

6.3.1 Jaderné štěpení, jaderné elektrárny

Předpoklady:

Druhý způsob výroby energie – štěpení těžkých jader na jádra lehčí, lépe vázaná. Postupný rozpad těžkých nestabilních nuklidů probíhá v přírodě neustále je hlavní příčinou vysoké teploty zemského jádra.

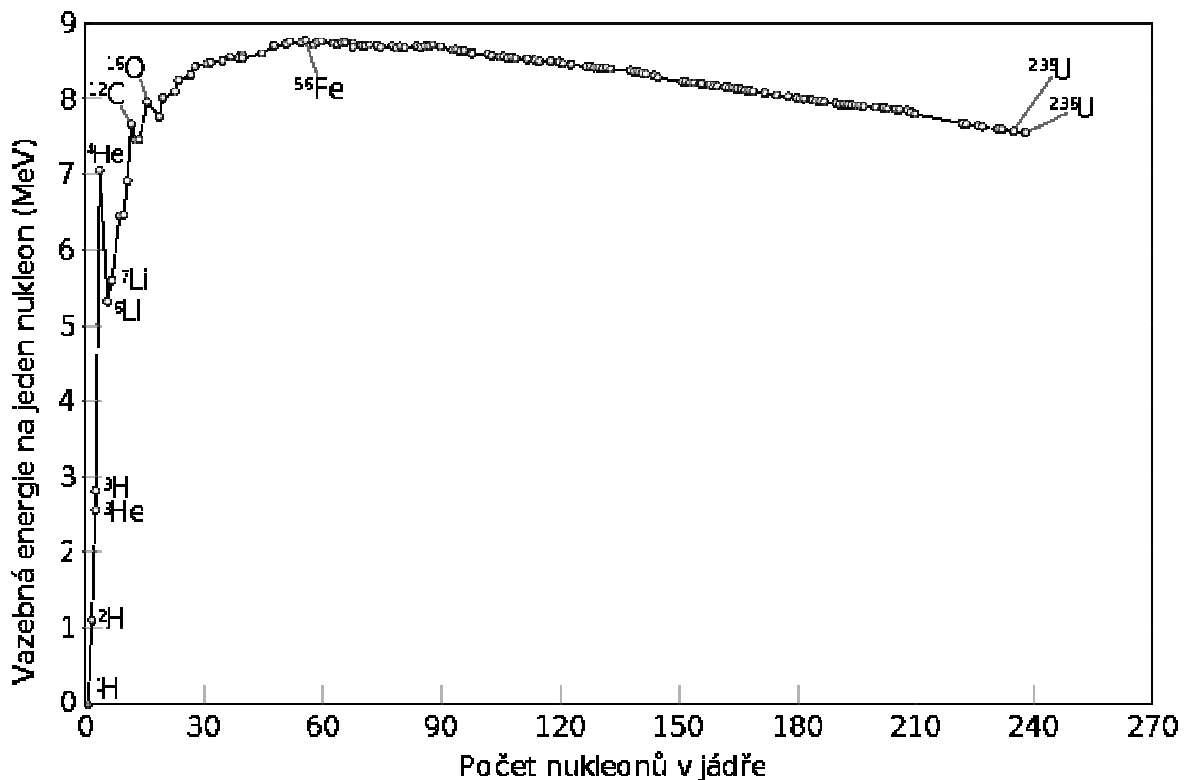
Problém: Přirozené radionuklidy se rozpadají velmi pomalu (jinak už by v zemské kůře neexistovaly) \Rightarrow je třeba najít způsob, jak je k rozpadu donutit.

Př. 1: Navrhni vhodný typ částice, kterou by bylo možné odstřelovat těžké prvky a tak je donutit k rozpadu a uvolnění energie.

Potřebujeme částici, kterou jádro nebude odpuzovat \Rightarrow můžeme se pokusit vyvolat rozpad odstřelováním neutrony.

