

Zlato a stříbro je k záhubě smrtelníkům. Zlato, vůdce zločinů, mor života a zkáza věcí, ó kéž bys nebylo rozkošnou ohavností. Pro tebe se dějí loupeže a vraždy, bitvy, bratři na bratry nevraží, a rodiče na děti.

Phocildus

Mírové jádro

V jaderných reaktorech je situace podstatně odlišná. K tomu, aby řetězová jaderná reakce štěpení mohla probíhat řízeným způsobem, je třeba zajistit v principu dvě věci. Shromáždit nadkritické množství jaderného štěpného materiálu pro danou konfiguraci a zajistit řízení počtu neutronů pomocí vhodných absorbátorů či moderátorů tak, aby štěpná reakce probíhala požadovanou intenzitou.

Palivem většinou bývá uran ^{235}U ve směsi s ^{238}U , buď přírodní směs, nebo častěji obohacený ^{235}U (obohacení se používá buď nízké do 5 %, střední do 20 %, nebo vysoké až 95 %). Jelikož kovový uran nemá dobré tepelně-mechanické vlastnosti, používá se ve formě oxidů (UO_2), popř. slitin s jinými kovy málo pohlcujícími neutrony (např. Zr), ojediněle sloučeniny karbidové. Dalším štěpným materiálem je plutonium ^{239}Pu a ve speciálním uspořádání uran ^{238}U (FBR reaktory), popř. v budoucnu i thorium ^{232}Th (technologie ADTT).

O dynamice štěpné reakce rozhoduje poměr mezi průměrným počtem nově vzniklých neutronů a počtem neutronů spotřebovaných pro štěpení (neboli poměr mezi počtem neutronů následující generace a počtem neutronů předcházející generace). Štěpení jader (především ^{235}U) probíhá ve složitém zařízení zvaném jaderný reaktor. V klasickém reaktoru se řízení počtu neutronů udržujících v chodu štěpnou reakci provádí ve dvou etapách. Nejprve probíhá tzv. moderace neutronů. Neutrony emitované při štěpení se interakcí s látkami o nízké jaderné hmotnosti, tzv. moderátory, zpomalují, to proto, aby tyto neutrony zůstaly dostatečně dlouho zachovány v reakčním prostoru pro uskutečnění dalšího štěpení (rychlé neutrony by při průletu mezi jádry ^{235}U neměly dost času, aby účinně vstoupily do jader a mohly tak vyvolat další štěpení – vyletěly by většinou z reakčního prostoru ven). Moderátor tedy tím, že neutrony zpomaluje, je vrací do reakce a napomáhá tak k udržení řetězové štěpné reakce. Účinnými moderátory jsou látky obsahující lehká jádra, neboť podle zákona zachování hybnosti a energie je při pružné srážce neutronu s lehkým jádrem předána největší energie. Nejúčinnějším moderátorem je tedy teoreticky vodík, který je obsažen ve vodě. Plynný vodík, vzhledem k nízké protonové hustotě, však moderuje jen velmi slabě. Účinnější moderační schopnost vykazuje vodík vázaný ve vodě H_2O , ještě účinnější je chemická vazba vodíku přímo na štěpný materiál ^{235}U ve formě hydridu uranu UH_3 . Dalším požadavkem je, aby tato látka málo absorbovala neutrony. Z těchto hledisek je vhodným moderátorem voda či těžká voda, uhlík (grafit) nebo berylium (nezaměňovat s bórem, který naopak neutrony účinně pohlcuje). V reaktorech pracujících s rychlými neutrony se moderátor nepoužívá.

Přebytek neutronů, který by jinak vyvolal lavinovité štěpení a havárii reaktoru, je třeba pohltit ve vhodném absorbátoru. Absorbátory bývají většinou tvaru tyčí, které se do reaktoru zasouvají a tím řídí rychlost reakce. Chceme-li zvětšit počet štěpení, tyče mírně vysuneme, pro zpomalení reakce tyče zasuneme. Vhodným absorbátorem je kadmium.

Ta část reaktoru, v níž je umístěn štěpný materiál a ve které probíhá řetězová štěpná reakce, se nazývá aktivní zóna. Štěpný materiál je v reaktoru uložen ve formě většího počtu oddělených a samostatných tzv. palivových článků, mezi nimiž je moderátor a mezi něž se též zasouvají regulační absorpční tyče. Aktivní zóna reaktoru bývá dále obklopena tzv. reflektorem – vrstvou vhodného materiálu, který odráží unikající neutrony a vrací je částečně zpět do reakčního objemu reaktoru, což poněkud zvyšuje výtěžnost reakce. V reflektoru se používá v zásadě stejných materiálů jako v moderátoru – grafit, těžká voda.

Při řetězové štěpné reakci se uvolňuje značné množství energie. Štěpný materiál se zahřívá a je třeba jej intenzívně chladit vhodným chladícím materiálem (např. vodou) protékajícím přímo kolem palivových článků – to je tzv. primární chladicí okruh. U systémů se dvěma okruhy se teplo z primárního chladicího okruhu předává v tepelném výměníku vodě sekundárního chladicího okruhu. V jaderné elektrárně je sekundárním chladícím okruhem parogenerátor, jehož pára roztáčí lopatky turbíny pohánějící generátor vyrábějící elektrický proud. Voda tak může být současně použita jako moderátor i jako chladivo. V případě úniku vody z primárního okruhu se ztratí moderační účinky a štěpná reakce se sama zastaví. U systémů dvou okruhů je primární chladicí okruh hermeticky uzavřen, takže jeho radioaktivní voda se nemísí s vodou sekundárního okruhu. (Nejčastějším chladivem je voda, ojediněle těžká voda. Při vysokých tlacích se někdy používají i plyny, např. CO₂ nebo He. V reaktorech pracujících při vysokých teplotách, kde je požadován vysoce účinný přenos tepla, se používají tekuté kovy – především sodík či draslík, olovo nebo vizmut.)

Protože při štěpení postupně klesá počet atomů štěpného materiálu, dochází k tzv. „vyhořívání“ paliva, musí se postupně vysunovat absorbatory neutronů – tzv. kompenzační tyče. Další možností dlouhodobé regulace a kompenzace vyhořívání paliva je změna koncentrace vhodné látky absorbující neutrony (např. bóru), rozpuštěné v chladivu. Toho se využívá u některých vodou chlazených reaktorů, kde se do chladicí vody přidá cca 1 % kyseliny borité a pak, v průběhu provozu a vyhořívání paliva, se její koncentrace postupně snižuje (ředěním čistou vodou přiváděnou do primárního okruhu) až prakticky na nulu před výměnou paliva.

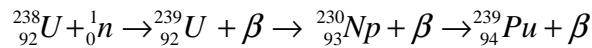
Když koncentrace štěpného materiálu poklesne natolik, že štěpná reakce by se již neudržela ani při vytažených absorpčních tyčích, je třeba takovéto vyhořelé palivové články nahradit novými. Bývá to zpravidla po 12-18 měsících provozu reaktoru. U většiny typů je pro tuto výměnu nutno odstavit reaktor, některé typy však umožňují kontinuální výměnu paliva za provozu. Výměna palivových článků je značně náročná práce. Na rozdíl od nových (čerstvých, nepoužitých) palivových článků, jejichž aktivita je poměrně nízká, jsou vyhořelé palivové články vysoce radioaktivní a nikdo se k nim nesmí přiblížit. Články se vytahují z aktivní zóny reaktoru pomocí dálkově ovládaných manipulátorů a ihned se zasunují do silných stínících kontejnerů. Radioaktivní rozpad štěpných produktů ve vyhořelých palivových článcích je zpočátku tak intenzívný, že se uvolňuje teplo a materiál se zahřívá – čerstvě vyhořelé palivové články je nutno chladit. Nejčastějším způsobem jejich počátečního skladování je umístění ve vodním bazénu u reaktoru; kde voda zajišťuje nejen chlazení, ale i poměrně účinné stínění před zářením. Dalším způsobem je „suché“ chlazení, kdy se palivové články umísťují do speciálních kontejnerů naplněných heliem, zvenku chlazených vzduchem. Po asi 5 letech, kdy aktivita materiálu dostatečně poklesne, se palivové články umísťují do meziskladů a teprve po mnoha dalších letech se ukládají na definitivní centrální úložiště (pokud se ovšem nepřikročí k jejich dalšímu zpracování).

Tyto idylické poměry v reaktoru ale může narušit tzv. xenonová otrava reaktoru. Během štěpení totiž vznikají nové štěpné produkty (Ba, Sr, Kr, Xe atd.), z nichž některé silně absorbují neutrony. Nahromadění takovýchto produktů štěpení v palivových článcích může snižovat jejich reaktivitu, neboť zplodiny absorbující neutrony naruší neutronovou rovnováhu v reaktoru. Při normálním „běhu“ reaktoru toto nebezpečí nehrozí, ale při podstatném snížení výkonu reaktoru nebo jeho odstavení je rovnováha narušena, neboť v reaktoru se začíná hromadit zejména xenon ¹³⁵Xe (téměř dokonalý pohlcovač neutronů). Než se ¹³⁵Xe přirozeně rozpadne, reaktor po několik hodin není schopen znovu začít pracovat. Právě „xenonová otrava“ při odstavení reaktoru v Černobyli sehrála důležitou desorientační úlohu při chybách operátorů, které nakonec vyústily ve fatální havárii.

Jeden kg uranu (993 g ²³⁸U a 7 g ²³⁵U) dá úplným rozpadem na štěpné produkty energii 5 000 000 kWh. V reaktoru, který by pracoval pouze s neobohaceným ²³⁵U, se však „spálí“ pouze 3,5 g z každého kilogramu uranu, protože druhých 3,5 g bude postupně „otráveno“

zplodinami rozpadu (Sr, Ba, Kr, Xe apod.). Neutrony se budou v těchto zplodinách „ztrácet“ a reaktor by se zastavil. Z toho vyplývá, že z jednoho kg přírodního uranu získáme energii pouze 20 100 kWh, odpovídající spálení 10,11 tun uhlí. Dáme-li zbylých „nespálených“ 3,5 g „vyčistit“ od rozpadových produktů, získáme zbytek energie.

Změníme-li však v uranu izotop ^{238}U rychlými neutrony na plutonium, získáme další energii. „Spálením“ jednoho kilogramu plutonia obdržíme energii odpovídající spálení 2 880 t nejkvalitnějšího uhlí, tj. asi 5,75 milionů kilowatthodin (tj. dosáhneme většího energetického výnosu, než jaký by teoreticky byl z původního uranu).



(^{239}U je nestálý, vydává beta záření a mění se v neptunium. Rovněž neptunium Np je nestálé, vydává beta záření a mění se na plutonium Pu.)