

JADERNÁ ENERGIE A TECHNOLOGIE PRO JEJÍ VYUŽITÍ

- 9.3 Jaderná energie
 - Vazebná energie ● Historické poznámky
- 9.5 Jaderné štěpení
 - Absorpce neutronů ● Štěpení uranu
- 9.9 Jaderná fúze
 - Lawsonovo kritérium ● Fúze vodíku
- 9.11 Jaderné štěpné reaktory
 - Historické poznámky ● Rozdělení reaktorů ● Tlakovodní reaktor
- 9.16 Jaderné fúzní reaktory
 - Reaktory s inerciálním udržením ● Reaktory s magnetickým udržením
- 9.19 Radioizotopové generátory
- 9.20 Jaderné elektrárny v ČR
 - Jaderná elektrárna Dukovany ● Jaderná elektrárna Temelín ● Ostatní štěpné reaktory
- 9.21 Jaderná elektrárna
 - Areál jaderné elektrárny ● Schéma zařízení jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem
- 9.25 Uran a palivový cyklus
 - Těžba a úprava uranové rudy ● Obohacování uranu ● Palivová kazeta
 - Přepracovací závod ● Mezisklad použitého jaderného paliva ● Konečné úložiště radioaktivního odpadu
- 9.31 Jaderná bezpečnost
- 9.32 Úloha 1: Výpočet energie uvolněné při štěpné reakci a fúzní reakci
- 9.33 Odkazy
- 9.35 - 9.37 Přílohy

autor: ŠKORPÍK, Jiří – LinkedIn.com/in/jiri-skorpik

Datum vydání: Říjen 2011; Březen 2022; Leden 2024 (3. vydání+přejmenování z Jaderná energetika)

název: Jaderná energie a technologie pro její využití

web: transformacni-technologie.cz

provenience: Brno (Česká republika)

email: skorpik.jiri@email.cz

Copyright©Jiří Škorpík, 2011-2024
Všechna práva vyhrazena.

Jaderná energie

Pro energetické účely využívá lidstvo atomovou energií, respektive vazebnou energii nukleonů uvnitř jádra, pomocí jaderných reakcí jako je štěpení atomů v jaderných štěpných reaktorech (krátce jen jaderných reaktorech) a radioaktivních přeměn v radioizotopových generátorech. Energii uvolňovanou při slučování jader atomů v jaderných fúzních reaktorech jsme zatím schopni využít pouze neřízeně v termonukleárních zbraní, ale i v tomto směru probíhá výzkum k energetickému využití.

Vazebná energie

eV

Nukleon

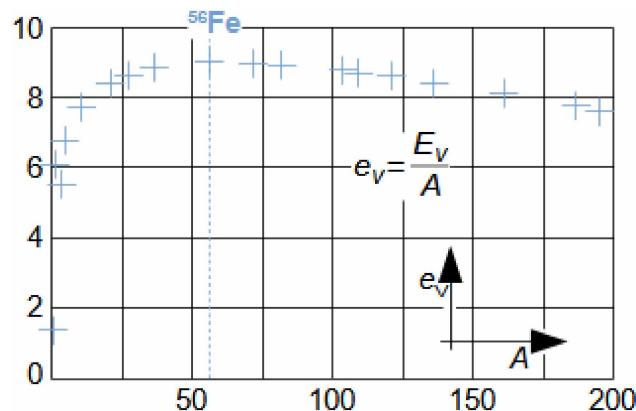
Kinetická energie

Jaderné štěpení

Radioaktivní přeměna

Jaderná fúze

Produkty jaderných reakcí a radioaktivních přeměn mají energii. Zatím co při chemických reakcích se uvolňuje maximálně několik desítek eV na atom, tak při jaderných přeměnách se může uvolnit až několik miliónů eV na jeden atom, viz [Úloha 525](#) (převodník jednotek energie eV na jednotky J je uveden například v článku Technická matematika [Škorpík, 2023]). Při jaderných reakcích se energie uvolňuje tím, že se mění jejich vazebná energie. Z [Obrázku 1](#) je patrné, že energie se uvolňuje při zvyšování počtu nukleonů v jádře přibližně do izotopu železa $^{56}_{26}\text{Fe}$, potom je nutné při zvyšování počtu nukleonů v jádře energii dodávat. Na druhou stranu při rozpadu jader těžších jak $^{56}_{26}\text{Fe}$ na dvě jádra lehčí, budou mít tato nová jádra menší vazebnou energii, než původní jádro a energie se tedy uvolnila. Ke změně počtu nukleonů právě dochází bud' při štěpení, radioaktivních přeměnách nebo fúzi. Typickým projevem takové jaderné reakce pak je uvolnění velkého množství energie ve formě kinetické energie produktů reakce a fotonů.



1: Přibližný trend změny vazebné energie připadající na jeden nukleon jádra atomu

A [-] počet nukleonů v jádře; E_V [MeV] vazebná energie jádra; e_V [MeV] vazebná energie v jádře atomu připadající na jeden nukleon. Obrázek je převzat z článku Úvod do světa atomů a molekul [Škorpík, 2022].

Jaderná energetická zařízení

Jaderná energie pro energetické účely je uvolňována v zařízeních k jaderným reakcím uzpůsobených, které jsou konstruované tak, aby energii uvedených jaderných dějů co nejefektivněji transformovaly na teplo, které je z nich odváděno pro další využití obvykle v tepelném oběhu k výrobě práce.

Historické poznámky

Štěpení jader
Ernest Rutherford

¹⁴N
John Cockcroft
Ernest Walton
Urychlovač častic

Neutron
James Chadwick
Otto Hahn
Lisa Meitnerová

Jaderná fúze
William D. Harkins
Mark Oliphant

Myšlenky umělého rozbití atomu přišly ihned po odhalení podstaty radioaktivity radioizotopů. V knize Zákony přírody [Peierls, 1963, s. 241] je uvedeno, že o možnosti toho, že atomy lze rozbit i uměle uvažoval už Ernest Rutherford, který pozoroval výskyt atomů ¹⁷O po ozařování atomů ¹⁴N α -zářičem už v roce 1919, ovšem neznal přesný mechanismus rozpadu dusíku. V roce 1932 bylo provedeno britským fyzikem Johnem Cockcroftem (1897–1967) a irským fyzikem Ernestem Waltonem (1903–1995) štěpení jader lithia pomocí urychlených jader vodíku v urychlovači častic. Tyto způsoby štěpení jsou samozřejmě energeticky výrazně nákladnější, například v experimentech v roce 1932 bylo potřeba k rozštěpení jednoho jádra lithia asi 500 000 protonů urychlených na 250 000 V [Běhounek, 1945, s. 229], i když toto množství klesá s rostoucí energií těchto častic.

Štěpení energeticky "snadným" umožnil až objev neutronu v roce 1932 britským fyzikem Jamesem Chadwickem (1891–1974). Prvním vědcem, kterému se podařil záměrný experiment se štěpením pomocí neutronů (bez urychlovače častic) byl německý fyzik Otto Hahn (1879–1968) v roce 1938. Výsledky experimentu ale správně zdůvodnila a popsala v témaže roce rakouská fyzička Lise Meitnerová (1879–1968) [Einstein, 1995, s. 122].

O možnosti jaderné fúze jako první publikoval americký fyzikální chemik William D. Harkins (1873–1951) už v roce 1915. Produkty umělé fúze byly poprvé zaznamenány v roce 1934 australským fyzikem Markem Oliphantem (1901–2000) při experimentech s urychlováním jader ²H. Výsledky tohoto experimentu, včetně energetických bilancí příslušných reakcí, publikoval společně s dalšími vědci pracující v Cambridge's Cavendish Laboratory v článku Transmutation Effects Observed with Heavy Hydrogen [Oliphant et al., 1934]. Za zmínu ještě stojí, že při tomto experimentu byl použit stejný urychlovač jako při prvním umělém štěpení provedené Cockcroftem a Waltonem o dva roky dříve, samozřejmě urychlovač byl značně upraven.

Jaderné štěpení

Při štěpení se původní jádro rozštěpí na dvě jádra, jejichž nukleonová čísla budou nižší. Štěpení probíhá vyvoláním silové nerovnováhy v jádru atomu obvykle pomocí neutronu, který je absorbován jádrem, přitom se může uvolnit i záření. Pro energetické využití se nejvíce uplatňuje štěpení uranu ^{235}U .

