: 4 570 mm. Obrázek [8].

Po štěpení v reaktoru

Životnost paliva

Palivová kazeta vydrží podle typu reaktoru přibližně 4 roky v provozu, než klesne koncentrace izotopu ^{235}U pod požadované minimální množství, kdy obsahuje 1 % ^{235}U , 1 % Pu, 3 % štěpných produktů a asi 95 % neškodného ^{238}U . Tedy na rozdíl od čerstvého paliva, které je prakticky neradioaktivní, je z něj vysoce radioaktivní odpad.

*Použité palivo
Bazén*

V použitém palivu probíhá přirozený radioaktivní rozpad (ionizující záření a teplo) především produktů vzniklých při štěpení. Je tedy nutné použité palivové proutky chladit a zároveň chránit okolí před ionizujícím zářením. Proto se nejdříve použité palivové kazety ukládají hned vedle reaktoru do bazénu s vodou po dobu několika let (Obrázek 532), dokud jejich aktivita⁴⁷ podstatně neklesne. Někdy bývá použité palivo vedle reaktoru skladováno po celou dobu životnosti elektrárny.

*Ionizující záření
Chlazení
Tritium*

Uložení použitého paliva ve vodě se provádí z důvodu nutnosti zachycovat ionizující záření⁴⁷ a jiné radioaktivní částičky uvolňované použitým palivem a tím chránit okolí před škodlivými vlivy použitého paliva. Voda také plní funkci chladicí. Radioaktivní částičky jsou z vody později odfiltrovávány a zbylá voda je ředěná s „čistou vodou“, aby mohla být vypuštěna zpět do přírody (i když je voda zbavena radioaktivních částiček, tak obsahuje radioaktivní tritium, které vzniká vlivem neutronového záření z použitého paliva, proto se voda musí nejdříve zředit s nekontaminovanou vodou, než je vypuštěna).

532 Zavážecí stroj nad
reaktorem v EDU



Vpravo bazén použitého paliva a šachta pro manipulační kontejnery s čerstvým palivem. Zavážecí stroj slouží k manipulaci s palivovými kazetami v bezprostřední blízkosti reaktoru a v reaktoru. Fotografie: [4, informační materiál: Jaderná elektrárna Dukovany, A4, 22 stran].

Přepřacovací závod*Separace izotopů*

Použité jaderné palivo stále obsahuje štěpitelné izotopy (^{235}U a ^{238}U). Proto se někdy podrobuje přepracování. K tomu je třeba odstranit produkty štěpení. Tento proces je vzhledem k radiaci a dalším faktorům spojených s oddělením štěpných produktů od izotopů ^{235}U a ^{238}U velice obtížný a nákladný. I dnes je tento proces nákladnější než vytěžit a obohatit přírodní uran. Při manipulaci s tímto materiálem může být použito jen robotů a dálkově ovládaných manipulátorů.

Jaderné zbraně

Přepřacovacích závodů je méně než obohacovacích. To je dáno i politickým rozhodnutím. Přepřacovací závod dokáže separovat produkty štěpení z použitého paliva (především uran ^{235}U a plutonium), které mohou být použity pro výrobu jaderných zbraní.

MOX

Plutonium z přepracovacího závodu se ale také používá jako palivo typu MOX (mixed oxide fuel) pro jaderné reaktory. Jedná se o kombinaci přírodního uranu ve formě jeho oxidu UO_2 a plutonia ve formě PuO_2 . Množství PuO_2 se v takové směsi pohybuje od 1 až 7 % podle typu chlazení reaktoru a až 30 % u reaktorů s rychlými neutrony. Palivo MOX je významným palivem v Japonsku, které nemá vlastní zásoby přírodního uranu a snaha o samostatnost a technologický náskok ospravedlňuje vyšší náklady na separaci Pu z použitého paliva (3. blok jaderné elektrárny Fukušima I používal právě toto palivo [12, s. 18]). Palivo MOX s nízkým obsahem PuO_2 má podobné vlastnosti jako palivo s obohaceným uranem.

Mezisklad použitého paliva*Zamezení kontaminace okolí*

Použité palivo musí být bezpečně odděleno od životního prostředí (nebezpečí úniku ionizujícího záření a případně únik radioaktivních částic do okolí) a zároveň musí být chlazen, jinak může dojít k jeho roztavení a výpary mohou kontaminovat okolí radioaktivními částicemi. V meziskladu použitého paliva se skladuje použité palivo po dobu několika desítek let.

