
JADERNÁ ENERGETIKA

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

Úvod 3

Jaderné reaktory 3

Tlakovodní reaktor 3

Jaderné elektrárny v ČR 5

EDU 5

ETE 5

Ostatní štěpné reaktory 6

Jaderná elektrárna 6

Barbotážní věž 7

Schéma zařízení jaderné elektrárny s reaktorem typu

VVER 7

Primární okruh 8

Sekundární okruh 10

Uran a palivový cyklus 10

Těžba a úprava uranové rudy 11

Obohacování uranu 11

Výroba palivové kazety 12

Po štěpení v reaktoru 12

Přepřacovací závod 13

Mezisklad použitého jaderného paliva 14

Hlubinné (konečné) úložiště radioaktivního

odpadu 15

Jaderná bezpečnost 16

TABULKA: Mezinárodní stupnice pro hodnocení

jaderných událostí a uskutečněný příklad dané

události 16

Odkazy 17

Článek z on-line pokračujícího zdroje Transformační technologie.

ISSN 1804-8293; www.transformacni-technologie.cz

Copyright©Jiří Škorpík, 2006-2022.

All rights reserved.

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou.

Úvod

V jaderné energetice je zdrojem energie vazebná energie v jádrech atomu. Tato energie je uvolňována změnami v jádrech atomu v jaderných reaktorech (štěpení jader atomů), nebo snad v budoucnu i v termonukleárních reaktorech (jaderná syntéza) [Škorpík, 2022].

Jaderné reaktory

*Aktivní zóna •
Termické neutrony •
Rychlé neutrony*

Jaderný reaktor je zařízení, ve kterém se realizuje řízená štěpná reakce. Dnes se používá několik typů reaktorů, které lze dělit podle různých kritérií (podle použitého chladicího média aktivní zóny reaktoru, jestli chladivo dosahuje varu či nikoliv, podle typu moderátoru...). 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) neutrony 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).

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 1** – jedná se o celosvětově nejrozšířenější typ jaderného reaktoru.

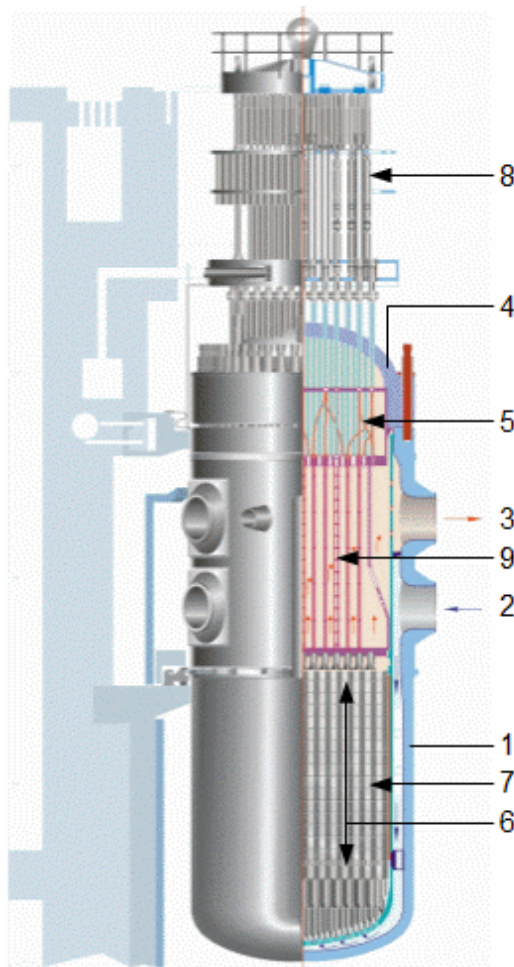
Tlakovodní reaktor

*Palivové kazety •
Regulační tyče •
Kompenzační tyče •
Reaktivita • H_3BO_3 •
Řídicí tyče • Havarijní tyče • Kazety • klastry*

Palivo v tlakovodním reaktoru je součástí šestihranné palivové kazety. 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.

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.

1:



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. Obrázek: [Wikimedia Commons], pseudonym autora Panther, obrázek upraven autorem.

