



Příběh jaderného paliva

Lenka Heraltová

Katedra jaderných reaktorů

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
České vysoké učení technické v Praze

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)



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
- Do roku 2007 bylo vytěženo více než 110 tisíc tun uranu



Těžba v České republice 2

- Evidovaná ložiska v ČR – Rožná, Brzkov, Břevnice pod Ralskem, Hamr pod Ralskem, Jasenice-Pucov, Osečná-Kotel, Stráž pod Ralskem
- Těžba probíhala pouze v Rožné (Dolní Rožínka) – hornický způsob – ukončena v roce 2017
- Ve Stráži pod Ralskem je uran získáván chemickou cestou jako vedlejší produkt sanace použitých dolů



Uranový důl Rožná, Dolní Rožínka



Výroba obohaceného uranu

- V uranové rudě (U_3O_8) je 0,6 – 0,9 % štěpného ^{235}U , pro provoz většiny tepelných reaktorů je nutné podíl izotopu ^{235}U zvýšit (horní hranice obohacení pro energetické reaktory je 5 % ^{235}U)
- Reaktory moderované těžkou vodou je možné provozovat s přírodním uranem.
- Obohacení předchází chemická konverze diuranátu amonného do plynné formy – hexafluorid uraničitý



Metody obohacení

- Metody využívají rozdílné hmotnosti molekul $^{235}\text{UF}_6$ a $^{238}\text{UF}_6$
- Difúze
- Odstředivá metoda
- Elektromagnetická separace – pouze v laboratorních podmínkách
- Laserové obohacování – pouze v laboratorních podmínkách



Difúze 1/2

- Ve směsi plynů se lehčí molekuly se 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)



Difúze 2/2

- 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 1/2

- 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 propojené do kaskád



Odstředivá metoda 2/2

- Energetická náročnost odstředivé metody je cca 20x nižší než u difúze
- UK, Rusko, Čína, Pákistán, Indie, Brazílie, Německo, Nizozemí, Japonsko, Irán, Izrael



Obohacování uranu



Difuzory

Centrifugy



Další metody

- Elektromagnetická separace – nabité ionty jsou urychleny elektrickým polem a odděleny podle zakřivení dráhy, kompletní separace, ekonomicky nevýhodné, Oak Ridge NL, USA
- Laserové obohacování – excitace jader ^{235}U laserem, elektromagnetické oddělení, pouze v laboratorních podmínkách



Výroba jaderného paliva

- Chemická konverze obohaceného plynného hexafluoridu na požadovanou sloučeninu – oxidická, karbidická a nitridická paliva
- Lisování a sintrace palivových tablet, desek, výroba karbidových koulí, ...
- Kompletace palivových souborů z proutků, desek, trubek, ...





Ztráty při výrobě jaderného paliva

- Těžba, obohacování a výroba paliva je komplexní proces zahrnující řadu chemických procesů, které jsou doprovázeny určitou ztrátou
- Ztráta při konverzi na UF_6 – 0,5 % uranu
- Obohacování je primárně beze ztrát, ale separace není kompletní a vždy zůstává část se nízkým podílem ^{235}U – ochuzený uran
- Ztráta při výrobě paliva – 1 % uranu

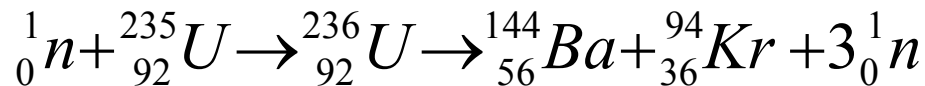


Střední část palivového cyklu



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.



Moderace neutronů

- Srážkami rychlých neutronů s jádry moderátoru tyto neutrony postupně ztrácejí energii až dosáhnou tepelné úrovně.
- Jako moderátor se používají lehké prvky, které málo pohlcují tepelné neutrony.
 - Např. lehká voda, těžká voda, grafit, polyetylén, parafín



Regulace reaktoru

- Při každém štěpení se uvolní 2 až 3 rychlé neutrony. Některé z nich se zachytí v konstrukčních materiálech nebo mohou uniknout z reaktoru
- Ustálená štěpná řetězová reakce – právě jeden neutron z každého štěpení, který je schopen dále štěpit.
- Kromě paliva musí být v reaktoru materiály, které pohlcují neutrony – regulační tyče – a hledá se vhodný poměr mezi palivem a absorbátorem.