Absorpce neutronů

Kinetická energie neutronu

Termický neutron

Rychlý neutron

Účinný průřez pro absorpci neutronu

Radioaktivní přeměna

Štěpení

Řetězová reakce

Jaderná exploze

Kritické množství

^{235}U

^{239}Pu

Hodnotu pravděpodobnosti zachycení neutronu jádrem velmi ovlivňuje jeho rychlosť, čím je větší, tím se pravděpodobnost zachycení snižuje, proto mimo termických neutronů s kinetickou energií odpovídající kinetické energie molekul okolního vzduchu ještě rozlišujeme tzv. rychlé neutrony s kinetickou energií v řádech milión eV. Pravděpodobnost absorpce neutronu v dané látce za daných podmínek jádrem určité velikosti je vyjadřena účinným průřezem pro absorpci neutronu, dále jen účinný průřez. Čím je účinný průřez jádra větší, tím větší je i pravděpodobnost absorpce neutronu jádrem. Rychlý neutron snadno uniká silám silné interakce.

Pohltí-li jádro neutron stane se z něj rázem jiný izotop, navíc se zvýší energie jádra o kinetickou energii neutronu, kterou musí jádro vstřebat [Heisenberg, 1997, s. 178]. Takto změněné jádro na neutron reaguje buď, tím, že se z něj stane radioaktivní izotop (a následuje radioaktivní přeměna [Škorpík, 2024]), nebo právě rozštěpením. Pokud uvolněné neutrony způsobí štěpení dalších jader sousedních atomů, potom nastala řetězová reakce, která je buď řízená, nebo neřízená.

Jestliže máme v nějaký objem štěpitelného materiálu s velkým účinným průřezem pro obsorpci neutronů, tak při neřízeném štěpení dojde prakticky okamžitě k jaderným reakcím v celém objemu štěpitelného materiálu (lavinovité štěpení) po uvolnění prvních neutronů. Aby se tak stalo, musí tento objem štěpitelného materiálu být velice čistý (tzv. zbrojná kvalita) a mít určitou hmotnost (kritická hmotnost). Jako palivo pro takovou lavinovitou štěpnou reakci se nejčastěji používá čistý izotop uranu s nukleonovým číslem 235 (^{235}U) nebo ^{239}Pu . Kritické množství u izotopu ^{235}U je cca 50 kg, u izotopu ^{239}Pu je 15 kg [Vacík a kol., 1995, s. 222]. Pro lavinovité štěpení je charakteristický jaderný výbuch, tedy okamžité uvolnění jaderné energie, které se využívá v jaderných zbraní.

Štěpení v reaktoru

Štěpitelný izotop

^{235}U

Řízené štěpení jader se široce využívá v jaderných elektrárnách, ve kterých se pomocí tepelného oběhu (nejčastěji se jedná o parní oběh) transformuje teplo z jaderného štěpného reaktoru na práci. Vhodný izotop pro štěpení v takových reaktorech musí splňovat podmínu okamžité jaderné reakce, to znamená, že se od něj požaduje okamžité štěpení po absorpci neutronu, jinak se z něj stává pouze radioaktivní izotop, který se rozštěpí neznámo přesně kdy. Uvedeným podmínkám dobře vyhovuje izotop uranu ^{235}U .

Štěpení uranu

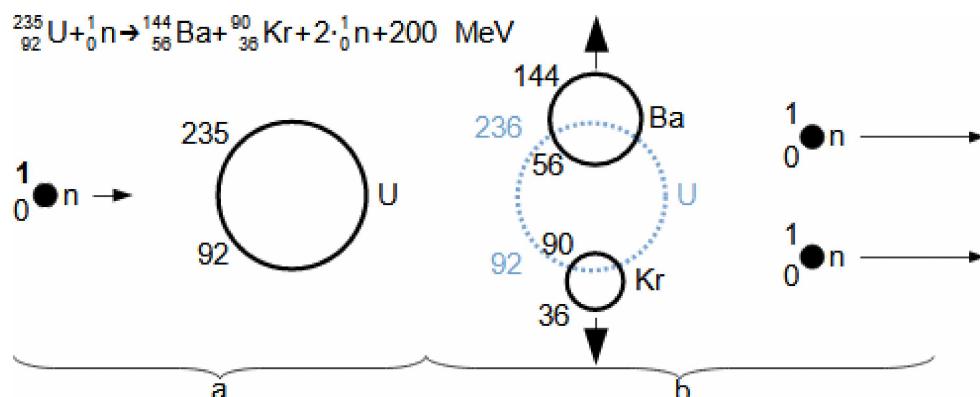
^{235}U

γ -záření

$^{144}\text{Ba} / ^{90}\text{Kr}$

$^{101}\text{Sr} / ^{133}\text{Xe}$

Štěpení jádra ^{235}U probíhá pomocí jednoho pomalého neutronu, viz [Obrázek 2](#). Po pohlcení neutronu vznikne izotop uranu ^{236}U . Tento izotop je vysoko nestabilní a je velmi vysoká pravděpodobnost (cca 88 %), že se ihned rozpadne na dvě jádra těžkých prvků (v opačném případě je pouze vyzářeno z jádra γ -záření). Nejčastěji to bývá dvojice ^{144}Ba a ^{90}Kr nebo ^{101}Sr a ^{133}Xe a odpovídající počet neutronů zachovávající nukleonovou bilanci.



2: Příklad štěpné reakce izotopu uranu ^{235}U

a-volný neutron je zachycen jádrem ^{235}U ; b-vzniklý izotop ^{236}U se rozštěpí na dvě těžká jádra přičemž se uvolní energie a několik neutronů.

Energetická rovnováha

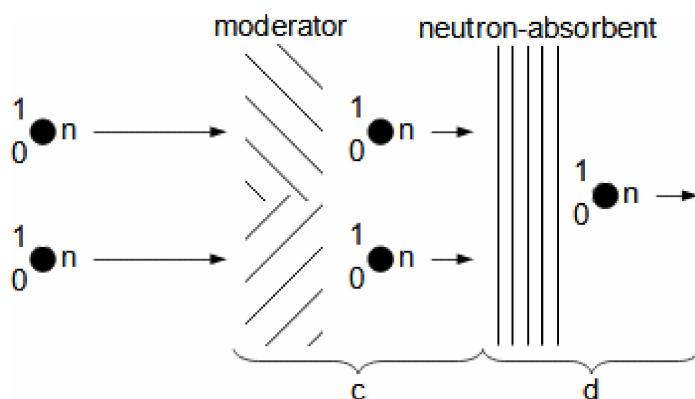
Nově vzniklá jádra mají v okamžiku vzniku vysokou kinetickou energii rovnající se přibližně energii 166 MeV. Nárazy jader do okolních atomů se snižuje jejich kinetická energie ve prospěch zahřívání okolní hmoty. Dále se uvolní energie ve formě kinetické energie sekundárních neutronů o celkové energii přibližně 6 MeV. Energie ve formě přímého gamma záření o celkové energii přibližně 10 MeV. Záření z radioaktivních přeměn produktů štěpení o celkové energii přibližně 18 MeV. Celkem se tedy při štěpení uvolní energie v různých formách o velikosti přibližně 200 MeV.

Rychlosti neutronů
Rychlé neutrony
Moderátor
Termické neutrony
Grafít
Voda

Počet neutronů
Absorbátor
Bór
Kadmium

Počet uvolněných neutronů při rozpadu izotopu ^{236}U závisí podle typu vzniklých jader. V případě Rovnice 2 se uvolnily dva neutrony. Rychlosť těchto neutronů je od 14 000 do 20 000 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ [Něstěrenko a kol, 1959, s. 30]. Tyto rychlé neutrony mohou být, s jistou, pravděpodobností zachyceny dalšími jádry ^{235}U , ale mnohem pravděpodobněji uniknout mimo objem látek připravených ke štěpení nebo jsou pohlceny jádry jiných izotopů, které se pak stávají radioaktivními [Horák a kol, 1961, s. 1352]. Proto se v reaktorech zvyšuje účinný průřez ^{235}U pro absorpci neutronů zpomalením neutronů pomocí moderátoru, Obrázek 3. Samotné zpomalení se děje ve formě pružných srážek neutronů s jádry moderátoru. Vlastnost moderátoru musí být taková, aby zpomaloval neutrony na požadovanou rychlosť, ale zároveň aby znatelně tyto neutrony nepohlcoval. Materiálem moderátoru proto bývají lehčí prvky obvykle ultra čistý grafít nebo voda – u lehkovodních reaktorů je současně i chladivem. Nejčastěji je snížena rychlosť neutronů na 2 až 4 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ podle teploty okolí. Při této rychlosći jsou neutrony v molekulárně kinetické rovnováze se svým okolím (rozsah rychlosťí odpovídá teplotám od 20 °C do 700 °C) jedná se tedy o termické neutrony. Nicméně maximální účinný průřez pro absorpci neutronu je při rychlosći neutronu 40 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ (kinetické energie neutronu 7 eV) [Něstěrenko a kol, 1959, s. 30-31]].

