Jaderná energetika
(JE)

Palivový cyklus

Pavel Zácha

2014-03

Palivový cyklus

- Označuje celkový koloběh paliva (uranu) v komerčním využití, tj. od okamžiku vytěžení uranové rudy až po finální zpracování vyhořelého paliva
- Celkem má 3 fáze:
  - Přední část – těžba a výroba jaderného paliva
  - Střední část – pobyt paliva v jaderném reaktoru
  - Zadní část – nakládání s vyhořelým palivem od okamžiku vyvezení z reaktoru
    - Otevřený – trvalé uložení do hlubinného úložiště
    - Uzavřený – opětovné využití vyhořelého paliva

Přední část palivového cyklu

Těžba a zpracování uranové rudy

- Způsob těžby
  - Hornický způsob
    - Povrchová těžba
    - Hlubinná těžba
  - Loužení in situ
- Úprava uranové rudy
  - Drcení
  - Několika stupňová chemická úprava
    – kyselé a alkalické loužení
  - Ionexové výměníky
- Konečný produkt –„žlutý koláč“
  (diuranát amonný) (NH4)2U2O7

Těžba v české republice

- Těžba byla zahájena v 19. stol – uranová ruda byla surovinou pro výrobu chemických sloučenin (uranové barvy)
- 1927 – kapacita závodu zvýšena na 30 – 35 t uranu ročně
- Průmyslový rozvoj těžby uranu na **Jáchymovsku** po roce 1945 (1942 - spuštěn první jaderný reaktor)
- V 60. letech byla prozkoumána další ložiska – **Horní Slavkov, Příbram, Dolní Rožínka, Hamr, Stráž p. Ralskem**
- V současné době těžba probíhá pouze ve Stráži p. Ralskem (od r. 1996 je uran získáván chemickou cestou jako vedlejší produkt sanace použitých dolů) a v **Dolní Rožínce** (hornický způsob)

Uranový důl Dolní Rožínka

Výroba obohaceného uranu

- Přírodní uran obsahuje 0,718 % štěpného U-235,
  pro provoz většiny tepelných reaktorů je nutné podíl isotopu U-235 zvýšit (horní hranice obohacení
  pro energetické reaktory je 5 % U-235)
- Reaktory moderované těžkou vodou je možné provozovat s přírodním uranem.
- **Obohacení** předchází chemická konverze diuranátu amonného do plynné formy – hexafluorid uraničitý (UF6)

Metody obohacení

Metody využívají rozdílné hmotnosti molekul $^{235}UF_6$ a $^{238}UF_6$

- Difúze
- Odstředivá metoda
- Elektromagnetická separace
- Laserové obohacování

Difúze

- Ve směsi plynů se lehčí molekuly pohybují rychleji než ty těžší
- Plyn je pod tlakem **protlačován porézními přepážkami** (membránami) difuzoru, které umožňují průchod jednotlivých molekul, lehčí molekuly procházejí snáze → **plyn je obohacený o lehké molekuly**
- UF_6 je při pokojové teplotě v pevném skupenství → všechny komponenty difuzoru musí být udržovány při **vyšší teplotě** (udržení plynné formy)
- Účinnost jednoho difuzoru je nízká → **mnohastupňové difúzní kaskády** (tisíce stupňů)
- **Vysoká energetická náročnost** obohacovacích závodů je způsobena nutností udržovat tlak plynu při průchodu membránami (kompresory)
- Je nutný chladicí okruh plynu (kompresní teplo)
- USA, Čína, Francie, Argentina

Odstředivá metoda

- Plyn se uvede do **rotace v centrifugách** a jednotlivé izotopy se separují na základě **rozdílné hmotnosti**, lehčí jádra (U-235) zůstávají ve středu centrifugy
- **Účinnost centrifugy** je závislá na hmotnostním rozdílu separovaných částic, pro izotopy uranu je tento rozdíl velmi malý
- Vzhledem k nízké účinnosti jsou v komerčních zařízeních centrifugy spojovány paralelně a pro dosažení požadované úrovně obohacení jsou zařízení propojená do **kaskád**
- **Energetická náročnost** odstředivé metody je **nižší než u difúze**
  - Difúzní zařízení s kapacitou 10 mil. SWU/rok – 2700 MW
  - Zařízení s centrifugami s kapacitou 10 mil. SWU/rok – 109 MW
- UK, Rusko, Čína, Pákistán, Indie, Brazílie, Německo, Nizozemí, Japonsko, Irán, Izrael