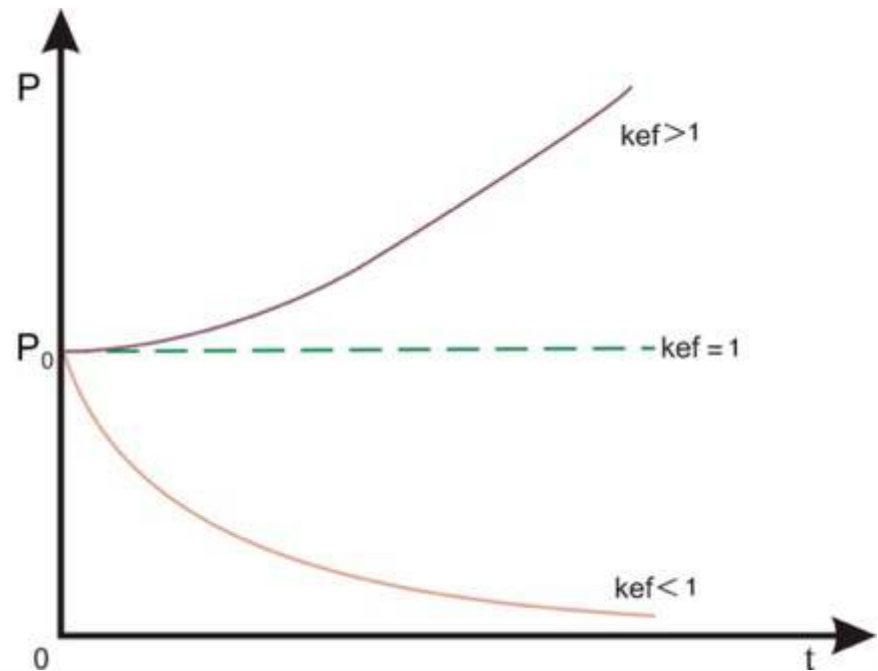
Kritický stav

- V aktivní zóně jaderného reaktoru probíhá štěpná řetězová reakce. Nastavením vhodné pozice regulačních orgánů operátor reaktoru upravuje počet neutronů v aktivní zóně.
- Stav, kdy je počet neutronů v reaktoru konstantní, nazýváme kritický stav jaderného reaktoru. To znamená, že právě jeden neutron, který vznikne ze štěpení vyvolá další štěpení jádra uranu.



Koeficient násobení

- Koeficient násobení – podíl počtu neutronů ve dvou po sobě jdoucích generacích v konečné soustavě
- Podle hodnoty k_{ef} rozlišujeme 3 stavy reaktoru:
 - $k_{ef} < 1$ podkritický
 - $k_{ef} = 1$ kritický
 - $k_{ef} > 1$ nadkritický



Regulační orgány

- Koeficient násobení pro danou aktivní zónu není konstantní. Mění se v čase v závislosti na změně množství paliva → množství absorbátoru se musí průběžně měnit tak aby byla udržena štěpná řetězová reakce
- Na počátku provozu jsou regulační orgány částečně zasunuty do aktivní zóny a s postupným ubýváním štěpného materiálu – vyhoříváním – je nutné odebírat i absorbátor → regulační tyče se postupně vytahují ze zóny.
- Další absorbátory v aktivní zóně:
 - kyselina boritá
 - vyhořívající absorbátory – Gd_2O_3 , B-10



Průběh palivové kampaně

- Energetické reaktory se nejčastěji provozují v kampaňovém provozu. Délka kampaně je cca 320 dní
- Do reaktoru se vždy zaváže větší množství paliva → zásoba štěpného materiálu na celou kampaň, koeficient násobení má na počátku kampaně hodnotu 1,3; přebytek koeficientu násobení je kompenzován regulačními orgány
- Během kampaně palivo postupně vyhořívá a hodnota koeficientu násobení se snižuje, v okamžiku kdy klesne pod hodnotu 1 je nutné reaktor odstavit
- V průběhu odstávky reaktoru se část palivových souborů nahradí čerstvými



Příprava překládkového schématu

- Návrh palivové vsázky je vytvořen na základě požadavků na délku kampaně a v závislosti na dostupném palivu
- Pomocí výpočetních kódů se navrhne nová vsázka a spočtou se její charakteristiky – výpočet se provádí pro 1/6 aktivní zóny
- Návrh musí splňovat všechny provozní a bezpečnostní limity