Kompenzační tyče obsahují nuklid s vysokým účinným průřezem pro absorpci neutronů. Tyto tyče jsou z počátku do aktivní zóny více zasunuty, aby eliminovaly přebytečnou reaktivitu (**Vzorec 2**) 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.

2:

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

Reaktivita aktivní zóny reaktoru

ρ [1] reaktivita; k [1] multiplikační faktor [Škorpík, 2022].

Pomocí řídicích tyčí je upravována okamžitá změny výkonu reaktoru. Tyto tyče reagují na jakoukoliv změnu výkonu a podle okamžité potřeby se do aktivní zóny zasouvají nebo se z ní

vysunují, 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 nejsou v aktivní zóně za normálního provozu zasunuty a slouží k okamžitému zastavení štepné reakce jejich zasunutím do aktivní zóny při rychlém nárůstu výkonu či jiných závažných poruchách apod. Havarijní tyče mají podobné složení jako řídicí tyče.

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 9**.

Teplo 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.

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

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 18% celkově instalovaného výkonu v ČR [ERU].

EDU

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

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 MW (před rekonstrukcí turbín).

Ostatní štěpné reaktory

VR-1 Vrabec • LVR-15

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 (Praha 8) je školní reaktor nazývaný

Druhý neelektrárenský 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 %, [Řež s.r.o.]. Maximální tepelný výkon reaktoru je 10 MW. Reaktor má řadu ozařovacích kanálů, v nichž tok neutronů dosahuje $10^{17} \dots 10^{18}$ neutronů $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Reaktor slouží k výrobě radioaktivních nuklidů pro diagnostickou a terapeutickou nukleární medicínu a pro ozařovací zařízení v průmyslu, k aktivizační analýze a ke studiu problémů reaktorové fyziky [Hála, 1998, s. 216].

Jaderná elektrárna

*Mezisklad použitého
jaderného paliva • VE
Dalešice • Rozvodna
Slavětice*

Jaderná elektrárna je komplex několika průmyslových budov, kde se zajišťuje provoz elektrárny a nakládání s palivem. Na **Obrázku 3** 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 jaderného paliva, dílny a sklady strojní a stavební údržby, nízkotlaká turbokompresorová stanice a zdroje chladu, čerpací stanice chladicí vody, chladicí věže, ventilační komíny, úložiště nízkoaktivních odpadů, elektrorozvodny a trafostanice, vrátnice, čistící stanice průmyslové kanalizace. Mimo areál JE, se většinou vyskytují další sklady a napojení na infrastrukturu (napojení na železnici, silnice atd.), parkoviště, ale často i informační centra...

3:



Celkový pohled na areál jaderné elektrárny Dukovany
Fotografie: [ČEZ, a.s., 2007].

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 elektrárnu Dalešice (výkon 4x112,5 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

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

*Parní oběh •
Parogenerátor*

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 4**. 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 oběhem a technologiemi k nim náležejícími.

4:

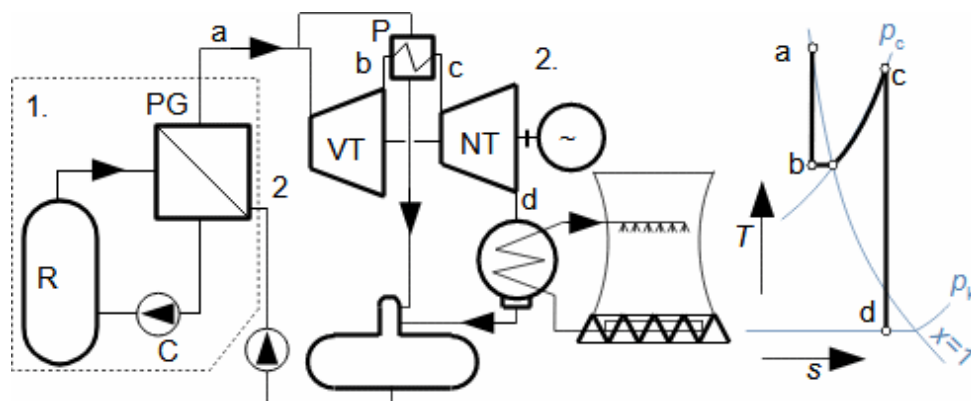


Schéma zařízení jaderné elektrárny s reaktorem VVER a expanze v parní turbíně
1. zařízení náležející do primárního okruhu; **2.** zařízení náležející do sekundárního okruhu; **R** jaderný reaktor; **C** cirkulační čerpadlo; **PG** parogenerátor; **P** přehřívák; **VT**, **NT** vysokotlaké a nízkotlaké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