Obohacování uranu

Difuzory

Centrifugy

Elektromagnetická separace

- Elektricky nabité ionty jsou urychleny elektrickým polem, atomy jsou oddělovány podle zakřivení dráhy izotopu v magnetickém poli (závislé na hmotnosti)
- Jedná se o kompletní separaci, stačí jeden cyklus
- Oak Ridge Laboratory, USA
- Ekonomicky nevýhodné

Laserové obohacování

- Jádra se běžně vyskytují v základním stavu, ale dodáním určitého množství energie se dostanou do stavu excitovaného
- Excitace jader izotopu U-235 velmi jemným laserem, jádra U-238 zůstanou v základním stavu (je potřeba jiná energie pro excitaci)
- Ionizované izotopy se oddělují elektromagneticky nebo chemicky
- Metoda aplikovaná pouze v laboratorních podmínkách

Výroba jaderného paliva

- **Chemická konverze** obohaceného plynného hexafluoridu na požadovanou sloučeninu – oxidická (UO2), karbidická (UC) a nitridická (UN) paliva
- **Lisování a sintrace** (spékání) palivových tablet, desek, výroba karbidových koulí, …
- **Kompletace** palivových souborů z proutků, desek, trubek, …

Neutronové interakce

- Neutron interaguje s prostředím několika způsoby
  - Pružný a nepružný rozptyl
  - Radiační záchyt
  - Štěpení
- Výskyt konkrétní reakce je dán pravděpodobností – mikroskopický účinný průřez
- Reakce často probíhají přes složené jádro
- V důsledku neutronových interakcí se **mění izotopické složení** materiálu (především v případě štěpení)

Štěpení a štěpné produkty

- Štěpné izotopy – např. ^{235}U – je možné rozštěpit tepelnými neutrony.
- Rozštěpením jádra uranu vznikají **2 štěpné produkty**. Tyto nové prvky mají velkou energii, kterou předávají svému okolí ve formě tepla, které je prouděním chladiva odváděno pryč z aktivní zóny.
- Kromě štěpných produktů se uvolní také **2 nebo 3 neutrony** s velkou energií – rychlé neutrony.

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{236}_{92}U \rightarrow {}^{144}_{56}Ba + {}^{94}_{36}Kr + 3{}^{1}_{0}n $$

Ozářené jaderné palivo

- V reaktoru se využije **pouze část U-235** a zbytek se vyveze bez užitku (cca 1 %)
- Ve vyhořelém palivu značné množství štěpného **plutonia**, které vzniklo během provozu záchytem neutronu na U-238 (cca 0,7 %)
- **Štěpné produkty** a vzniklé transurany jsou radioaktivní, je nutné biologické stínění
- Ozářené palivo produkuje teplo

Izotopické složení paliva

- BOC, palivo s obohacením 3 % U-235
  - **813 t** U-235, **26 977 t** uranu celkem (U-235 + U-238)
- EOC
  - **220 t** U-235, 25 858 t uranu celkem
  - **178 t** štěpné izotopy plutonia (Pu-239 a Pu-241)
  - **246 t** plutonia celkem
  - **873 t** štěpných produktů
- Při každé výměně paliva v lehkovodních reaktorech o výkonu 1000 MWe se vyveze 220 t U-235 a 178 t štěpného plutonia, toto množství je energeticky ekvivalentní milionu tun uhlí

Bazén skladování vyhořelého paliva

- Palivo zůstává v **bazénu vyhořelého paliva** (sousedí s reaktorovou šachtou) po dobu min. 5 let, během této doby se sníží aktivita paliva.
- Po zchlazení se palivové soubory přemístí do **transportního kontejneru** a odvezou se z reaktorového sálu do **meziskladu vyhořelého paliva**
- Všechny manipulace se dělají pod vodou, po naplnění se kontejner vakuově vysušuje