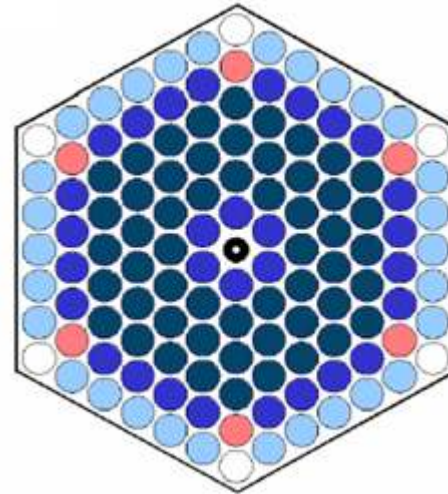
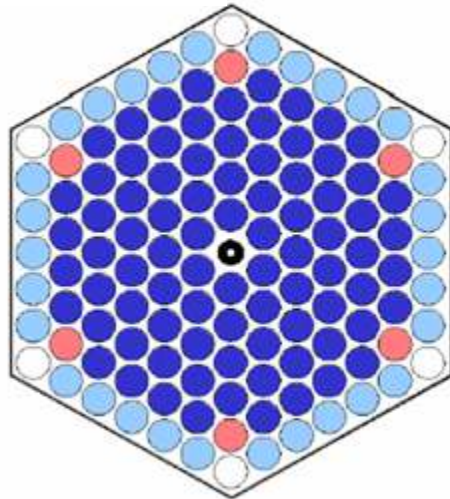
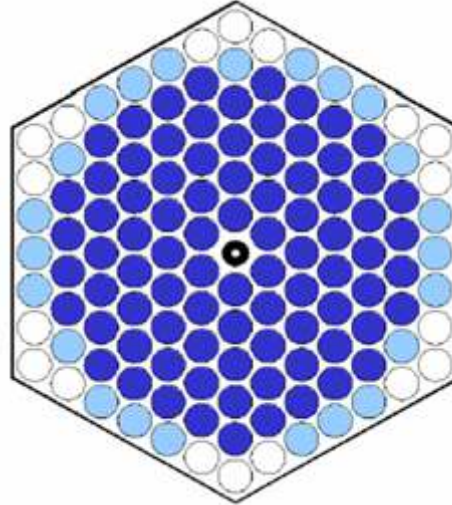
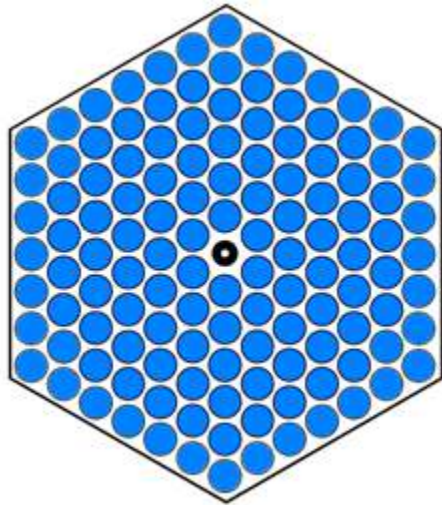


Optimalizace palivových vsázek

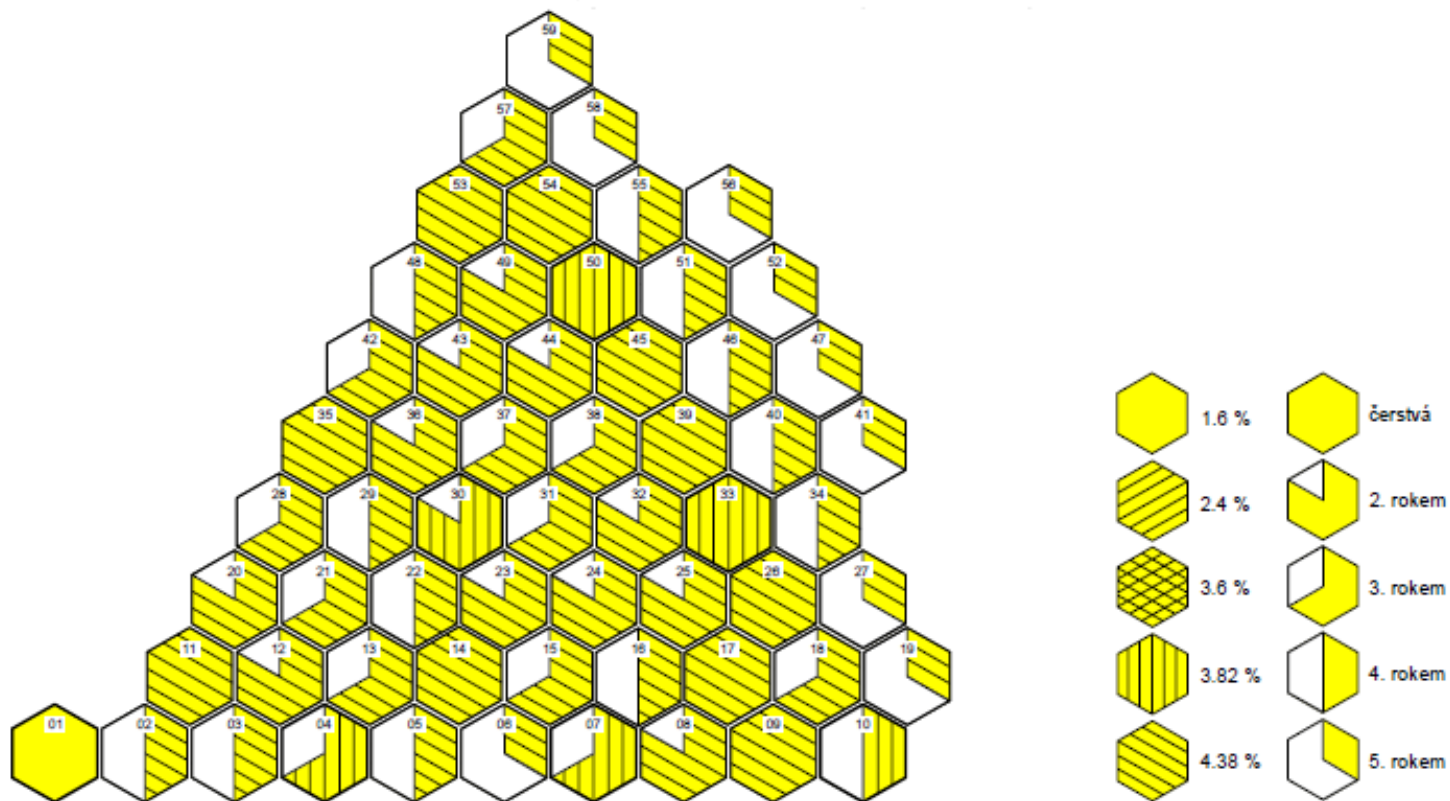
- Předepsané limity splňuje značný počet navržených vsázek, ale cílem je provozovat tu nejlepší
- Kromě výpočtů neutronických vlastností jsou proto použity i optimalizační metody, které umožňují najít vsázku s nejnižšími hodnotami limitovaných parametrů
- Důvodem je provozování vsázky s vyrovnaným výkonem, resp. dosahování rovnoměrného vyhoření palivových souborů v aktivní zóně
- Optimalizace může být zahrnuta už při návrhu paliva a pak následuje optimalizace na úrovni aktivní zóny



Kartogramy palivových souborů



Optimalizovaná aktivní zóna



Kampaňová výměna paliva v reaktoru

- Pomocí zavážecího stroje se vyvezou vyhořelé palivové soubory, částečně vyhořelé soubory se přesunou na novou pozici a zaveze se čerstvé palivo, využívá se symetrie aktivní zóny



Kontinuální výměna paliva v reaktoru

- Nejvíce vyhořelé palivové soubory se vyměňují v průběhu provozu
- I v tomto případě se dá vhodnou optimalizací dosáhnout lepšího vyrovnání výkonu
- CANDU, RBMK, A1



Zadní část palivového cyklu



Ozářené jaderné palivo

- V reaktoru se využije pouze část ^{235}U a zbytek se vyveze bez užitku (cca 1 %)
- Ve vyhořelém palivu značné množství štěpného plutonia, které vzniklo během provozu zachytem neutronu na ^{238}U (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 % ^{235}U
 - 813 t ^{235}U , 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 ^{235}U 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