Suché, mokré

Podle metody chlazení paliva se mezisklady rozdělují na suché (chlazení vzduchem) a mokré (chlazení vodou – bazén). Prvním meziskladem použitého paliva je bazén vedle reaktoru.

Jiné radioaktivní látky

Ve skladech použitého paliva se skladuje nejen použité palivo, ale i jiné radioaktivní látky a látky kontaminované radionuklidy, které vznikly při provozu elektrárny (použité součástky a přístroje, ochranné pomůcky atd.). Radioaktivní látky rozdělujeme na nízko, středně a vysokoradioaktivní. Nízko a středně aktivní odpady se dělí na krátkodobé, které mají poločas přeměny kratší než 30 let a aktivita^{47.} zdrojů alfa záření^{47.} dosahuje max. $4000 \text{ kBq}\cdot\text{kg}^{-1}$ a na dlouhodobé. Vysoko aktivní odpady jsou definovány jako ty, které vyvíjejí teplo.

Suchý mezisklad

V ČR je zatím pouze jeden suchý mezisklad použitého jaderného paliva, který je umístěn v areálu EDU. Použité palivové

kazety jsou nejdříve uloženy ve speciálních bezpečnostních kontejnerech (*Obrázek 533*), které chrání kazety před mechanickým poškozením. Celý sklad je neustále chlazen cirkulujícím vzduchem proudícím mezi kontejnery.

533 Suchý mezisklad použitého paliva v areálu jaderné elektrárny Dukovany, [4]



Hlubinné (konečné) úložiště jaderného odpadu

100 000 let

Tento typ skladu musí dokázat uchovat bezpečně radioaktivní odpad po dobu až *100 000 let* dokud radioaktivní pozadí jeho obsahu nebude rovno přirozenému pozadí. V současnosti se taková úložiště teprve budují, viz *Obrázek 534*.

534 Pohled na hlubinné úložiště jaderného odpadu u jaderné elektrárny Forsmark (Švédsko)



Nachází se *1,5 km* od pobřeží a samotné úložiště je *80 m* pode dnem Baltského moře v granitových horninách. V blízkosti úložiště je i stejnojmenná jaderná elektrárna (na obrázku v pozadí). Obrázek: [1].

Pouze vodě nepropustný masiv

Hlubinné úložiště musí být v horninovém nebo jílovém masívu, aby jím nemohla prosakovat voda. Musí být také v geologicky klidné lokalitě [13].

Jaderná bezpečnost

Ochrana okolí

Každé jaderné zařízení může své okolí kontaminovat nežádoucími chemickými reakcemi a ionizujícím zářením [9] ve formě rozptýleného chemicky aktivního a radioaktivního materiálu, proto musí být vybaveno několika nezávislými ochranami, které zabrání

nebo podstatně omezí možný únik těchto látek mimo jejich pracovní prostor do okolí během řádného provozu i havárie. Tyto ochrany mohou být aktivní (různé absorpční a kondenzační zařízení..) a pasivní (ochranná obálka budovy, kontejnery...).

MAAE
Stupnice

Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE, anglicky: International Atomic Energy Agency, zkráceně IAEA) přijala, a v roce 1991 zavedla, mezinárodní stupnici pro hodnocení jaderných nehod, viz *Tabulka 87*. Stupnice má sloužit především k rychlému a srozumitelnému informování veřejnosti o závažnosti nehod. Nenahrazuje povinnost provozovatele provést důkladný rozbor příčin a následků událostí.