Mezisklady jaderného paliva

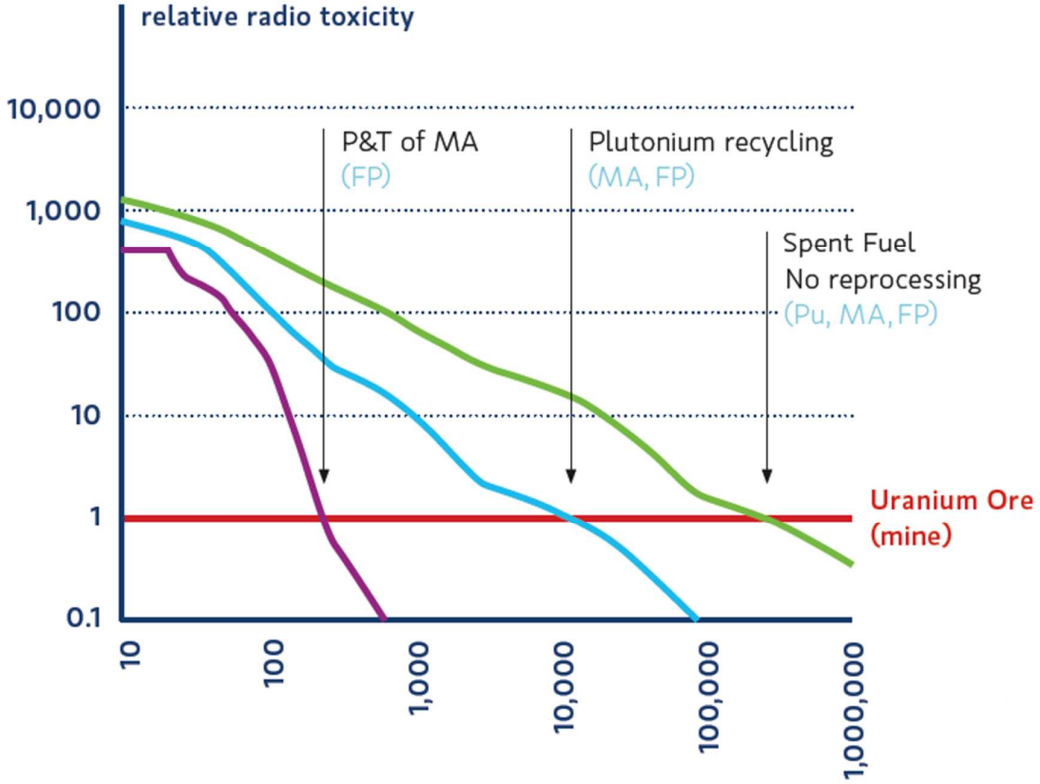
- Mezisklady slouží k dočasnému uložení paliva.
- Zde mohou palivové soubory zůstat až 60 let
- Podle typu mezisklady dělíme na:
  - Suché – skladování paliva v kontejnerech
  - Mokré – skladování ve speciálních bazénech