Po pokusech s pomalými (tepelnými) neutrony o energii 0,04 eV se v uranu podařilo objevit stopy baria \Rightarrow dochází k rozbití uranového jádra: ${}_0^1\text{n} + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{56}^{144}\text{Ba} + {}_{36}^{89}\text{Kr} + 3{}_0^1\text{n}$ (jaderné štěpení).

Př. 2: Odhadni energii, která se uvolní při rozštěpení jádra uranu $^{235}_{92}\text{U}$ pomalým neutronem. Proč jsou vzniklé nuklidy radioaktivní? Jakým rozpadem se budou dále měnit?



Vazebná energie na částici v uranu je přibližně 7,5 MeV, vazebná energie jader s přibližně polovičním počtem nukleonů je přibližně 8,5 MeV. Při reakci se na každý nukleon uvolní přibližně 1 MeV, nukleonů v jádře je přibližně 200 \Rightarrow reakcí se uvolní přibližně 200 MeV. Jádro uranu patří mezi velmi těžké prvky, které mají větší převahu neutronů než prvky o střední hmotnosti, během rozpadu se samostatně oddělí pouze několik neutronů \Rightarrow vzniklá jádra mají větší převahu neutronů než by měla mít \Rightarrow vzniklá jádra se budou zbavovat přemíry neutronů \Rightarrow budou prodělavat zejména β rozpadů.

Přesným výpočtem z hmotnosti jader bychom zjistili, že rozpadem se uvolní 208 MeV, část této energie však odnesou pryč neutrina při následujících β rozpadech, takže využitelná energie reakce je okolo 200 MeV.

Dvě výhody uvedené reakce:

- Při reakci se uvolňuje velké množství energie.
- Reakci spouští neutron, při reakci vznikají další neutrony \Rightarrow rozpad jednoho jádra může vyvolat rozpady dalších jader \Rightarrow řetězová reakce.

Problémy:

- Většina přírodního uranu je izotopu $^{238}_{92}\text{U}$, který se tak snadno štěpit nedá, uranu $^{235}_{92}\text{U}$ je pouze 0,72%.
- Účinný průřez reakce se zvětšuje s poklesem rychlosti neutronu (neutrony uvolněné štěpením mají energii okolo 2 MeV a tedy velmi malý účinný průřez).

Obohacování uranu

Přírodní uran je nutné před použitím obohatit (zvýšit podíl uranu $^{235}_{92}\text{U}$ 2-4%). Pro obohacování se využívají odstředivky, technologie je náročná, provozuje ji pouze několik států na světě, které se snaží zabránit jejímu šíření kvůli nebezpečí obohacování uranu na atomové bomby.

Moderování

Neutrony vzniklé štěpením musíme v reaktoru zpomalit srážkami s jádry lehkých prvků (voda, těžká voda, grafit). Nejde jen o komplikaci, moderování umožňuje řídit reakci a automaticky ji zastavit, když reakce začne probíhat příliš rychle.

Další efekty, které ovlivňují uspořádání reaktoru:

- únik neutronů z paliva mimo reaktor,
- rezonanční záchyt částečně zpomalených neutronů v $^{238}_{92}\text{U}$.

Schéma tlakovodního reaktoru VVER 1000

Násobící faktor k - poměr neutronů, které vstupují do jedné fáze štěpení vůči počtu neutronů na počátku předchozí fáze štěpení.

- $k = 1$: přesně kritický režim, reaktor pracuje s konstantním výkonem
- $k > 1$: nadkritický režim, výkon reaktoru roste,

Většina reaktorů je nastavena tak, aby se bez další zásahů nacházely v nadkritickém režimu, a normální chod v přesně kritickém režimu je zajišťován vkládáním řídicích tyčí.

Př. 3: Jaké vlastnosti musí mít materiál řídicích tyčí?

Řídicí tyče musí dostat reaktor z nadkritického stavu do kritického stavu \Rightarrow musí zmenšovat počet neutronů \Rightarrow materiál řídicích tyčí musí pohlcovat neutrony (často se používá kadmium).

Př. 4: Moderátorem v tlakovodním reaktoru je chladicí voda, která odvádí z reaktoru vyráběné teplo do parogenerátorů, které vyrábějí páru do turbín. Využívá se jako moderátor hlavně kvůli tomu, že při nárůstu reakce automaticky zastaví reaktor. Jak?