Abychom mohli ovlivňovat počet následujících štěpných reakcí, respektive výkon, musíme umět také počet neutronů regulovat. Regulace počtu neutronů se provádí pomocí absorbátoru (Obrázek 3). Absorbátor musí ve velké míře pohlcovat neutrony. To je například bór nebo kadmium.



3: Příklad řízení štěpné reakce izotopu uranu ^{235}U
(neutron-absorbent)-absorbátor; moderator-moderátor; c-snížení rychlosći neutronů ve hmotě moderátoru; d-zachycení nadbytečných neutronů ve hmotě absorbátoru.

Aktivní zóna
Základní stavů

Objem paliva, ve kterém probíhá řízená jaderná reakce se nazývá aktivní zóna. V aktivní zóně může z pohledu bilance neutronů nastat: podkritický stav; kritický stav nebo nadkritický stav. Tyto tři stavů se nazývají základními stavů aktivní zóny.

Podkritický stav

Jestliže počet štěpných reakcí způsobené neutrony uvolněné při štěpení v dané generaci je menší než počet štěpných reakcí v dané generaci, pak mluvíme o podkritickém stavu aktivní zóny. Ten může být způsoben úbytkem jader ^{235}U – spotřeba paliva, neutrony opouští aktivní zónu a zbylé neutrony nejsou schopny zajistit konstantní štěpný výkon, neutrony jsou absorbovány okolními látkami (příměsi v palivu) či absorbátoru. Tento stav je žádoucí například při snižování výkonu aktivní zóny.

Kritický stav

Jestliže počet štěpných reakcí způsobené neutrony uvolněné při štěpení v dané generaci je stejný jako počet štěpných reakcí v dané generaci, pak mluvíme o kritickém stavu aktivní zóny. Po štěpení jednoho jádra dojde k absorpci všech neutronů jinými než štěpitelnými jádry (nebo opustí aktivní zónu) kromě počtu neutronů potřebných k rozštěpení dalšího jednoho jádra ^{235}U . Kritickému stavu odpovídá konstantní výkon aktivní zóny/reaktoru.

Nadkritický stav
Havárie

Jestliže počet štěpných reakcí způsobené neutrony uvolněné při štěpení v dané generaci je větší než počet štěpných reakcí v dané generaci, pak mluvíme o nadkritickém stavu aktivní zóny. Neutrony vzniklé při štěpení jednoho jádra způsobí v průměru štěpení více jader. Tento stav je žádoucí například při zvyšování výkonu aktivní zóny. Neřízený nadkritický stav může způsobit přehřátí aktivní zóny a její destrukci. Jsou známy dvě havárie jaderných reaktorů kvůli nezastavení nadkritického stavu v aktivní zóně, a to havarie v Sovětské jaderné elektrárně Černobyl (1986) a amerického experimentálního reaktoru SL-1 (1961).

Multiplikační faktor

Výše uvedené tři stavů aktivní zóny vyjadřuje multiplikační faktor k [1], který je definován jako průměrný počet neutronů, které způsobily štěpení připadající na jeden neutron, který způsobil štěpení v předchozí generaci. Pokud je $k < 1$ jedná se o podkritický stav aktivní zóny; $k = 1$ jedná se o kritický stav aktivní zóny; $k > 1$ jedná se o nadkritický stav aktivní zóny. Regulace výkonu aktivní zóny se provádí změnou multiplikačního faktoru, respektive regulací počtu neutronů v aktivní zóně.

Regulační tyče
Absorbátor
Aktivní zóna
Zpožděné neutrony
Radioaktivní přeměny

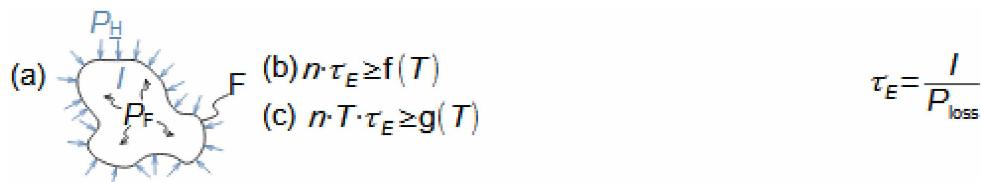
Výkon aktivní zóny v jaderném reaktoru se standardně reguluje pomocí regulačních tyčí obsahující absorbátor, které se do aktivní zóny zasouvají (výkon klesá) nebo vysouvají (výkon roste). Zasouváním regulačních tyčí dochází k pohlcování neutronů. Při přechodu ze stavu podkritického na nadkritický stav se musí tyče začít opět vysouvat a řetězová štěpná reakce se obnovuje pomocí zpožděných neutronů v aktivní zóně nebo jiného zdroje neutronů v okolí aktivní zóny. Zpožděné neutrony se uvolňují při radioaktivních přeměnách některých těžkých jader vzniklých při štěpení.

Jaderná fúze

Zatím co radioaktivní přeměny a jaderné štěpení může probíhat při normálních tlacích a teplotách tak jadernou fúzi lze ze ziskem energie provést pouze za velmi vysokých teplot a tlaků, aby jádra byla schopna překonat odpudivé síly. Je samozřejmé, že při těchto teplotách se už atomy nachází ve formě plazmatu. Tyto podmínky pro jednotlivé možné fúzní reakce lze stanovit pomocí Lawsonova kritéria, přičemž jedna z možných fúzních reakcí, se kterou se uvažuje v první generaci jaderných fúzních reaktorů je fúze jader vodíku.

Lawsonovo kritérium
Energetická rovnováha
Plazma
Tepelná energie
Tepelný příkon P_H
Hustota jader n
Fúzní výkon P_F
Ztrátový výkon P_{loss}
John D. Lawson
Doba udržení energie

Potřebné hodnoty stavových veličin pro jadernou fúzi lze stanovit z tzv. Lawsonova kritéria. Toto kritérium vychází z energetické bilance fúzní reakce, viz [Obrázek 4a](#). Jádra ve vyšetřovaném objemu musí nejprve překonat odpudivé síly je tedy nutné nejprve zvýšit tlak a teplotu plazmatu, respektive zvýšit jeho vnitřní tepelnou a tlakovou energii z vnějšku, přičemž jejich součet se v termodynamice nazývá entalpie, ale ve fyzice plazmatu se nazývá tepelnou energií. Dodaná energie z vnějšku za jednotku času na jednotku objemu plazmatu se nazývá tepelný příkon P_H . Při tomto stlačení a ohřevu dosáhne plazma teploty T a hustoty jader n . Při dosažení jistých velikostí těchto veličin dojde k fúzním reakcím s výkonem P_F v daném objemu. Současně plazma je ochlazováno (ztrácí energii) vyzařováním do okolí případně konvekcí, což se označuje jako ztrátový výkon P_{loss} . Právě tyto veličiny dal do matematických souvislostí britský inženýr a fyzik John D. Lawson (1923–2008) a v roce 1955 publikoval [Rovnici 4b](#), která se nyní nazývá po něm jako Lawsonovo kritérium.



