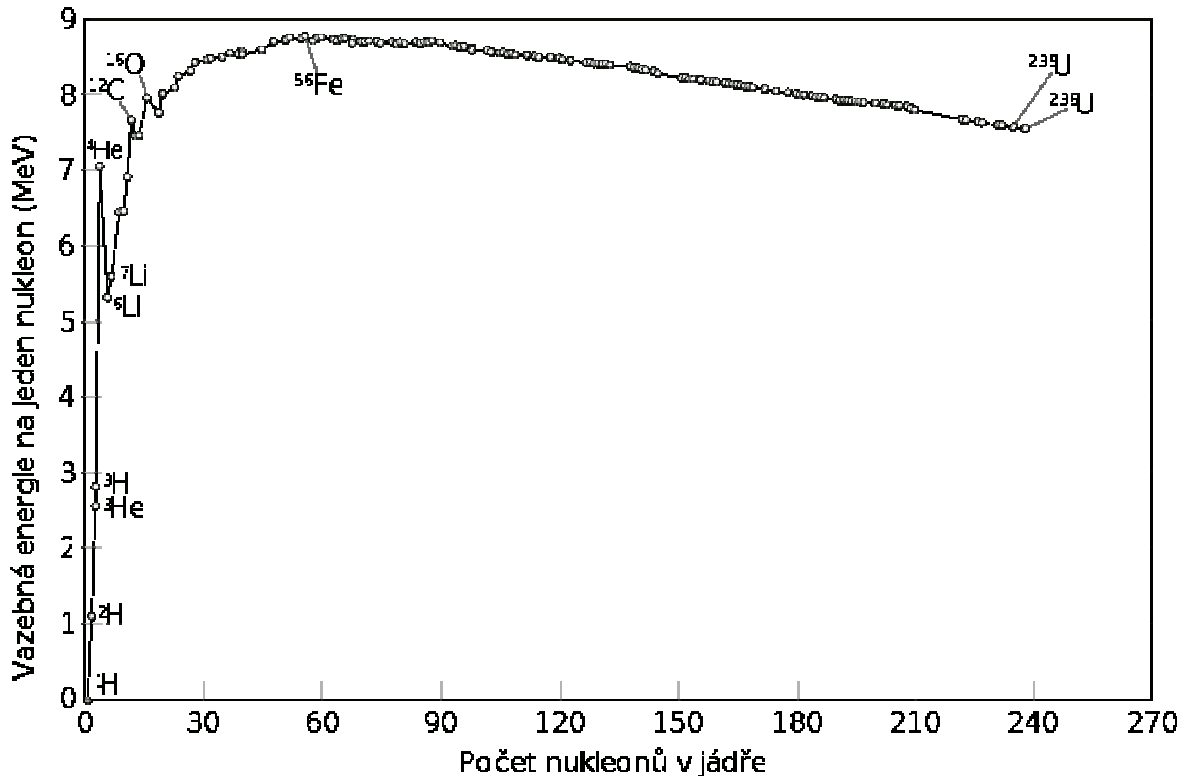


4.4.9 Energie z jader

Předpoklady: 040408

Graf závislosti vazebné energie na počtu nukleonů v jádře (čím větší je vazebná energie, tím pevněji jsou nukleony chyceny v jádře, tím menší mají energii a tím více energie odevzdávají, když se do jádra vážou).



Pokud změníme jádro s malou vazebnou energií na jádro s velkou vazebnou energií, zmenší se energie nukleonů v jádře \Rightarrow do okolí se musí uvolnit energie. Dvě základní možnosti, jak získávat energii z jaderných reakcí:

- slučování lehkých jader (jaderná fúze),
- rozbíjení těžkých jader (jaderné štěpení).

Slučování jader

Nejdůležitější reakce: proton-protonový cyklus ve Slunci

- ${}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu$
 $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$

srážka dvou vodíkových jader, velmi nepravděpodobná reakce, jen při jedné z 10^{26} srážek reakce proběhne, kromě jádra deuteria vzniká i pozitron (antičástice elektronu), který ihned reaguje s volným elektronem a anihiluje (zanikne a přemění veškerou hmotnost obou částic na energii ve formě EM záření)

- ${}^2_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$
- ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H}$

Z 1 kg vodíku se v *pp* cyklu uvolní $6,4 \cdot 10^{14}$ J (srovnání: spálením 1 kg černého uhlí se uvolní $3 \cdot 10^7$ J).

Roční výrobu energie v ČR 80 mil MWh by bylo možné při 30 % účinnosti pokrýt sloučením 1500 kg vodíku.