Nárůst řetězové reakce \Rightarrow zvýšení teploty \Rightarrow voda se začne vařit \Rightarrow zmenší se hustota vody \Rightarrow méně srážek mezi rychlými neutrony a vodou \Rightarrow neutrony se méně zpomalují \Rightarrow neutrony špatně rozbíjejí další uranová jádra \Rightarrow reakce se sama zastaví.

Př. 5: Jaderné palivo pro elektrárny je vyráběno ve formě tablet, které obsahují oxid uraničitý a jsou potaženy vrstvou odolné slitiny. Jaký je důvod tohoto uspořádání?

Radioaktivní produkty štěpení zůstávají uvnitř tablet a neuvolňuje se do reaktoru.

Př. 6: Jaderné elektrárny (stejně jako ostatní tepelné elektrárny) se staví buď v blízkosti velkých řek nebo u břehu moře. Proč? Jaké má toto řešení nevýhody.

Potřeba velkého množství vody na chlazení.

Nevýhodou je nutnost přípravy na povodně nebo vlny tsunami.

Př. 7: Urči množství uranu ${}^{235}_{92}\text{U}$, které spotřebuje JETE za 24 hodin. Výkon elektrárny je 2000 MW. Předpokládej účinnost 30%.

Práce vykonaná elektrárnou: $W = Pt = 2000 \cdot 10^6 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ J} = 1,7 \cdot 10^{14} \text{ J}$.

Tepelný výkon reaktorů (příkon elektrárny): $\eta = \frac{P}{P_0} \Rightarrow P_0 = \frac{P}{\eta} = \frac{1,7 \cdot 10^{14}}{0,3} \text{ J} = 5,7 \cdot 10^{14} \text{ J}$

1 atom ${}^{235}_{92}\text{U}$...	200 MeV	...	$3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}$
$6,02 \cdot 10^{23}$ atomů	...	235 kg	...	$3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J} \cdot 6,02 \cdot 10^{26} = 1,9 \cdot 10^{16} \text{ J}$
		x kg	...	$5,7 \cdot 10^{14} \text{ J}$

$$\frac{x}{235} = \frac{5,7 \cdot 10^{14}}{1,9 \cdot 10^{16}} \Rightarrow x = \frac{5,7 \cdot 10^{14}}{1,9 \cdot 10^{16}} \cdot 235 \text{ kg} = 7,1 \text{ kg}$$

Jaderná elektrárna spotřebuje za den přibližně 7 kg uranu ${}^{235}_{92}\text{U}$.

Skutečná spotřeba uranu je asi o čtvrtinu vyšší, protože část uranu ${}^{235}_{92}\text{U}$ se znehodnotí pohlcením neutronů, které nevede k rozštěpení a tím k uvolnění energie.

V případě odstavení reaktoru a zastavení řetězové reakce, probíhají v palivu další radioaktivní přeměny a uvolňuje se značné množství tepla \Rightarrow i při vypnutí elektrárny je nutné zajistit chlazení reaktoru (u každého reaktoru jsou připraveny dieselagregáty, které musí v případě výpadku elektřiny zajistit chlazení odstaveného reaktoru).

Schéma jaderné elektrárny

Pár čísel o JETE

- Tepelný výkon reaktoru pro jeden blok 3000 MW, elektrický výkon 1000 MW
- Provozní tlak reaktorové nádoby 15,7 MPa, provozní teplota 290°C – 320°C
- V každém ze čtyř turbogenerátorů za hodinu 1470 tun vodní páry o teplotě 278°C a tlaku 6,3 Mpa.
- Čerpadla chladicího okruhu přečerpávají do chladicích věží až 17 m³/s.

Uranu ${}^{235}_{92}\text{U}$ je v přírodě málo \Rightarrow snaha využít i jiné izotopy uranu či jiné přírodní radionuklidy

Množivý reaktor

Reaktor, který využívá k udržení řetězové reakce nebrzděné rychlé neutrony:

nemá moderátor \Rightarrow vyžaduje podstatně vyšší obohacení štěpné látky (${}^{239}_{94}\text{Pu}$ a ${}^{238}_{92}\text{U}$).