4: Lawsonovo kritérium

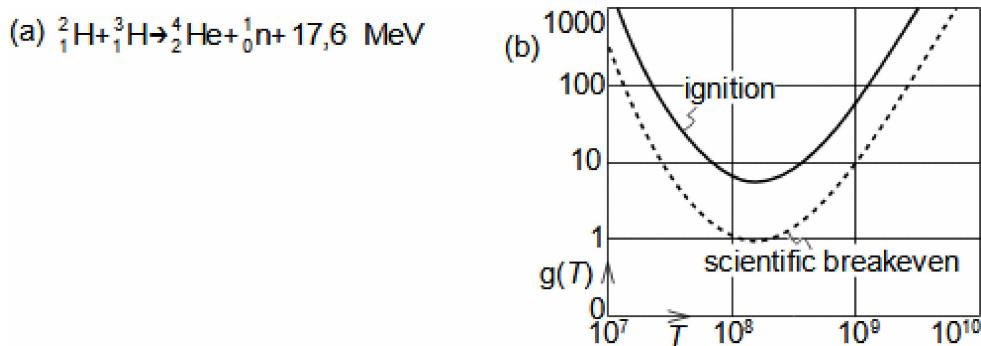
(a) energetická rovnováha 1 m^{-3} plazmatu; (b) Lawsonovo kritérium; (c) Lawsonovo kritérium pro případ konstantního tlaku plazmatu. F -vyšetřovaný objem fúzního paliva. I [$\text{eV}\cdot\text{m}^{-3}$] tepelná energie (entalpie) plazmatu v jednotce objemu; n [m^{-3}] hustota jader; P_F [$\text{eV}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$] fúzní výkon; P_H [$\text{eV}\cdot\text{m}^{-3}$] tepelný příkon pro 1 m^{-3} plazmatu dodávaný zvenčí; P_{loss} [$\text{eV}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$] ztrátový výkon; T [K] absolutní teplota – ve fyzice plazmatu se funkce $f(T)$ a $g(T)$ upravují tak, aby se za teplotu dosazoval součin $k \cdot T$, kde k Stefan-Boltzmanova konstanta, pak teplotu vyjadřují v jednotce eV; τ_E [s] doba udržení energie (energy confinement time).

Vědecké vyrovnaní
Zapálení
Inženýrské vyrovnaní
Jaderná fúzní elektrárna
Vlastní spotřeba

Tvar funkce $f(T)$, respektive $g(T)$ z [Rovnic 4](#) je závislý na energetické bilanci plazmatu, přičemž pro provozování fúzní reakce a její řízení jsou podstatné tři stavy. První stav se nazývá vědecké vyrovnaní (scientific breakeven), při které nastává rovnost $P_F = P_H$. Druhý případ energetické bilance je nazýván zapálení (ignition), při které nastává rovnost $P_F = P_{\text{loss}}$. Třetí případ energetická rovnováha se nazývá inženýrské vyrovnaní (engineering breakeven), při které se už fúze vyplatí energeticky tj. výkon P_F , respektive P_{loss} je tak vysoký, že pokryje veškeré energie pro chod jaderné fúzní elektrárny, pokryje tak zvanou vlastní spotřebu této elektrárny.

Fúze vodíku
Slunce
Inženýrské vyrovnaní

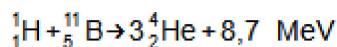
Z [Obrázku 1](#) vyplývá, že energeticky nejvýnosnější je fúze jader vodíku. Nicméně pro fúzi dvou jader "obyčejného" lehkého vodíku jsou nutné teploty a tlaky panující v jádru Slunce, které zatím ve fúzních reaktorech nejsme schopni napodobit. Technicky se jeví jako nejsnáze dosažitelné podmínky potřebné pro inženýrské vyrovnaní fúze izotopu vodíku ^2H (deuterium) a ^3H (tritium) podle [Rovnicí 5](#). Tato fúze deuteria a tritia je výhodná z toho důvodu, že pro dosažení zapálení je nutná nejnižší teplota a nejkratší doba udržení energie ze známých fúzních reakcí [Řípa a kol., 2005, s. 22].

**5:** Rovnice jaderné fúze vodíku

(a) rovnice fúze deuteria a tritia; (b) průběh funkcí $g(T)$ pro fúzní reakci podle Rovnice 5a. $g(T)$ [$10^{21} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s}$]; T [K]. Data pro graf byla čerpána z [Entler et al., 2019].

- Energetická rovnováha
- Bezneutronová fúze
- Magnetohydro-dynamický generátor

Problém uvedené fúzní reakce deuteria a tritia je v tom, že u této reakce je kinetická energie jádra helia asi jen 3,5 MeV, zbývající kinetická energie 14,1 MeV je v kinetické energii neutronu (problém neutronového bombardování nádoby reaktoru, tím se sice kinetická energie neutronu přemění na tepelnou /zpomalí/, ale bombardovaný materiál mění vlastnosti a stává se radioaktivním). Z toho důvodu se někdy v budoucnu, až bude zvládnuta fúzní technologie, počítá s fúzními reakcemi bezneutronovými. Mezi bezneutronové fúzní reakce patří například fúze 4 jader vodíku, což je úhrnná fúzní reakce probíhající v jádru Slunce, nebo fúze jádra vodíku a Boru podle Rovnice 6 [Entler et al., 2019]. Navíc budou vznikat jen elektricky nabité částice, které lze zpomalit přímo pomocí magnetohydrodynamického generátoru a odpadne nutnost transformace uvolněného tepla pomocí tepelného oběhu.

**6:** Příklad bezneutronové fúzní reakce

- Aktivní zóna
- Regulační tyče

Jaderné štěpné reaktory

Zatímco k objevům a teoretickým zdůvodněním jednotlivých jaderných jevů lze přiřadit konkrétní osoby, tak stavba a vývoj jaderných reaktorů už byla vysloveně doménou celých týmů vědců a konstruktérů z počátku masivně finančně podporovanou státem. Základní části jaderného reaktoru je aktivní zóna, která obsahuje štěpitelná atomová jádra. Touto aktivní zónou procházejí jednak chladící kanálky a jednak otvory pro vedení regulačních tyčí obsahující absrobátor. Nicméně existují i jiná kritéria, podle kterých lze reaktory řadit do typů, přičemž ten nejpoužívanější typ energetice je tzv. tlakovodní reaktor.

Historické poznámky

Enrico Fermi
Chicago Pile
Projekt Manhattan

První jaderný reaktor pro štěpení jader byl americký a postavil ho tým vedený italským fyzikem v emigraci Enricem Fermim (1901-1954). Reaktor byl spuštěn 2. prosince 1942 v Chicagu [Fermi, 1976], Obrázek 7 označovaný jako Chicago Pile (česky milíř). Reaktor měl výkon přibližně necelý kilowatt. Další navazující reaktory byly v USA postaveny a provozovány pro účely projektu Manhattan (vývoj atomové pumy), respektive za účelem tvorby plutonia v aktivní zóně reaktoru [Jungk, 1965].



7: Prosinec 1942 Chicago – kresba zachycuje spouštění prvního jaderného reaktoru

Všimněte si ruční manipulace s regulační tyčí. Autor obrázku: Gary Sheehan (1957) [Wikimedia Commons].

Obminsk
Nautilus

Mimo jaderných reaktorů pro zbrojný průmysl se masivně investovalo do vývoje jaderných reaktorů energetických především v USA a SSSR. Prvními aplikacemi energetických reaktorů byly reaktory spuštěné v roce 1954 v ruském elektrárně Obminsk (tři reaktory, každý jiné konstrukce, které poskytovaly celkově asi jen 5 MW elektrického výkonu – jednalo se o experimentální elektrárnu) a reaktor S2W instalovaný na jaderné ponorce Nautilus s výkonem 10 MW pro pohon a elektřinu pro lodní systémy.

Jaslovské Bohunice A1
Moderátor

První jadernou elektrárnou spuštěnou v ČSSR byla elektrárna Jaslovské Bohunice v roce 1972 (Slovensko, blok A1, palivo: přírodní uran, aktivní zóna chlazená plynem CO₂ amoderována těžkou vodou). Tato jaderná elektrárna byla téměř kompletně navržena a postavena československými podniky. Tato technologie jaderného reaktoru na přírodní uran se ale v Československu dále nerozvíjela a reaktor byl v provozu pouze do roku 1979.

Rozdělení reaktorů

Energie neutronů

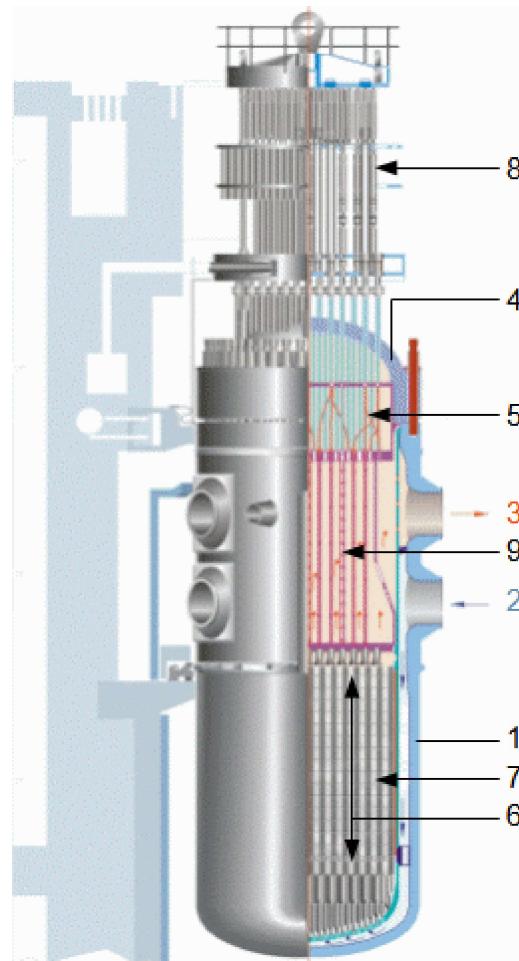
Jaderný reaktor je zařízení, ve kterém se realizuje řízená štěpná reakce. Dnes se používá několik typů reaktorů, které lze dělit podle různých kritérií (podle použitého chladícího média aktivní zóny reaktoru, jestli chladivo dosahuje varu či nikoliv, podle typu moderátoru...). Základním kritériem, podle něhož rozdělujeme reaktory na dvě podstatně odlišné skupiny, je energie neutronů v aktivní zóně. Podle tohoto kritéria rozlišujeme reaktory s termickými (pomalými) neutrony a reaktory pracující s rychlými neutrony. Naprostá většina energetických jaderných reaktorů světa pracuje se spektrem převážně termických neutronů. Říkáme jim proto reaktory pracující na termických neutronech. Každý takový jaderný reaktor musí obsahovat moderátor (reaktory rychlé pracují s rychlými neutrony a moderátor nepotřebují).

Moderátory
Tlakovodní reaktor
Varný reaktor

Podle typu použitého moderátoru pak lze reaktory dělit na lehkovodní (moderátorem i chladivo je „lehká“ voda), grafitové (moderátorem je grafit), těžkovodní (moderátorem je těžká voda). Do kategorie lehkovodních reaktorů patří i tzv. tlakovodní typ reaktorů (anglická zkratka PWR, ruská VVER), ve kterém je tlak vody takový, aby uvnitř reaktoru nedošlo k varu vody – jedná se o celosvětově nejrozšířenější typ jaderného reaktoru. Opakem tlakovadního je reaktor varný, ve kterém dochází k varu vody.

Tlakovodní reaktor
Palivová tableta
Palivový proutek
Palivový soubor
Palivové kazety

Palivo v tlakovodním reaktoru ([Obrázek 8](#)) je obvykle ve formě tablet skládaných do trubiček takže vznikne tzv. palivový proutek. Soubor těchto proutků se skládá do palivové šestihranné, nebo čtyřhranné kazety. Z palivových kazet je sestavena aktivní zóna uvnitř tlakové nádoby reaktoru. Výměna použitého paliva probíhá jednou za rok a půl při odstavení reaktoru. Obvykle se během této odstávky nahradí třetina palivových kazet.



8: Jaderný reaktor VVER 1000 (tlakovodní)

1-tlaková nádoba reaktoru; 2-přívod chladící vody; 3-odvod ohřáté vody do parogenerátoru; 4-víko tlakové nádoby; 5-vývody vnitroreaktorového měření; 6-rozsah aktivní zóny; 7-palivové a regulační kazety; 8-pohon regulačních tyčí; 9-ochranná trubka regulačních tyčí. Obrázek z Wikimedia Commons, autor Panther, obrázek upraven.

Regulační tyče

Mimo paliva mohou být v aktivní zóně reaktoru přítomny další typy aktivního materiálu ve formě tyčí používané k regulaci výkonu aktivní zóny tzv. regulační tyče. Regulační tyče obsahují nuklidu absorbátoru v různých koncentracích, podle účelu jejich použití a odtud se rozlišují tyče kompenzační, řídící a havarijní.

Kompenzační tyče	
Štěpitelné palivo	
H_3BO_3	
Reaktivita	
Základní absorpcce	

Kompenzační tyče se z aktivní zóny postupně vysunují tak jak se snižuje obsah štěpitelného paliva a naopak zvyšuje obsah produktů štěpení. U tlakovodních reaktorů částečně přebírá roli kompenzačních tyčí kyselina boritá H_3BO_3 přimíchána do chladící vody – tzv. základní absorpcce reaktoru. Koncentrace kyseliny borité je ve vodě snižována tak, jak se spotřebovává palivo v aktivní zóně. Kvantitativní veličina aktivní zóny, která řídí pohyb kompenzačních tyčí je reaktivita, která je definována Vzorcem 9.

$$\rho = \frac{k-1}{k}$$

9: Reaktivita aktivní zóny reaktoru

ρ [1] reaktivita.

Řídící tyče	
Výkon	
Multiplikační faktor	
Bor	
Kadmium	
Hafnium	

Havarijní tyče	
Rychlosť posuvu	

Havarijní a regulační soubor	
Palivová kazeta	
Klastr	

Kritická teplota vody	
-----------------------	--

Výkony reaktorů	
-----------------	--

Okamžité změny výkonu reaktoru se provádí pomocí řídících tyčí. Tyto tyče reagují na jakoukoliv změnu výkonu a podle okamžité potřeby se do aktivní zóny zasunují nebo se z ní vysunují, tím se udržuje stav aktivní zóny $\rho=0$. Účinnou složkou řídících tyčí, která absorbuje neutrony je většinou bór ve formě oceli legované bórem, řidčeji kadmium nebo hafnium ve formě slitin.

Štěpnou reakci lze okamžitě zastavit zasunutím havarijních tyčí do aktivní zóny, například v případě nenadálých událostí, na které už nestačí kompenzační a řídící tyče. Havarijní tyče mají podobné složení jako řídící tyče, ale za normálních podmínek jsou zcela vysunuty a mají rychlejší mechanismus zasouvání.

U moderních reaktorů typu PWR/VVER přejímají všechny tři výše uvedené funkce zařízení nazývané havarijními a regulačními soubory. Ty mají tvar jako palivové kazety, ale vedle paliva obsahují tzv. klastry. Klastry jsou duté trubičky v palivovém souboru, uvnitř kterých se pohybují regulační tyče, viz Obrázek 10.



10: Palivová kazeta pro VVER 1000 od firmy TVEL
1-palivové proutky (312 ks); 2-trubičky pro klastrovou regulaci. Hmotnost kazety: 681 kg, délka kazety: 4570 mm. Obrázek [TVEL Fuel Company, 2010].

Teplo vzniklé v aktivní zóně reaktoru je odváděno ve formě ohřáté vody pod vysokým tlakem tak, aby nedošlo k varu chladící vody (odtud tlakovodní reaktor). Teplota vyrobené páry v tlakovodním jaderném reaktoru nesmí přesáhnout kritickou teplotu vody. Teplota vyrobené páry bývá ale nižší cca 320 °C (obvykle <300 °C), a to z technických (přestup tepla v parogenerátoru) a bezpečnostních důvodů. Na druhou stranu jaderné reaktory mohou být zdrojem tepla o vysokém výkonu.

Maximální tepelné výkony jaderných reaktorů se pohybují od několika kilowattů (experimentální) přes několik desítek megawattů (lodě, ponorky) až po jednotky GW (elektrárny).

Jaderné fúzní reaktory

V současnosti je sice uskutečnována jaderná fúze v experimentálních reaktorech, ale zatím ještě nedosáhl žádný experiment alespoň hodnot pro vědeckého vyrovnaní. Prozatím se váženě uvažuje pouze o dvou typech jaderných fúzních reaktorů. Prvním typem je reaktor s inerciálním udržením a druhým s magnetickým udržením.

Reaktory s inerciálním udržením

George

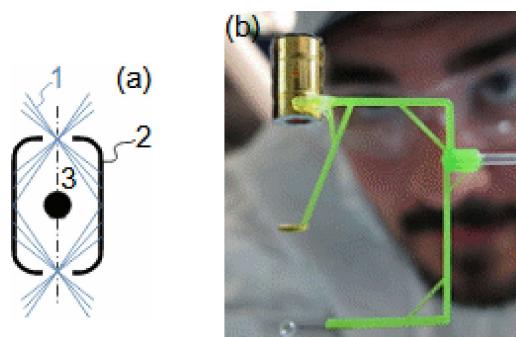
Zapálení

Edward Teller

Lasser
hohlraum
NIF Laser

Za první úspěšnou energeticky kladnou realizaci fúzní reakci lze považovat test fúzní principu spuštěného masivním γ -záření zaměřené na kapsli obsahující směs deuteria a tritia, která byla tímto zářením stalčena. Tento test proběhl pravděpodobně 9. května 1951 (exploze George), kdy potřebný tok γ -záření byl generován štěpnou explozí uranové nálože. Celý test byl uskutečně se záměren ověřit princip termonukleární bomby [Hnatowitcz, 2024, s. 186]. Protože tento způsob stlačení je děj setrvačný, tak se nazývá inerciální udržení. Za vynálezce inerciálního stlačení je považován americký fyzik maďarského původu Edward Teller (1908-2003) [Kraus, 2014].

V jaderných fúzních reaktorech s inerciálním udržením není využíváno jaderných explozí ke generování γ -záření, ale laserů, které generují toto záření ozařováním vnitřního pláště komory (tzv. hohlraum) s palivem, viz [Obrázek 11](#). Podmíkou je, aby plášt' komory byl z materiálu, který po ozaření laserem uvolňuje γ -záření, což je například zlato. Existují také realizace, kdy je mohutný svazek laserových paprsků nasměrován přímo na palivo ve tvaru kuličky z mnoha stran, ale tímto způsobem je vytvoření potřebného tlaku více energeticky náročný. Prozatím se takto podařilo vyrobít pomocí fúzní reakce v jednom pulsu 3,15 MJ energie v americkém zařízení NIF Laser v roce 2022.



11: Schéma inerciální jaderné fúze

(a) schéma inerciální jaderné fúze; (b) instalace terče (mražené palivo ve tvaru kuličky) do hohlraumu [obrázek: Lawrence Livermore National Laboratory];
1 svazky laserových paprsků; 2 hohlraum; 3 terč.

Reaktory s magnetickým udržením

TOKAMAK

Igor Kurčatov

Andrej Sacharov

Toroidální směr

Poloidní směr

Magnetické pole

Ohnický ohřev

Mikrovlnný ohřev

Kinetický ohřev

Fúzní energie

Chlazení

Vývěva

Faktor velikosti

Existuje více typů jaderných fúzních reaktorů s magnetickým udržením, přičemž jedno z nejslibnějších zařízení pro řízenou fúzi atomových jader je TOKAMAK (zkratka ruských slov: Торoidalная Камера и Магнитные Катушки – toroidální komora a magnetické cívky). V TOKAMAKu se uplatňuje princip magnetického udržení plazmatu v daném objemu bez styku s jinou hmotou. Myšlenka TOKAMAKu se zrodila v Sovětském svazu především zásluhou dvou ruských fyziků Igora Kurčatova (1903-1960) a Andreje Sacharova (1921-1989) v letech 1950 až 1952. TOKAMAK si můžeme představit jako dutou prstencovou komoru naplněnou plazmatem, která je obklopena magnetickými cívками a transformátorovým jádrem, Obrázek 12. V tokamaku rozlišujeme dva významné směry – toroidální a poloidální, a dva význačné poloměry – hlavní a vedlejší. Toroidální směr můžeme sledovat, vydáme-li se podél prstence, zatímco v poloidním směru bychom kroužili kolem komory v rovině kolmé na toroidální směr. Hlavní poloměr je poloměrem prstence. Vedlejší poloměr je poloměr zakřivení komory v rovině kolmé na toroidální směr.

Toroidální složka magnetického pole (o síle 1-10 Tesla) je vytvářena magnetickými cívками, poloidální složka je přibližně 100x menší a je indukována elektrickým proudem procházejícím vodíkovým plazmatem uvnitř komory. Součtem těchto dvou polí je šroubovicové elektromagnetické pole vytvářející prstenec uvnitř komory, ve kterém se udržuje plazma. K ohřevu plazmatu se používají tři metody, jednak se ohřívá ohmickým odporem plazmatu (elektrický proud v poloidálním směru), jednak ho lze ohřívat mikrovlně z vnějšku (princip mikrovlnné trouby) a nejvíce je ohříváno bombardováním urychlených částic (atomy těžkého vodíku). Tyto částice jsou injektovány v tečném směru do plazmatu, po průniku elektromagnetickým polem se přirozeně uvnitř plazmatu ionizují a stávají se i palivem [Eltner et al. 2019, s. 46]. Každý způsob ohřevu má svůj účel v různých režimech provozu TOKAMAKU, a potřeba těchto ohřevů se snižuje, tak jak se zvyšuje výkon fúzních reakcí.

Teplo s TOKAMAKů je odváděno chladícím systémem jeho pláště. Produkty fúze a částice uvolněné při bombardování pláště reaktoru zářením jsou odváděny vývěrou ve spodní části toroidu. Charakteristickým rysem TOKAMAKů je, že udržení plazmatu je tím snazším, čím je jeho rozměr větší, mimo jiné proto, že vysoké tlaky a teploty může nahradit velkým objemem – při zachování hodnoty pravděpodobnosti vzájemných srážek jader, viz Lawsonovo kritérium.

TOKAMAK JET

ITER

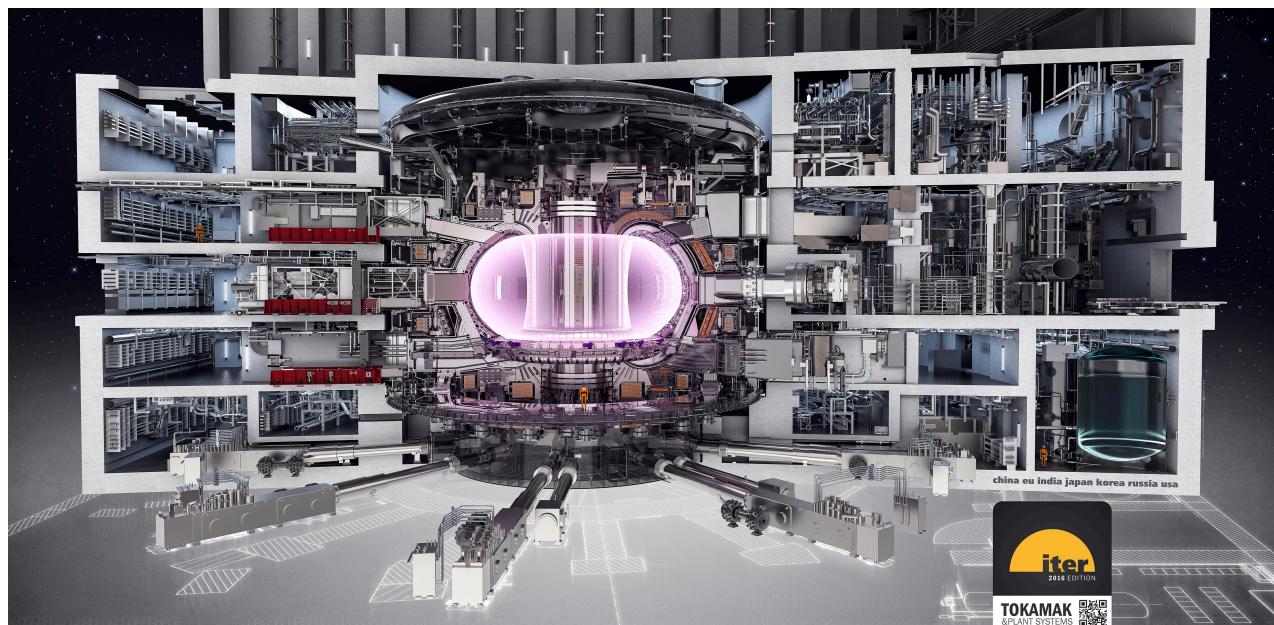
Jaderné štěpení

Lithium

Tritium

Tokamaků je po světě v provozu relativně velké množství (jen v ČR jsou tři). Prozatím se podařilo v TOKAMAKU vyrobit v jednom pulsu trvajícím 5 s 69 MJ energie v TOKAMAKu JET v Oxfordshire (UK) v roce 2021. Tento TOKAMAK je už v současnosti (2024) mimo provoz.

