Jaderný reaktor

Jako **palivo** se v tepelných reaktorech nejčastěji používá obohacený uran, který obsahuje vyšší procento nuklidu $^{235}_{92}U$ než uran přírodní. Výroba tohoto paliva obohacováním uranu vyžaduje náročnou technologii a zabývá se jí jen několik průmyslově vyspělých států světa. Jako **moderátor**, ke zpomalování neutronů, se používá nejčastěji voda, grafit nebo těžká voda, ... tj. látky obsahující lehká jádra.

Neutron, který vzniká jaderným štěpením, má průměrnou energii přibližně 2 MeV. Aby ovšem mohl štěpit neklid $^{235}_{92}U$, musí mít tento neutron energii řádově menší než jednotky elektronvoltů. Proto je nutné tyto rychlé neutrony zpomalit.

> Zpomalit pohyb částice znamená odebrat jí část její energie.

Zpomalení neutronu probíhá při jeho srážkách s jádry moderátoru. Ze zákona zachování energie a zákona zachování hybnosti vyplývá, že při srážce neutronu s lehčím jádrem může neutron předat tomuto jádru mnohem více energie, než při srážce s těžkým jádrem. Z výše uvedených moderátorů je z hlediska zpomalování neutronů nejlepším moderátorem lehká voda, pak těžká voda a nakonec uhlík (grafit).

> Srážku neutronu s lehčím jádrem si lze představit jako náraz těžké kulečníkové koule na kouli s nižší hmotností. Těžká koule předá svojí energii té lehčí a ta „odletí“ velkou rychlostí od místa srážky. Když by srážka proběhla opačně, tj. lehká koule by narazila do těžké, lehká koule by se od těžké odrazila relativně velkou rychlostí pryč. Proto se musejí neutrony zpomalovat srážkami s lehkými jádry.

Důležitou vlastností moderátoru je také co nejmenší absorpce neutronů, protože tyto neutrony chceme využívat k dalšímu štěpení jader. Pokud by moderátor neutrony absorboval, neutrony by byly pro další štěpnou reakci nevyužitelné. V případě příliš velké absorpce neutronů je nutné používat více obohacené palivo.

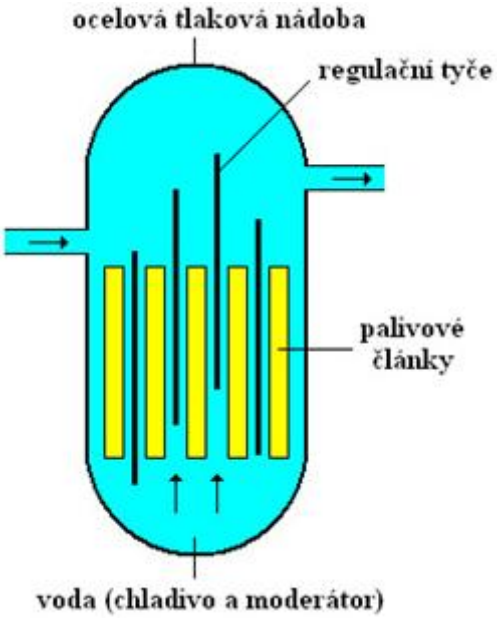
Absorpce neutronů v látce závisí především na složení jádra daného prvku. Z uvedených tří moderátorů má nejmenší absorpci těžká voda (jádro obsahuje proton a neutron a příjem dalšího neutronu je málo pravděpodobný), pak uhlík a nakonec lehká voda.

Sjednocením těchto dvou požadavků na moderátor vychází jako nejlepší moderátor těžká voda (výborné zpomalení a téměř nulová absorpce). Je však nutné ji mít ve vysoké koncentraci (více než 90 %). což je ovšem velice drahé, a proto se příliš nepoužívá. Tento typ moderátoru umožňuje používat palivo s přírodním obohacením uranu $^{235}_{92}U$ (to činí přibližně 0,7 %). Dalším moderátorem v pořadí je uhlík. Nejvíce je přesto v praxi využívána lehká voda (výborně moderuje ale více absorbuje), protože může plnit i funkci chladiva a navíc má dobře známé chování při různých tlacích a teplotách. Kvůli absorpci neutronů v lehké vodě je ovšem nutné využívat obohacená paliva.

Chladivo slouží k odvádění tepla z reaktoru, a jde-li o reaktor energetický i k tvorbě páry k pohonu turbíny. Nejčastěji je to voda, CO_2, těžká voda, ... Vysokoteplotní reaktory pro průmyslové účely bývají chlazeny heliem. Reaktory chlazené vodou se dále dělí na:

1. tlakovodní - voda je uzavřena v tlakové nádobě, aby se zabránilo jejímu varu;
2. varné

Kombinací těchto komponent pak vzniká určitý typ reaktoru s mezinárodním zkratkovým označením. Např. PWR (*pressurized water reactor*) je ve světě nejrozšířenější reaktor, moderovaný a chlazený obyčejnou vodou, s tlakovou nádobou.