Rychlé neutrony reagují s atomy ${}^{238}_{92}\text{U}$ a vytvářejí z nich další atomy ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ \Rightarrow reaktor více paliva produkuje než spotřebovává.

Zatím pouze experimentální reaktory.

Havárie jaderných elektráren

Černobyl

Reaktor moderovaný grafitem (tedy bez automatického uhašení, které mají reaktory klasické tlakovodní reaktory), voda reakci v reaktoru zpomalovala (pohlcovala neutrony zpomalené grafitem). Během pokusu s turbínou (zda dokáže při vypnutí elektřiny napájet chladicí

čerpádky) byl uměle snížen výkon reaktoru, protože výkon poklesl více než měl, byly vytaženy regulační tyče (a ty, které neměly být vytaženy). Po vypnutí čerpadel a odstavení turbíny se voda začala ohřívat vytvářet kapsy \Rightarrow přestávala pohlcovat neutrony \Rightarrow výkon reaktoru nekontrolovaně narůstal \Rightarrow snaha spustit regulační tyče. Spouštění tyčí bylo pomalé a tyče měly duté konce, jejichž zasunutí dále zvýšilo rychlost štěpení v reaktoru \Rightarrow ještě více vzrostla teplota \Rightarrow konce tyčí se roztavily a nešly zasunout do reaktoru \Rightarrow následoval výbuch a částečné rozmetání reaktoru. Je 26.4. 1986 1:24:00.

Další výbuch následuje, když se voda zahřívá od tavicích se palivových tyčí začne rozkládat na vodík a kyslík.

Typické komunistické pohrdání bezpečností a zdravím obyčejných lidí:

- Přes zprávy o zničení reaktorů, obsluha vyhlašuje, že nemá problémy a čerpá do reaktoru další vodu.
- Teprve 24 hodin po katastrofě bylo přiznáno zničení reaktoru, začínají se používat ochranné pomůcky a je nařízena evakuace blízkého města Pripjat'.
- 28.4. večer první oficiální informace.
- 1.5. probíhají oslavy Svátku práce, i v hlavním městě Ukrajiny Kyjevě (kde v té době dosahuje úroveň radioaktivity vrcholu).
- 12.5. Vláda zvyšuje nejvyšší povolenou dávku ozáření 25x, aby nebylo nutné přikročit k evakuaci dalších měst (například Kyjeva s několika milióny obyvatel).

Fukušima

Přílivová vlna o výšce 18 m zaplavila jadernou elektrárnu postavenou na pobřeží moře. Reaktory se podařilo včas odstavit, slaná voda však způsobila zkrat elektrických vedení a vyřadila z provozu chlazení reaktorů. Rozpad radioaktivních nuklidů vzniklých štěpnou reakcí reaktory přehřál a došlo k poškození jejich těsnosti a úniku radioaktivních látek do okolí.

Atomová bomba

I rychlý neutron může rozštěpit jádro, malou pravděpodobnost srážky je možné nahradit velkým počtem jader, které neutron během letu potká \Rightarrow možnost spuštění řetězové reakce i bez moderátoru, pokud je uran obohacený podstatně více než pro spalování v jaderném reaktoru. V každém kousku uranu probíhají neustále rozpady \Rightarrow pokud máme dostatečné množství (nadkritické) dostatečně obohaceného uranu, řetězová reakce se spustí sama. Stejným způsobem můžeme využít i plutonium.

Atomová bomba: dvě podkritická množství vysoce obohaceného uranu ${}_{92}^{235}\text{U}$ přitiskneme k sobě \Rightarrow spustí se neřízená řetězová reakce \Rightarrow výbuch.

Největším problémem při konstrukci atomové bomby je získání dostatečného množství dostatečně obohaceného uranu (nebo plutonia).

Shrnutí: Štěpením těžkých jader můžeme získávat energii.