Kvůli malé pravděpodobnosti reakce ${}_1^1\text{H} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_1^2\text{H} + e^+ + \nu$ se nepočítá s využitím čistého *pp* cyklu pro výrobu energie.

Pravděpodobnější reakce:

- ${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_0^1\text{n}$ (vyžaduje tritium, kterého je málo a je radioaktivní \Rightarrow muselo by se vyrábět z lithia)
- ${}_1^2\text{H} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_2^3\text{He} + {}_0^1\text{n}$
- ${}_1^2\text{H} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_1^3\text{H} + {}_1^1\text{H}$

Podíl deuteria ${}_1^2\text{H}$ ve vodíku je pouze 1:6700, ale máme k dispozici jeho prakticky neomezené zásoby v mořské vodě.

Př. 1: K úspěšnému rozběhnutí termojaderného reaktoru musí být splněny tři podmínky. Zkus odhadnout které.

Musíme dosáhnout:

- dostatečné hustoty částic (abychom zajistili dostatečný počet srážek),
- dostatečně vysokou teplotu (aby částice při srážkách měly dostatečnou energii k překonání elektrického odpuzování),
- dostatečně dlouhou dobu (aby proběhlo dostatečné množství úspěšných srážek).

Největší problém: Potřebná teplota je řádově 10^8 K (100 miliónů stupňů celsia) \Rightarrow neexistuje žádný materiál, který by takovou teplotu vydržel \Rightarrow dvě možná řešení:

- magnetické udržování (**tokamak**): nádoba tvaru pneumatiky, rozžhavené plazma je udržováno magnetickým polem uvnitř tak, aby se nedotýkalo stěn, projekt ITER,
- inerciální udržování: pevná tableta s palivem je ze všech stran ozařována velmi výkonnými lasery \Rightarrow tlakem záření a tlakem odpařeného materiálu dojde ke stlačení vnitřku tablety a zažehnutí termojaderné reakce.

V současnosti není ani jedna z obou technologií zvládnuta tak, aby uvolňovala více energie, než je nutné do ní vložit.

Už padesát let se předpokládá, že do padesáti let bude termojaderná fúze zvládnuta a energetický problém lidstva vyřešen.

Studená fúze

Snaha donutit deuterium ke slučování pomocí katalyzátorů (inspirace v chemii) za běžné teploty. Dosud všechny pokusy se ukázaly jako omyl nebo podvod.

Principiální problém této „metody“: Kde se vezme těch potřebných řádově 100 N, které překonají elektrické odpuzování pomalých jader a donutí je přiblížit se tak, aby se začaly přitahovat jadernou silou?

Jaderné štěpení

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. 2: 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.

Typická reakce: ${}_0^1\text{n} + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{56}^{144}\text{Ba} + {}_{36}^{89}\text{Kr} + 3{}_0^1\text{n}$.

Z 1 kg uranu se štěpením uvolní cca $8 \cdot 10^{13}$ J.

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 rozpad dalších jader \Rightarrow řetězová reakce.

Problémy:

- Většina přírodního uranu je izotopu ${}_{92}^{238}\text{U}$, který se tak snadno štěpit nedá, uranu ${}_{92}^{235}\text{U}$ je pouze 0,72%.
- Reakce probíhá pravděpodobněji, pokud má neutron malou energii (řádově stokrát menší než mají neutrony při uvolnění z rozpadajícího se jádra).

Obohacování uranu

Přírodní uran je nutné před použitím obohatit (zvýšit podíl uranu ${}_{92}^{235}\text{U}$ na 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 reakci řídit a automaticky ji zastavit, když reakce začne probíhat příliš rychle.

[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 kadmínium).

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 neuvolňují 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.

Problém

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 se za hodinu vyrobí 1470 tun vodní páry o teplotě 278°C a tlaku 6,3 Mpa.
- Čerpadla chladicího okruhu přečerpávají do chladicích věží až 17 m³/s (průtok Vltavy v Českých Budějovicích).

Havárie jaderných elektráren

Černobyl

Reaktor moderovaný grafitem (tedy bez automatického uhašení, které mají klasické tlakovodní reaktory), voda reakci v reaktoru zpomalovala (pohlcovala neutrony zpomalené grafitem). Během pokusu s turbínou (zda dokáže při vypnutí elektřiny napájet chladicí čerpadla) byl uměle snížen výkon reaktoru, protože výkon poklesl více než měl, byly vytaženy regulační tyče (i ty, které neměly být nikdy 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.

Komunistické vedení tehdejšího SSSR nejdříve informace zcela tajilo, poté zkreslovalo, k ochranným opatřením přistupovalo pozdě a jen z části.

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 (alespoň 85 %). 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: