

Jaderná energetika (JE)

Pavel Zácha
2015-03

10. Materiály aktivní zóny jaderných reaktorů

AZ zahrnuje:

- jaderné palivo
- povlakový materiál
- moderátor
- chladivo
- absorbátor

AZ energetického reaktoru je vystavena 4 základním druhům namáhání:

- mechanické
- tepelné
- chemické
- **radiační** (štěpné produkty, neutrony, α , β , γ)
 - ⇒ změna krystalické mřížky / přeměna izotopů, nové molekuly => makroskopické efekty, změny vlastností materiálů (radiace, křehnutí,...)
 - ⇒ tzv. **radiační poškození** = změny:
 - chemického složení
 - rozměrů a tvaru (jaderné palivo)
 - mechanických vlastností (pevnost, houževnatost / křehnutí, ...)
 - chemických a fyzikálních vlastností (elektrická vodivost, tepelná vodivost, viskozita, ...)



Nutné zabývat se materiálovým složením AZ

10.1 Jaderná paliva

- hlavní funkce:
 - štěpení tepelnými neutrony
 - 1. bariéra mezi štěpnými produkty a životním prostředím

a) izotopy štěpitelné všemi neutrony (rychlými i tepelnými)

Plodící materiál:		palivo:	
Th232	→	U233	umělé
		U235	přírodní
U238	→	Pu239	umělé

b) obohacení

- přírodní uran
- obohacený uran: mírně (do 5%), středně (do 20%), vysoce (do 93%)
- vysoce obohacené palivo (MOX - Mixed oxide fuel), nejčastěji $\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$

10.1 Jaderná paliva

c) chemicko-metalurgická forma

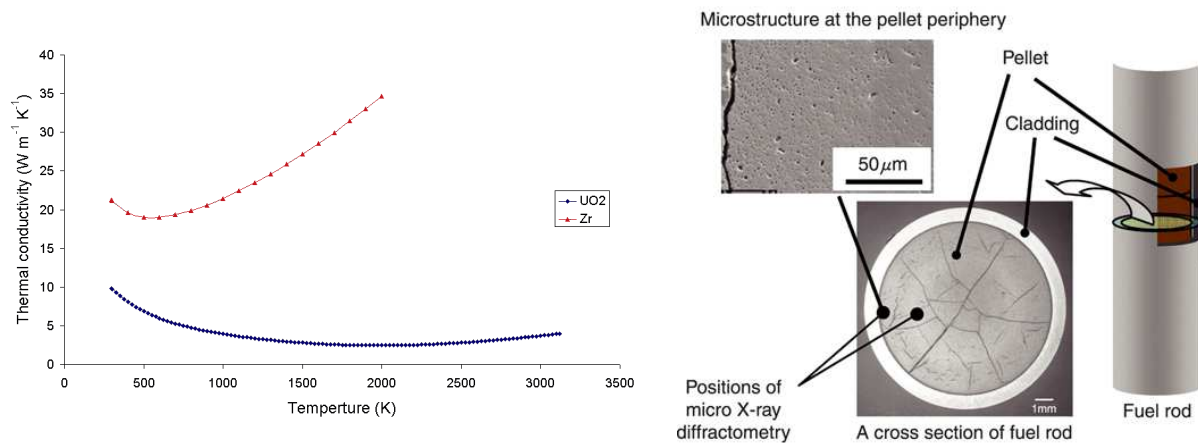
- **kovový uran**
 - hustota 19.000 kg/m^3 (19 g/cm^3)
 - 3 krystalické modifikace/fáze dle teploty (α - do $662 \text{ }^\circ\text{C}$, β - do $772 \text{ }^\circ\text{C}$, γ - do teploty tavení $1133 \text{ }^\circ\text{C}$),
 - prakticky použitelný pouze do $600 \text{ }^\circ\text{C}$
 - velká tepelná vodivost
 - samonosné
 - omezené vyhoření v důsledku napuchání (hromadění zejména plyných produktů štěpení), do cca 6000 MWd/t
 - užíván v I. generaci grafitových plynem chlazených reaktorů (MAGNOX), FBR

10.1 Jaderná paliva

c) chemicko-metalurgická forma

- keramické palivo (UO_2 , UC)

- hustota max. 10.400 kg/m^3 ($10,4 \text{ g/cm}^3$)
- práškové UO_2 (nejpoužívanější) – vyrábí se lisováním do tablet + sinterování (slinování) = tvrdé a křehké palivo, které při provozu působením plynných štěpných produktů rozpraskává
- chemicky stabilní, bez fázových přeměn, teplota tavení 2878°C
- za provozu použitelný do cca 1200°C (přechodně i 1600°C)
- nižší tepelná vodivost (řádově)
- nejsou samonosné (potřebují nosný povlak)



10.2 Povlakové materiály

- hlavní funkce:

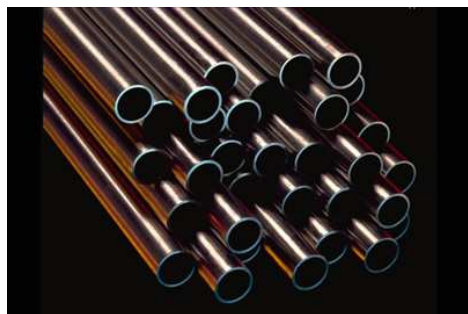
- brání pronikání štěpných produktů z paliva do chladiwa
- 2. bariéra mezi štěpnými produkty a životním prostředím
- u keramických paliv plní nosnou funkci

- hlavní požadavky:

- malá absorpce neutronů
- radiační, mechanická a chemická (korozní) stabilita v provozních podmínkách a po celou dobu provozu
- vysoká tepelná vodivost

10.2 Povlakové materiály

- materiály:
 - slitiny hořčíku (Mg) - pro kovový uran a plynné chladivo; nemá nosnou funkci, **do 500°C**
 - slitiny zirkonia (Zr) - pro keramické palivo a H₂O/D₂O chladivo; má nosnou funkci, **do 500°C**
 - nerez ocel - pro keramické palivo a plynné chladivo při vyšších teplotách, resp. sodíkové chladivo u rychlých reaktorů; má nosnou funkci; **do 600-800°C**; **vyšší absorpce neutronů** než u slitin zirkonia
 - grafit - pro keramické palivo a plynné chladivo při velmi vysokých teplotách (He); má nosnou funkci; **do 1200°C**



zirkoniová trubka



zirkoniová tyč

10.3 Moderátory

- hlavní funkce:
 - zpomaluje neutrony až do oblastí tepelných energií
- hlavní požadavky:
 - **intenzivně** zpomalovat neutrony pružným rozptylem (srážkami)
 - málo pohlcovat neutrony
- mechanismus pružných srážek:
 - řídí se zákony klasické mechaniky – ráz dvou dokonalé pružných koulí
 - minimální ztráta energie při kluzné srážce, maximální ztráta energie při čelní srážce
 - při srážce záleží na velikosti jader (jedna srážka neutron-jádro vodíku může znamenat předání veškeré energie)
 - střední logaritmický dekrement energie ξ – charakterizuje účinnost moderátoru z hlediska průměrného poklesu energie neutronu při 1 srážce z energie E_1 na energii E_2 :

$$\xi = \ln \frac{E_1}{E_2}$$

- čím větší hodnota ξ , tím menší průměrný počet srážek na zpomalení

10.3 Moderátory

- kritéria pro posouzení moderačních vlastností

1. celkový počet srážek s - ξ stanovuje, kolik je potřeba v průměru srážek, abychom neutron zpomalili z počáteční energie E_0 na energii tepelných neutronů E_T :

$$s = \frac{\ln \frac{E_0}{E_T}}{\xi} = \frac{\ln \frac{2 \cdot 10^6}{0,025}}{\xi}$$

2. zpomalovací schopnost $\xi \Sigma_s$ - makroskopický účinný průřez charakterizuje materiál z hlediska objemové četnosti pružných srážek
 - míra účinnosti moderujícího prostředí, charakterizuje zpomalující schopnost všech jader v 1m^3 moderujícího materiálu
 - ↑ $\xi \Sigma_s$... ↓ rozměry AZ

10.3 Moderátory

- kritéria pro posouzení moderačních vlastností

3. moderační poměr (koeficient zpomalení) $\xi \Sigma_s / \Sigma_a$ – absorpce neutronů v moderátoru by měla být co nejmenší
 - charakterizuje moderující materiál z hlediska moderačních schopností a z hlediska ztrát neutronů absorpcí

**Je žádoucí, aby moderátor měl přijatelná všechna kritéria,
jinak je k moderaci nepoužitelný**

moderátor	ξ	s	Σ_s (barn)	Σ_a (barn)	$\xi \Sigma_s$	$\xi \Sigma_s / \Sigma_a$
H ₂ O	0,920	20	164	2,2	153	71
D ₂ O	0,509	36	35	0,0032	18	5670
Be	0,209	88	74	0,11	16	150
BeO	0,173	105	66	0,062	11	180
C	0,158	114	39	0,033	6,3	192
H	1,0	18				
D	0,725	25				
He	0,425	43				83
Na	0,084	217				1134
Fe	0,035	520				35
²³⁸ U	0,008	2170				0,0092

použitelné materiály:

- H₂O
- D₂O
- grafit

Charakteristiky některých moderátorů

10.4 Chladivo

- hlavní funkce:
 - chladit AZ
- hlavní požadavky:
 - málo pohlcovat neutrony
 - dobře odvádět teplo z AZ
 - možnost ohřátí na vysokou teplotu
- další požadavky
 - nízká a krátkodobá indukovaná radioaktivita
 - dostatečná stabilita při provozních teplotách
 - nízká náchylnost ke korozi a erozi vůči materiálům I.O.
 - přijatelné náklady na chladivo a jeho údržbu
- používané materiály:
 - CO_2
 - He
 - H_2O
 - D_2O
 - **tekuté kovy** (Na, Pb-Bi) – pro rychlé reaktory

10.5 Materiály absorbátorů

- hlavní funkce:
 - silná absorpce neutronů
- používané materiály:
 - absorpční tyče
 - **Bór (B)** – složení: B_4C , ZrB_2
 - **Kadmium (Cd)** – používaly se zejména dříve
 - **Gadolinium (Gd)** – vzácná zemina, vyhořívající absorbátor (Gd_2O_3)
 - gadolinium se při výrobě paliva zavádí do vybraných palivových článků, kde má několikaprocentní zastoupení
 - tekutý absorbátor
 - **Bór (B)** - kyselina boritá (H_3BO_3) rozpuštěná v chladivu (H_2O)

10. Materiály aktivní zóny jaderných reaktorů

výstupy z kapitoly

obecně

- hlavní požadavky
- používané materiály
- hlavní materiálové vlastnosti

moderátory

- mechanismus pružných srážek
- střední dekrement energie
- kritéria pro posouzení moderačních vlastností