Tepelná účinnost 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 je čistá účinnost bloku přibližně 8,5 %).

Primární okruh

Kompenzátor objemu •
 Barbotážní nádrž

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 5**). Jeden z chladicích okruhů obsahuje také kompenzátor objemu a zařízení pro regulaci koncentrace kyseliny borité v chladicí vodě.

5:

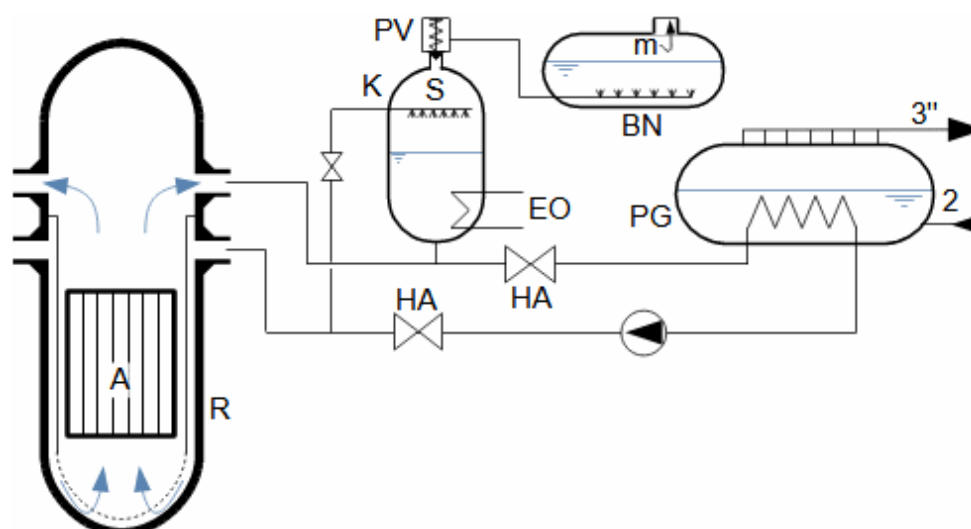
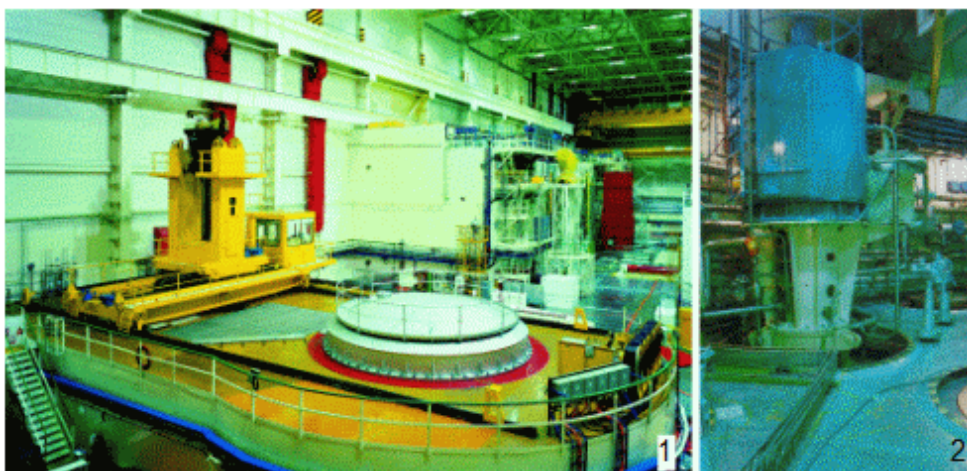


Schéma primárního okruhu jaderné elektrárny Dukovany
R reaktor; **A** aktivní zóna; **HC** hlavní cirkulační čerpadlo; **HA** hlavní uzavírací armatura; **K** kompenzátor objemu; **S** sprchy kompenzátoru objemu; **PV** pojišťovací ventil; **BN** barbotážní nádrž; **m** pojistná membrána; **EO** elektroohřívák.