Obr. 127

Schéma jaderného reaktoru PWR je na obr. 127. Osvědčenými reaktory jsou reaktory tlakovodní s obohaceným uranem, moderované a chlazené vodou. Palivo (resp. palivové články) jsou uranové tyče s ochranným pokrytím. Ty se vyrábějí tak, že se prášek z keramiky UO_2 slisuje a pak se zapeče. Tím se zrnka prášku přitaví k sobě. Vznikne tak jeden tzv. pelet, z nichž se vyrábějí palivové tyče délky zhruba 4 m. Na povrchu se tyto tyče pokrývají povlakovým materiálem (cladding) vyráběným např. ze zirkonu.

Palivové tyče se pokrývají povlakovým materiálem proto, že se tak vytvoří první ochranná bariéra proti úniku radioaktivního materiálu. Běžný uran není příliš nebezpečný, co se týče radioaktivity, koneckonců nachází se i v přírodě. Problémem jsou některé prvky vznikající štěpením jader uranu, které mají krátký poločas rozpadu a v přírodě se téměř nevyskytují. Ty mohou být výrazně více radioaktivní. Takových prvků je celá řada a některé z nich jsou i v plynné formě. Proto se palivové tablety umisťují do pokrytí (cladding), aby se zamezilo úniku radioaktivních plynů do primárního okruhu, ale především aby všechny štěpné produkty zůstaly pohromadě a pak mohli být společně s vyhořelým palivem bezpečně vyměněny za nové články. Zirkonium se volí hlavně proto, že téměř neabsorbuje neutrony, a proto nezamezuje štěpení.

Jedna peleta má hmotnost 4,8 gramu a energií, kterou dokáže uvolnit uran v ní obsažený, odpovídá využitelné energii, kterou lze získat spálením 880 kg černého uhlí. V jedné palivové tyči pak je 370 pelet o celkové hmotnosti 1,8 kg. Energie, kterou lze získat z jedné palivové tyče, odpovídá energii, kterou spotřebuje průměrně jedna domácnost za dobu 25 let. V 1 kg uranu je obsažena energie odpovídající využitelné energii 1 vagonu černého uhlí.

Pro představu: jedna peleta má velikost zhruba kostky cukru, kterou dáváme do čaje nebo do kávy, a do jedné palivové tyče jich přijde cca 400.

Chladivem je většinou voda, jejíž teplota musí být co největší, jak vyplývá z druhého termodynamického zákona a účinnosti tepelného stroje (resp. chladícího stroje).

Ačkoliv to bude znít paradoxně, chladivo je pro výrobu elektrické energie (z hlediska teorie tepelných strojů) ohřívač. Toto médium sice chladí jaderný reaktor, ale zároveň ohřívá vodu v sekundárním okruhu elektrárny. A účinnost tepelného stroje je podle druhého termodynamického zákona definovaná vztahem $\eta = \frac{T_{\text{ohřívače}} - T_{\text{chladiče}}}{T_{\text{ohřívače}}} = 1 - \frac{T_{\text{chladiče}}}{T_{\text{ohřívače}}}$. Proto musí být teplota $T_{\text{ohřívače}}$ chladiva

co možná největší, aby byla účinnost také co možná největší.

Teplota chladiva dosahuje zhruba 300 stupňů Celsia při tlaku asi 16 MPa.

Palivo je umístěno v tzv. **aktivní zóně**, kde jsou umístěny rovněž kompenzační, regulační a havarijní tyče z materiálů pohlcujících neutrony (kadmium, borová ocel, ...). Aktivní zóna je umístěna v **tlakové nádobě** s vodou, která plní funkci moderátoru, chladiva i stínění. Pomocí zpomalování neutronů (tedy pomocí moderátoru) a regulačních tyčí lze udržovat kritické množství (resp. lehce nadkritické množství) jaderného paliva nutného k jaderné reakci pomocí určitého množství vhodných neutronů.

Provoz jaderného reaktoru je tedy založen na možnosti ovládat a regulovat řetězovou jadernou reakci. Jejím základním ukazatelem je tzv. **multiplikační faktor** *k*, který vyjadřuje nárůst počtu neutronů po jednotlivých krocích (generacích) řetězové reakce a bere v úvahu všechny možné nevyhnutelné ztráty a únik neutronů:

1. $k > 1$ - počet neutronů během reakce neustále narůstá a proces má charakter exploze (viz obr. 126);
2. $k = 1$ - kritický stav; počet neutronů zůstává vyrovnaný, řetězová reakce probíhá se stále stejnou intenzitou (viz obr. 125);
3. $k < 1$ - počet neutronů klesá a reakce se zastaví.

Naštěstí při štěpení jader kromě neutronů uvolňovaných okamžitě vzniká i část neutronů se zpožděním několika sekund, což dává dostatek času k automatické regulaci průběhu reakce.

© Encyklopedie Fyziky (http://fyzika.jreichl.com); Jaroslav Reichl, Martin Všetička
Licence http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/ zakazuje úpravy a komerční distribuci.