V červnu 2005 podepsali zástupci Evropské unie, USA, Japonska, Číny, Ruska a Jižní Koreje smlouvu o společné spolupráci na budování takového reaktoru pod pracovním názvem ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) o výkonu 500 MW. V případě reaktoru v rámci projektu ITER se předpokládá výroba tritia přímo uvnitř reaktoru štěpením lithia na vnitřním povrchu reaktoru neutrony. Výroba tritia mimo reaktor je totiž velmi drahá a je stejně nutné použít některou z jaderných metod výroby, protože tritium je v přírodě extrémně vzácné. Provoz tohoto fúzního reaktoru bude přetržitý, což je dáno transformátorovou povahou cívek, kdy pro indukci je nutné proměnné napětí [Eltner et al. 2019, s. 31].



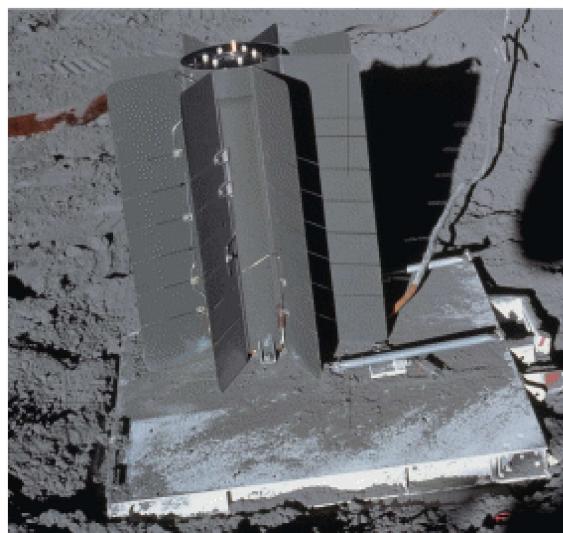
12: Jaderný fúzní reaktor typu TOKAMAK v ITERU

Obrázek [Obrázek: iter.org].

Radioizotopové generátory

Radioaktivita
Termoelektrický
generátor
Stirlingův motor

V radioizotopových generátorech probíhá transformace tepla na elektrinu pomocí termoelektrických generátorů, přičemž teplo vzniká při radioaktivních přeměnách radionuklidů uvnitř generátoru, Obrázek 13. Takové zařízení je sice jednoduché a spolehlivé, ale má také nízkou účinnost transformace tepla na elektrinu. Proto se experimentuje i s využitím transformace tepla pomocí Stirlingova motoru [Škorpík, 2013]. Další nevýhodou je nemožnost regulace – maximální množství tepla je uvolňováno při čerstvé náplni radioaktivních látek – pak, jak se jadra radioizotopů rozpadají, postupně jeho výkon klesá.



13: Radioizotopový generátor zanechaný posádkou Apolla 14 na měsíci jako zdroj elektriny pro napájení měřících stanic

Jedná se o generátor typu SNAP-27 RTG o elektrickém výkonu 70 W, ve kterém byl zdrojem tepla rozpad ^{238}Pu o hmotnosti 3,8 kg. Plutoniová náplň je válcovitého tvaru, přičemž mezi ní a válcovým pláštěm jsou umístěny termočlánky (442 kusů), které jsou druhou stranou připojeny k chladícím plochám – na obrázku jsou dobře patrný. Uvnitř pláště byla teplota 600 °C, na chladících plochách už jen 275 °C. Výška zařízení je necelého 0,5 m. Technické údaje [Anon., 2020], obrázek [Wikimedia Commons].

Ostrovní provoz
Kosmický prostor
Mound Laboratories

Radioizotopové generátory jsou bezobslužné velmi jednoduché zdroje elektrické energie, v drtivé většině určené pro práci v ostrovním provozu například v kosmickém prostoru nebo v odlehlych koutech Země bez možného přístupu obsluhy. První zařízení byla vyvinuta ve vojenských laboratořích Mound Laboratories v USA v roce 1954. Naproti tomu se jedná o potenciálně nebezpečné zařízení pro uživatele, pokud by došlo k narušení ochranného obalu, protože uvnitř je radioaktivní materiál, což výrazně zvyšuje požadavky na bezpečnostní opatření, zejména při pilotovaných kosmických letech.

Jaderné elektrárny v ČR

V České republice jsou v současnosti dvě jaderné elektrárny a několik dalších jaderných zařízení. V roce 2019 dodaly uvedené dvě elektrárny cca 35 % z celkového množství dodané elektřiny do sítě v ČR přičemž představují pouze cca 18% celkově instalovaného výkonu v ČR [ERU].

Jaderná elektrárna Dukovany

Jaderná elektrárna Dukovany (EDU) byla dána do provozu v roce 1985 (dosažení kritického stavu u prvního bloku) a leží v kraji Vysočina v okrese Třebíč. V areálu jsou 4 bloky, respektive jaderné reaktory VVER-440 s celkovým elektrickým výkonem 1822 MWe po proběhlých rekonstrukcích.

Jaderná elektrárna Temelín

Jaderná elektrárna Temelín (ETE) byla dána do provozu v roce 2000. Leží v jihočeském kraji na sever od Českých Budějovic. V areálu jsou 2 bloky, respektive jaderné reaktory VVER-1000 s celkovým elektrickým výkonem 2000 MW (před rekonstrukcí turbín).

Ostatní štěpné reaktory ČVUT VR-1 (Vrabec) VR-2

LVR-15
LR-0

V České republice jsou mimo jaderných štěpných reaktorů v elektrárnách Temelín a Dukovany ještě 4 další reaktory. V Praze při fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT (Praha 8) jsou dva školní reaktory VR-1 a VR-2. VR-1 je reaktor bazénového typu s výkonem 0,1 až 1 kW. Používá uran obohacený na 19,7 % (pojem obohacování uranu je popsán kapitole Uran a palivový cyklus, s. 9.25). Reaktor VR-2 je podobné konstrukce, ale menší.

V Ústavu jaderného výzkumu v Řeži u Prahy je v provozu výzkumný a ozařovací reaktor LVR-15 do roku 2010 pracoval a uranem obohaceným na 36 %, ale z legislativních důvodů se od roku 2010 snížilo obohacení na 19,7 %, [Řež s.r.o.]. Maximální tepelný výkon reaktoru je 10 MW. Reaktor má řadu ozařovacích kanálů, v nichž tok neutronů dosahuje $10^{17} \dots 10^{18} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Reaktor slouží k výrobě radioaktivních nuklidů pro diagnostickou a terapeutickou nukleární medicínu a pro ozařovací zařízení v průmyslu, k aktivační analýze a ke studiu problémů reaktorové fyziky [Hála, 1998, s. 216]. V areálu je také reaktor LR-0 bazénového typu, který slouží jako vědecko-technická základna pro tlakovodní elektrárenské reaktory provozované v ČR.

Jaderná elektrárna

Jaderná elektrárna je komplex několika průmyslových budov, kde se zajišťuje provoz elektrárny a nakládaní s palivem. Na Obrázku 14 je celkový pohled na jadernou elektrárnu Dukovany, jejíž zařízení je zde popisováno.



14: Celkový pohled na areál jaderné elektrárny Dukovany

Fotografie: [ČEZ, a.s., 2007].