V reaktoru je chladicí voda ohřata 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.

6:



Reaktorový sál (1) jaderné elektrárny Dukovany a cirkulační čerpadlo (2). [ČEZ, a.s.]

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.

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.

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.

Sekundární okruh

Přihřívání

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 4**. 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 přihřívák, kde se její teplota zvýší téměř na teplotu páry v parogenerátoru, tedy při tlaku p_c bude výrazně přehřátá. Ještě před přihřívákem je ale separátoru vlhkosti z proudu páry. Dalších dílech turbíny pára expanduje do tlaku p_c v kondenzátoru.

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

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 radionuklidy [Škorpík, 2022], proto použité palivo nelze jednoduše zneškodnit přírodní cestou, pouze recyklovat (přepřacovat) nebo trvale uložit na

7:

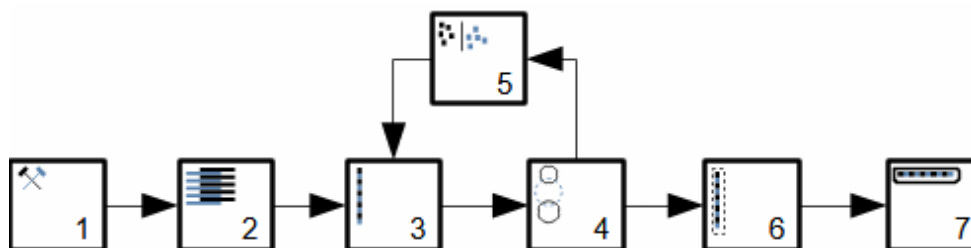


Schéma palivového cyklu

1 těžba a úprava uranové rudy; 2 obohacování uranu; 3 výroba palivové kazety; 4 štěpení v reaktoru; 5 přepracovací závod; 6 mezisklad použitého jaderného paliva; 7 Hlubinné (konečné) úložiště radioaktivního odpadu.

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 7**.

Těžba a úprava uranové rudy

Přírodní uran • Dolní Rožínka

Uran se těží obvykle klasickým hornickým způsobem. Přesněji těží se uranová ruda (**Obrázek 8**), ze které se dalšími úpravami separuje (například loužením) tzv. přírodní uran. 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 [Kadrnožka, 2006]. Naproti tomu samotný 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) [Něstěrenko, 1959, s. 21].

8:



Úlomek uranové rudy [ČEZ, a.s.].

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.

Obohacování uranu

UF_6 • UO_2 • Palivové tablety • Palivový proutek

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 jiného je možné, buď oddělováním nežádoucích izotopů nebo obohacování/přidáváním požadovaného izotopu [Něstěrenko, 1959, s. 21].

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.

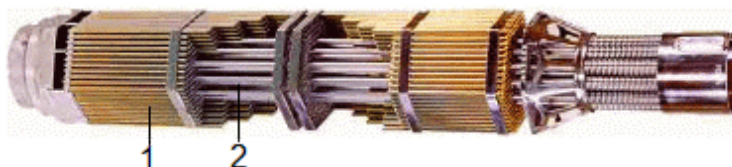
Obohacování se provádí například plynou difuzí, odstřediváním a nebo nejmoderněji pomocí laseru [csvts.cz, 2007] – obohacený přírodní uran obsahuje 95 % izotopu ^{238}U a až 5 % ^{235}U . Poté se obohacené palivo ve formě oxidu uraničitého UO_2 lisuje a spéká do palivové tablety o průměru cca 1 cm a 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

Palivový proutek

Výroba palivové kazety může probíhat mimo obohacovací závod z dodaných palivových proutků, viz **Obrázek 9**. Výroba palivové kazety je přesný, přesto nepřiliš 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.

9:



Palivová kazeta pro VVER 1000 od firmy TVEL

1 palivové proutky (312 ks); 2 trubičky pro klastrovou regulaci. Hmotnost kazety: 681 kg, délka kazety: 4570 mm. Obrázek [TVEL Fuel Company, 2010].

Po štěpení v reaktoru

*^{235}U • ^{238}U • Pu •
ionizující záření*

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.

V použitém palivu probíhají přirozené radioaktivní přeměny především produktů vzniklých při štěpení. Je tedy nutné použité palivové proutky chladit a zároveň chránit okolí před ionizujícím zářením a částicemi paliva uvolňovanými z kazet. Proto se nejdříve použité palivové kazety ukládají hned vedle reaktoru do

bazénu (**Obrázek 10**) s vodou po dobu několika let (aktivita podstatně neklesne. Během skladování jsou uvolňované částičky požitého paliva z vody odfiltrovávány a zbylá voda je ředěná s „čistou vodou“, aby mohla být vypuštěna zpět do přírody (kapalná frakce vodu obsahuje radioaktivní tritium, které vzniká vlivem neutronového záření z použitého paliva, proto se voda musí nejdříve zředit s nekontaminovanou vodou, než je vypuštěna). Někdy bývá použité palivo vedle reaktoru skladováno po celou dobu životnosti elektrárny.

10:



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. [ČEZ, a.s.]

Přepřacovací závod

235U • 238U • MOX

Použité jaderné palivo stále obsahuje štěpitelné izotopy (235U a 238U). Proto se někdy podrobuje přepřacování. K tomu je třeba odstranit produkty štěpení. Tento proces je vzhledem k radiaci a dalším faktorům spojených s oddělením štěpných produktů od izotopů 235U a 238U 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.

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

Plutonium z přepřacovacího 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 [Wagner, 2015, s. 18]). Palivo MOX s nízkým obsahem PuO_2 má podobné vlastnosti jako palivo s obohaceným uranem.

Mezisklad použitého jaderného paliva

Aktivita • α záření

Použité palivo musí být bezpečně odděleno od životního prostředí (nebezpečí úniku ionizujícího záření a případně únik radioaktivních částic do okolí) a zároveň musí být chlazeno, 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, dokud se nesníží jeho aktivita tak, aby mohlo být trvale (bez nutného chlazení) uloženo.

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

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 zdrojů α záření dosahuje max. $4 \text{ MBq} \cdot \text{kg}^{-1}$ a na dlouhodobé. Vysoce aktivní odpady jsou definovány jako ty, které vyvíjejí teplo.

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 11**), které chrání kazety před mechanickým poškozením. Celý sklad je neustále chlazen cirkulujícím vzduchem proudícím mezi kontejnery. V areálu je také úložiště nízko a středně radioaktivních odpadů, které je ve vlastnictví státu.

11:



Suchý mezisklad použitého jaderného paliva v areálu jaderné elektrárny Dukovany. [ČEZ, a.s.]

**Hlubinné (konečné)
úložiště
radioaktivního
odpadu**

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 12**, respektive naplňují.

12:



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). [Forsmark].

Hlubiné uložení musí být v horninovém nebo jílovém masívu, aby jím nemohla prosakovat voda. Musí být také v geologicky klidné lokalitě [Marek, 2020].

Významným problémem hlubinného uložení je také jeho označení tak, aby i budoucí generace pochopili, že na uvedeném místě se nachází radioaktivní odpad. Po naplnění konečného uložení bude tento prostor zcela opuštěn, a tím i v podstatě končí jakékoliv závazky původních majitelů odpadu vůči okolí. například z toho důvodu bude kolem hlubinného uložení WIPP (waste isolation pilot projekt) v Novém Mexiku zbudováno několik žulových sloupů a přímo nad uloženi mohyla ze zeminy s komorou uvnitř, opět ohraničenou masivními žulovými sloupy a s napsaným Zakaz vstupu + informace o uloženi. Navíc informace o uloženi bude v archivech po celém světě. Naopak okolí Finského uloženi Onkalo bude navraceno do původního stavu (borový les), bez sebemenší připomínky co pod povrchem leží [Anon., 2021].