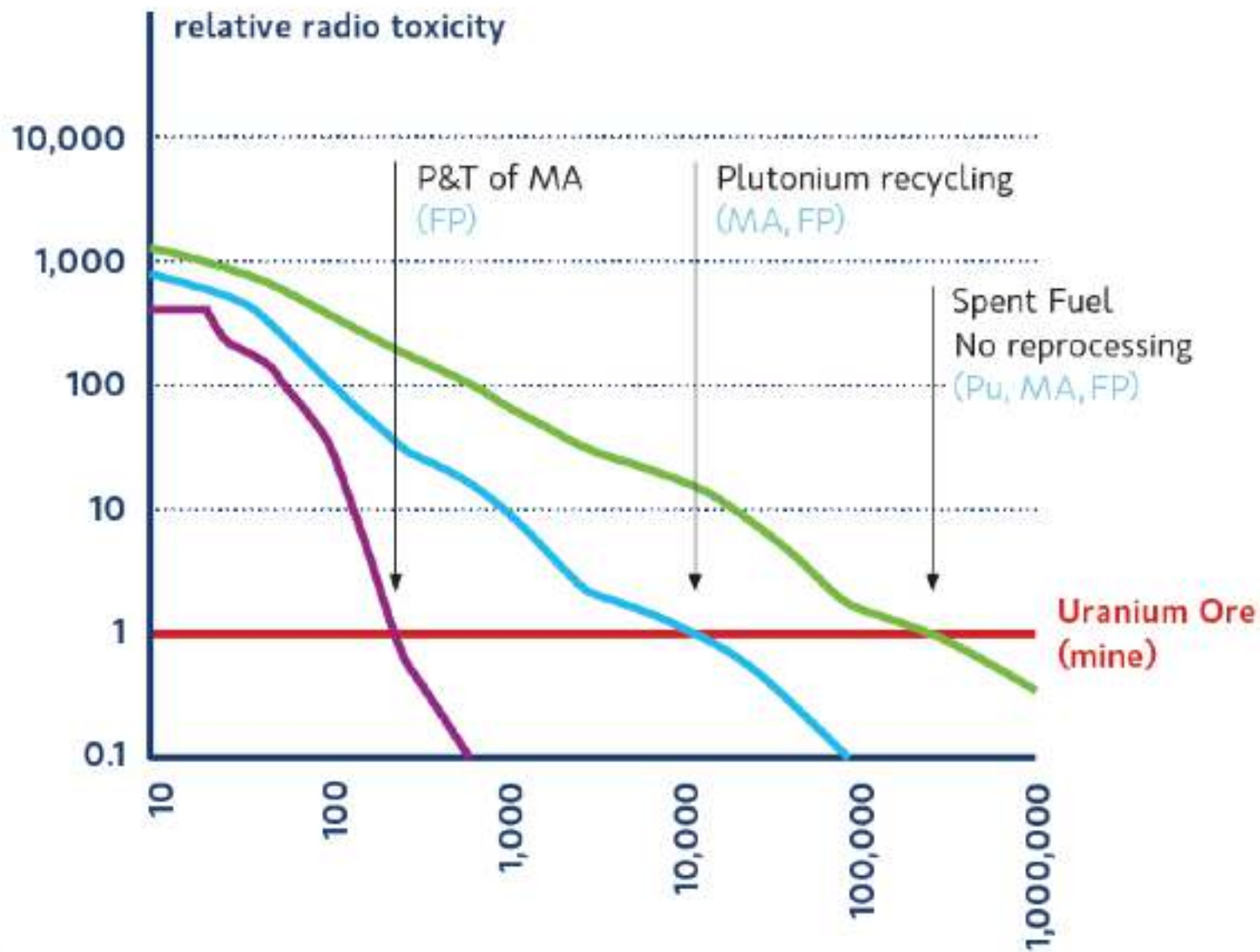
- Otevřený palivový cyklus – vyhořelé jaderné palivo se uloží v hlubinném úložišti
 - Finsko, Švýcarsko, USA
- Uzavřený palivový cyklus – přepracování (i vícenásobné) paliva a opětovné využití surovin
 - Francie, Velká Británie, Rusko, Japonsko
- Většina zemí volí „vyčkávací strategii“

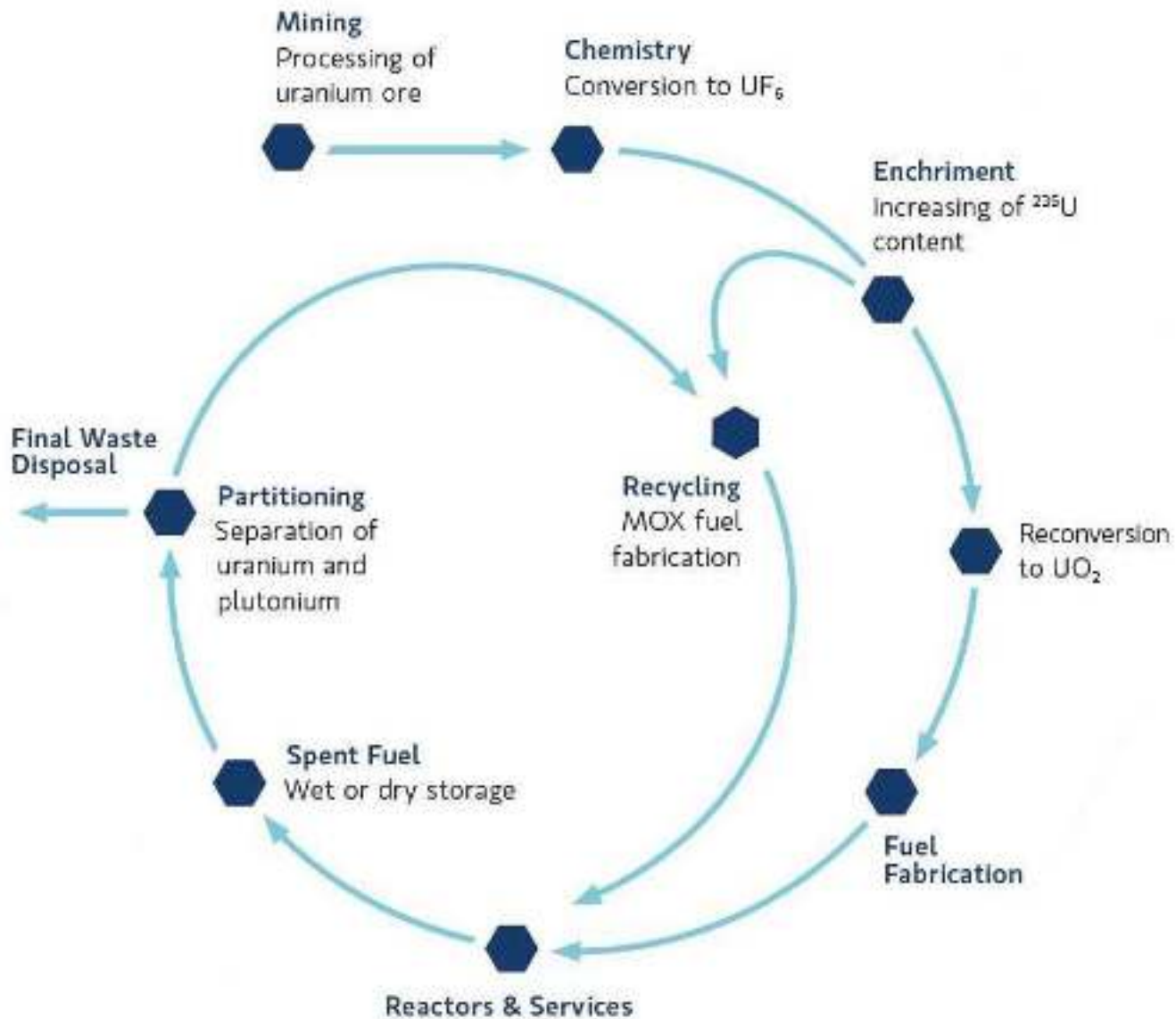


Uložit nebo přepracovat?

- „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 aktinoidy
- Přepracováním se nezbavíme radioaktivních odpadů, ale snížíme jejich množství a zkrátí se jejich životnost







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



Přepřacovací 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
- 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 štěpných neutronů roste počet neutronů uvolněných ze štěpení
- Menší pravděpodobnost štěpení → vyšší obsah paliva v aktivní zóně, vyšší obohacení až 30 %
- Umožňují štěpení minoritních aktinoidů a tím redukcii odpadů
- Fungují jako množivé reaktory (k produkci dochází v blanketu, neutrony středních energií)
 - $^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$
 - $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$



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 matici a je vyloučeno jeho pozdější přepracování
- Vybudování hlubinného úložiště je nezbytné i v případě strategie uzavřeného palivového cyklu