**87 Mezinárodní
stupnice pro hodnocení
jaderných událostí a
uskutečněný příklad
dané události**

0 Událost pod stupnicí (zero level-below scale)	Situace při kterých nejsou překročeny provozní limity a podmínky, a které jsou bezpečně zvládnuty vhodnými postupy.	
1 Odchyška (anomaly)	Funkční nebo provozní odchyšky od ústředně povolených limitů. Poruchy nepředstavující žádné bezpečnostní riziko, ale odhalují nedostatky bezpečnostních zařízení.	
2 Porucha (incident)	Technické poruchy nebo odchyšky, které neovlivňují bezpečnost elektrárny přímo nebo bezprostředně. Neovlivňuje bezpečnost elektrárny, ale vede ke zdokonalení bezpečnostních opatření.	Mihama 1991 (Japonsko)
3 Vážná porucha (serious incident)	Ozáření personálu nad normu (dávky překračují 50 mSv), nepatrný únik radioaktivity do okolí. Únik radioaktivních částic mimo elektrárnu nad povolené limity. Následkem je individuální dávka pro nejzasaženější skupinu obyvatel v okolí elektrárny řádově desetiny mSv. Všechny poruchy, při kterých by další selhání bezpečnostních systémů mohlo vést k havárii.	Forsmark 2006 (Švédsko)
4 Havárie s účinky v jaderném zařízení (accident mainly in installation)	Částečné poškození aktivní zóny, ozáření personálu. Ozáření obyvatel na hranici limitu.	Bohunice-A1 1977 (ČSSR)
5 Havárie s účinky na okolí (accident with offsite risk)	Vážnější poškození aktivní zóny. Únik radionuklidů (100 až 1000 TBq jódu 131 nebo jiných podobně významných radionuklidů) mimo elektrárnu. Nutnost částečné evakuace okolí.	Three Mile Island 1979 (USA)
6 Závažná havárie (serious accident)	Únik radionuklidů (1 000 až 10 000 TBq jódu 131 nebo jiných podobně významných radionuklidů) mimo elektrárnu. Nutnost využití havarijních plánů k ochraně okolí.	
7 Velká havárie (major accident)	Únik radionuklidů (více jak 10 000 TBq jódu 131 nebo jiných podobně významných radionuklidů) mimo elektrárnu na velké území. Okamžité zdravotní následky. Poškození životního prostředí.	Černobyl 1986 (SSSR) Fukušima I 2011 (Japonsko)

Odkazy

- [1] *Forsmark – jaderná elektrárna*, [2010]. Švédsko. Dostupné z <http://www.Forsmark.com> – stránka je přesměrována na stránky společnosti Vattenfall, která elektrárnu provozuje.
- [2] *Wikimedia Commons* – úložiště volného multimediálního obsahu. [on-line]. [2010]. Dostupné z <http://commons.wikimedia.org>.
- [3] Autor neuveden. *Laserové obohacování uranu poprvé komerčně, Česká nukleární společnost, 2007.* [on-line], Dostupné z <http://www.csvts.cz/cns/news07/071025c.htm>.
- [4] *ČEZ, a.s.*, 2011. Majitel a provozovatel elektráren. Adresa: Praha 4, Duhová 2/1444, PSČ 140 53, Česká republika, <http://www.cez.cz>.
- [5] HÁLA, Jiří. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*, 1998. 1. vydání. Brno: KONVOJ, ISBN 80-85615-56-8.
- [6] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Energie a globální oteplování – Země v proměnách při opatřování energie*, 2006. 1. vydání. Brno: VUTIUM, ISBN 80-214-2919-4.
- [7] NĚSTĚRENKO, G., SOBOLEV, A., SUŠKOV, J. *Atomová letadla*, 1959. Vydání první. Praha. Naše vojsko, z ruského originálu Primeněnije atomonych dvigatělej v aviaciji.
- [8] *TVEL Fuel Company*, [2010]. Výrobce paliva pro jaderné reaktory. Rusko. Dostupné z <http://www.tvel.ru>.
- [9] MOYER, Michael. FÚZE: Falešný úsvit, *Scientific American*, 2012, srpen. České vydání. Praha: Espero publishing, s.r.o.
- [10] *Energetický regulační úřad*. Web: <http://www.eru.cz>.
- [11] Autor neuveden. *Reaktor LVR-15*. Web Centrum výzkumu Řež s.r.o. <http://reaktory.cvrez.cz/>.
- [12] WAGNER, Vladimír. *Fukušima I poté*. Praha: Novela bohémica, 2015. ISBN 978-80-87683-45-3.
- [13] MAREK, Jiří. Jsou radioaktivní odpady limitujícím faktorem rozvoje jaderné energetiky?, *All for power*, 02/2020. Praha: AF POWER agency, a.s., ISSN 1802–8535.

Bibliografická citace článku

ŠKORPÍK, Jiří. Jaderná energetika, *Transformační technologie*, 2006-12, [date od last update 2020-11-10]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/09.html>.