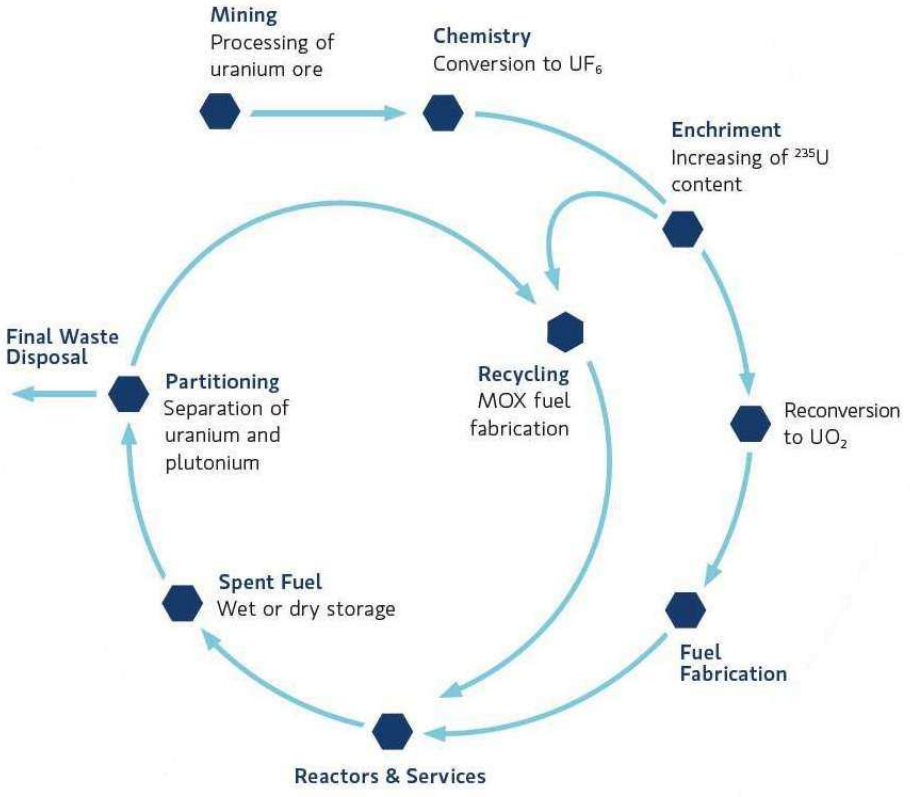
Strategie zadní části palivového cyklu

- **Otevřený palivový cyklus** – vyhořelé jaderné palivo se uloží v hlubinném úložišti
  - Finsko, Švýcarsko, USA
- **Uzavřený palivový cyklus** – přepracování (i vícenásobné) paliva a opětovné využití surovin
  - Francie, Velká Británie, Rusko, Japonsko
- Většina zemí volí „vyčkávací strategii“

Uložit nebo přepracovat?

- „Vyhořelé“ jaderné palivo obsahuje značné množství **štěpných izotopů**, které lze dále využít a ušetřit přírodní zásoby uranu
- Kromě štěpných izotopů uranu a plutonia jsou v palivu také **minoritní aktinoidy** (Cm, Am, Np), které lze štěpit rychlými neutrony – štěpitelné izotopy
- **Přepracování je dražší než nákup čerstvého uranu**
- Vyhořelé jaderné palivo představuje **dlouhodobou ekologickou zátěž** způsobenou především aktionidy
- Přepracováním se nezbavíme radioaktivních odpadů, ale snížíme jejich množství a zkrátí se jejich životnost


relative radio toxicity
10,000
1,000
100
10
1
0.1
P&T of MA
(FP)
Plutonium recycling
(MA, FP)
Spent Fuel
No reprocessing
(Pu, MA, FP)
Uranium Ore
(mine)
10
100
1,000
10,000
100,000
1,000,000


Mining
Processing of uranium ore
Chemistry
Conversion to UF_6
Enchriment
Increasing of ^{235}U content
Reconversion to UO_2
Fuel Fabrication
Reactors & Services
Spent Fuel
Wet or dry storage
Partitioning
Separation of uranium and plutonium
Final Waste Disposal
Recycling
MOX fuel fabrication

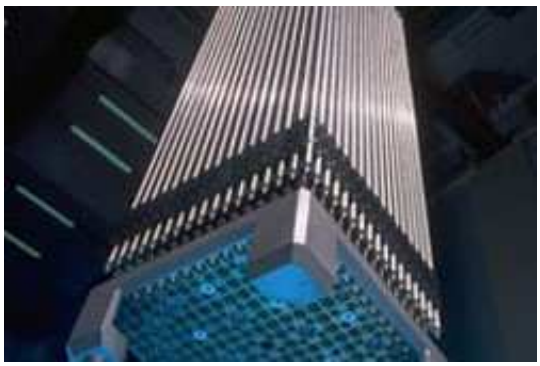
Přepracování jaderného paliva

- Použité palivové soubory se rozeberou, konstrukční materiály se zpracují jako odpad a palivové proutky se dále zpracovávají
- Metoda PUREX
  - Palivové proutky se nasekají na malé kousky a rozpustí se v kyselině dusičné
  - Pomocí tributylfosfátu se separuje uran a plutonium
- Ze získaných izotopů se vyrábí směsné palivo – **MOX** (Mixed Oxide Fuel)
- Jednotlivé izotopy plutonia se špatně separují proto je důležité z jakého zdroje přepracovávané palivo pochází

Přepracovací závody

- Závody na výrobu MOX paliva
  - La Hague (Francie)
  - Sellafield (Velká Británie)
  - Čeljabinsk (Rusko)
  - Tokai-Mura (Japonsko)

MOX palivo



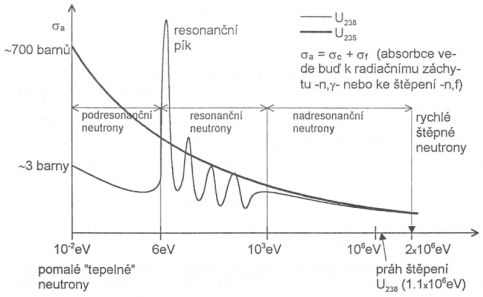
- Palivové soubory MOX jsou konstrukčně shodné s uranovým palivem (s ohledem na typ reaktoru)
  - MOX soubory je možné použít v **tlakovodních i varných reaktorech**
- Z hlediska neutronově-fyzikálních vlastností se **palivo MOX chová jinak**, proto musí být reaktory přizpůsobené na provoz s tímto palivem
- V současných reaktorech je možné použít přibližně 30 % MOX paliva z celkového počtu souborů, aniž by se ohrozila bezpečnost provozu reaktoru

MOX ve světě a u nás

- Velký počet reaktorů je provozovaných s palivem MOX (1/3 aktivní zóny), uvažuje se i o provozu reaktorů s plnou MOX zónou
  - Francie, Belgie, Švýcarsko, Německo, Japonsko, Rusko, USA
- V České republice je prozatím zvolena vyčkávací strategie
- V JE Temelín je možné palivo MOX použít (ve stávající blocích i v blocích budoucích), teoreticky je možné MOX použít i v JE Dukovany, ale neuvažuje se o tom, vzhledem k tomu, že se jedná o starší typ reaktoru. K provozu reaktoru s palivem MOX je nutné mít povolení (SÚJB)

Rychlé reaktory

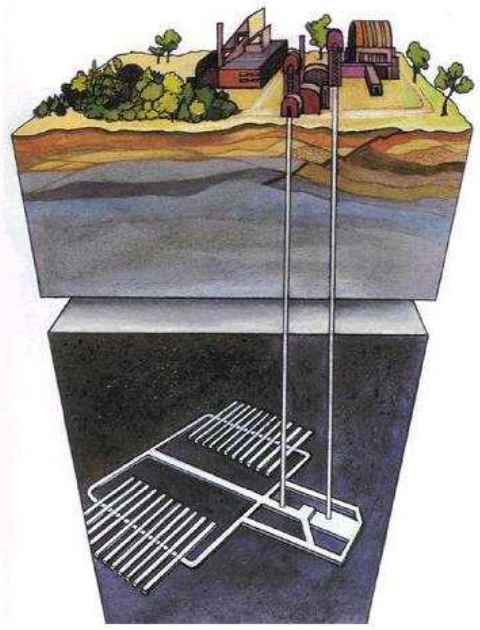
- Není moderátor, štěpení iniciují rychlé neutrony
- Produkují značné množství neutronů, s rostoucí energií neutronů, které způsobují štěpení, roste **regenerační faktor**
- Mikroskopický účinný průřez pro štěpení klesá s rostoucí energií → vyšší obsah paliva v aktivní zóně, vyšší obohacení až 30 %
- Umožňují štěpení minoritních aktinoidů a tím **redukci odpadů**
- Fungují jako množivé reaktory (k produkci dochází v blanketu, neutrony středních energií)
  - U-238 → Pu-239
  - Th-232 → U-233



Obr. 3.2. Orientační závislost účinného průřezu pro absorbci na energii neutronu pro U_{235} a U_{238}

Hlubinné úložiště

- **Hlubinné úložiště** – je určeno k **trvalému uložení vyhořelého paliva** a vysoce aktivního RAO, tak aby neovlivňovaly životní prostředí a lidskou společnost
- Palivo je **nenávratně fixováno** ve vhodné matrici a je vyloučeno jeho pozdější přepracování
- Vybudování hlubinného úložiště je nezbytné i v případě strategie **uzavřeného palivového cyklu**



13. Palivový cyklus
výstupy z kapitoly

Přední část

- způsoby těžby a úpravy uranové rudy, žlutý koláč
- přehled metod obohacování uranu
- výroba jaderného paliva

Zadní část

- co palivo obsahuje před a po střední části palivového cyklu
- mokré a suché skladování (bazény, suché mezisklady)
- rozdíl mezi otevřeným a uzavřeným palivovým cyklem, schéma
- přepracování, co obsahuje MOX palivo, rychlé množivé reaktory
- hlubinné úložiště – k čemu slouží