Jaderná bezpečnost

Úřad pro jadernou
bezpečnost •
MAAE(International
Atomic Energy Agency)
stupnice

Každé jaderné zařízení může své okolí kontaminovat nežádoucími chemickými reakcemi a ionizujícím zářením [Moyer, 2012] ve formě rozptýleného chemicky aktivního a radioaktivního materiálu, proto musí být vybaveno několika

- 13:** 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 Odchylka (anomaly)	Funkční nebo provozní odchylky od ústředně povolených limitů. Poruchy nepředstavující žádné bezpečnostní riziko, ale odhalují nedostatky bezpečnostních zařízení.	
2 Porucha (incident)	Technické poruchy nebo odchylky, 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)

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...). V České republice má na starost dozor nad jadernou bezpečností, vystavování povolení a návrh předpisů/zákonů Úřad pro jadernou bezpečnost (<https://www.sujb.cz/>).

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 13**. Stupnice má sloužit především k rychlému a srozumitelnému informování veřejnosti o závažnosti nehod. Nenahrazuje povinnost provozovatele provést důkladný rozbor příčin a následků událostí.

Odkazy

- ŠKORPÍK, Jiří, 2022, Úvod do světa atomů a molekul, *Transformační technologie*, Brno, [on-line], ISSN 1804-8293. Dostupné z https://www.transformacni-technologie.cz/uvod-do-sveta-atomu-a-molekul_2022.html.
- ANON., 2021, Poselství do budoucnosti aneb Jak označit místo s nejnebezpečnějším odpadem světa, *Technický týdeník*, (18), ISSN 0040-1064.
- CSVTS.CZ, 2007, Laserové obohacování uranu poprvé komerčně, *Česká nukleární společnost*, [on-line], [cit. 2010]. Dostupné z <http://www.csvts.cz/cns/news07/071025c.htm>.
- ČEZ, a.s., [on-line], [cit. 2011]. Dostupné z <http://www.cez.cz>.
- ERU (Energetický regulační úřad), [on-line], [cit. 2019]. Dostupné z <http://www.eru.cz>.
- FORSMARK, [on-line], [cit. 2010]. Dostupné z <http://www.Forsmark.com>.
- HÁLA, Jiří, 1998, *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*, KONVOJ, Brno, ISBN 80-85615-56-8.
- KADRNOŽKA, Jaroslav, 2006, *Energie a globální oteplování – Země v proměnách při opatrování energie*, VUTIUM, Brno, ISBN 80-214-2919-4.
- MAREK, Jiří. 2020 Jsou radioaktivní odpady limitujícím faktorem rozvoje jaderné energetiky?, *All for power*, (2), AF POWER agency, a.s., Praha, ISSN 1802–8535.
- MOYER, Michael, 2012, FÚZE: Falešný úsvit, *Scientific American*, (8), Espero publishing, s.r.o. Praha.
- NĚSTĚRENKO, G., SOBOLEV, A., SUŠKOV, J., 1959, *Atomová letadla*, Naše vojsko, Praha. Z ruského originálu Primenenije atomonyh dvigatělej v aviaciji. ŘEŽ S.R.O., [on-line], [cit. 2015]. Dostupné z <http://reaktory.cvrez.cz/>.
- TVEL Fuel Company, [on-line], [cit. 2010]. Dostupné z <http://www.tvcl.ru>.
- WAGNER, Vladimír, 2015, *Fukušima I poté.*, Novela bohemia, Praha, ISBN 978-80-87683-45-3.
- WIKIMEDIA COMMONS, [on-line], [cit. 2010]. Dostupné z <http://commons.wikimedia.org>.

Bibliografická citace článku

- ŠKORPÍK, Jiří, 2022, Jaderná energetika, *Transformační technologie*, Brno, [online], ISSN 1804-8293. Dostupné z https://www.transformacni-technologie.cz/jaderna-energetika_2022.html.