Areál jaderné elektrárny

- Budovy reaktorů
- Strojovny
- Chladící věže
- Úpravny vody
- Administrativní budova
- Pomocné provozy
- Diesel generátorové stanice
- Mezisklad použitého jaderného paliva

Samotný areál JE obsahuje následující provozy: budovy reaktorů a bezprostředně souvisejících provozů (etážerky – jedná se o konstrukce uvnitř budovy reaktoru na nichž jsou umístěny například dozory a další technická zařízení, jako jsou různé nádrže apod.), strojovny (zde jsou parní turbosoustrojí a s tím související zařízení), zásobní nádrže demivody, provozní budovy, administrativní budovu, úpravny vody, hasičský útvar, diesel generátorové stanice a naftové hospodářství, budovy aktivních pomocných provozů, zpracování nízko a středně aktivních odpadů, mezisklad použitého jaderného paliva, dílny a sklady strojní a stavební údržby, nízkotlaká turbokompresorová stanice a zdroje chladu, čerpací stanice chladící vody, chladící věže, ventilační komíny, úložiště nízkoaktivních odpadů, elektrorozvodny a trafostanice, vrátnice, čistící stanice průmyslové kanalizace. Mimo areál JE, se většinou vyskytují další sklady a napojení na infrastrukturu (napojení na železnici, silnice atd.), parkoviště, ale často i informační centra...

VE Dalešice
Rozvodna Slavětice
Meteorologický stožár

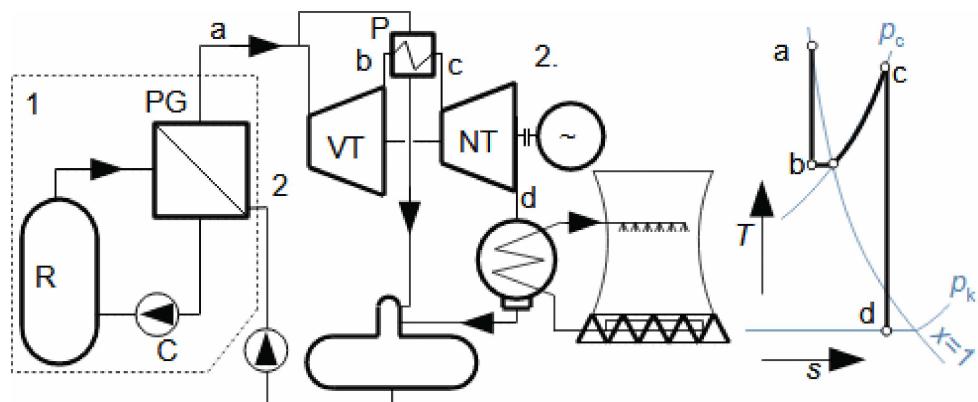
Reaktorová budova
Kontejment
Barbotážní věž

Schéma zařízení
jaderné elektrárny s
tlakovodním
reaktorem
Parní oběh
Parogenerátor
Primární okruh
Sekundární okruh

K samotné elektrárně jsou přidružené přímo další závody, které nemusí být v bezprostřední blízkosti elektrárny. Především se jedná o zdroje chladící vody, rozvodny elektriny, ze které je elektřina z elektrárny distribuována do nadřazené sítě apod. V případě EDU se jedná o přečerpávací elektrárnu Dalešice (výkon 4x112,5 MW, reverzní Francisovy turbíny, spád 90 m), která je tvořena vodními nádržemi Dalešice a Mohelno sloužící zároveň jako zásobárna vody pro jadernou elektrárnu (chlazení atd.). Za součást EDU můžeme považovat i rozvodnu Slavětice, kde se elektřina z EDU napojuje přímo na celorepublikovou přenosovou soustavu. Kousek od areálu elektrárny je také meteorologický stožár monitorující mimo jiné radiační situaci.

Jaderná elektrárna Dukovany je staršího typu než jaderná elektrárna Temelín, to je zřejmé zejména z konstrukce reaktorové budovy. V jaderné elektrárně Temelín jsou reaktory umístěny v tzv. kontejmentech, které jsou tlakutěsné a v případě úniku páry z reaktoru do reaktorového sálu lze snižovat tlak vodní sprchou. V případě jaderné elektrárny Dukovany není reaktorový sál ([Obrázek 17\(vlevo\)](#)) tlakovzdorný a pro snížení tlaku, respektive zamezení úniku radioaktivních částic v případě netěsností na reaktoru je vybavená tzv. barbotážní věží. Jedná se o pasívni bezpečnostní prvek pro snížení tlaku na budovu reaktoru při náhlém úniku chladiva reaktoru – barbotážní věž přímo navazuje na reaktorovou budovu, případně je její součástí. Při úniku páry z reaktoru by při průchodu nádržemi se studenou vodou pára kondenzovala a nekondenzující plyny by byly zadrženy ve speciálních prostorech.

V jaderné elektrárně dochází k transformaci tepla na elektřinu stejným způsobem jako v klasických elektrárnách. Rozdíl je pouze ve způsobu získávání tepla. Schéma zařízení jaderné elektrárny tvoří dva okruhy, a to primární a sekundární okruh, viz [Obrázek 15](#). V primárním okruhu obíhá chladící médium, které chladí reaktor a získané teplo předává v parogenerátoru přes teplosměnnou plochu do okruhu sekundárního, který je tvořen klasickým parním oběhem a technologiemi k nim náležejícími.



15: Schéma zařízení jaderné elektrárny s reaktorem VVER a expanze v parní turbíně

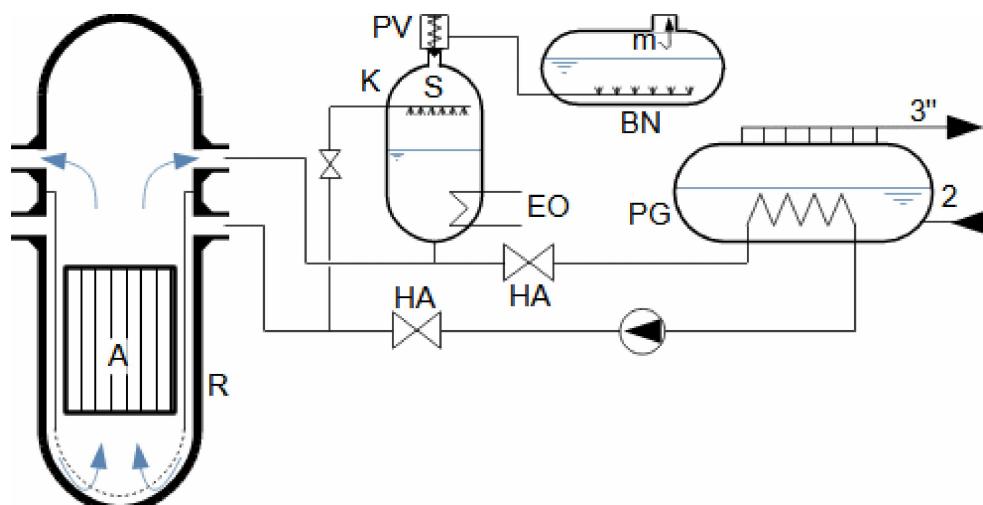
1 zařízení náležející do primárního okruhu; 2 zařízení náležející do sekundárního okruhu. R-jaderný reaktor; C-cirkulační čerpadlo; PG-parogenerátor; P-přihřívák; VT-, NT-vysokotlaké a nízkotlaké díly turbíny. T [K] absolutní teplota; s [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] měrná entropie vody/vodní páry; x [1] suchost páry; p_k [Pa] tlak kondenzace. a-syntá pára; b-mokrá pára (po expanzi); c-přehřátá pára; d-mokrá pára.

Tepelná účinnost

Tepelná účinnost jaderných elektráren je 25 % až 30 % (záleží na typu) bez započítání účinnosti zdroje – v ETE se z 1 kg paliva vyrobí přibližně 350 MWh elektřiny, při vztažení na obsah ^{235}U v palivu, kterého je v palivu 5 % a energie uvolněné při štěpení ^{235}U je čistá účinnost bloku přibližně 8,5 %).

Primární okruh
VVER
Kyselina boritá

Hlavními částmi primárního okruhu v EDU jsou: jaderný reaktor VVER (vodo-vodní energetický reaktor) a 6 chladících okruhů, přičemž každý obsahuje cirkulační čerpadlo, parogenerátor + potrubí a armatury (Obrázek 16). Jeden z chladících okruhů obsahuje také kompenzátor objemu a zařízení pro regulaci koncentrace kyseliny borité v chladící vodě.



16: Schéma primárního okruhu jaderné elektrárny Dukovany

R-reaktor; A-aktivní zóna; HC-hlavní cirkulační čerpadlo; HA-hlavní uzavírací armatura; K-kompenzátor objemu; S-sprchy kompenzátoru objemu; PV-pojišťovací ventil; BN-barbotážní nádrž; m-pojsitná membrána; EO-elektroohřívák.

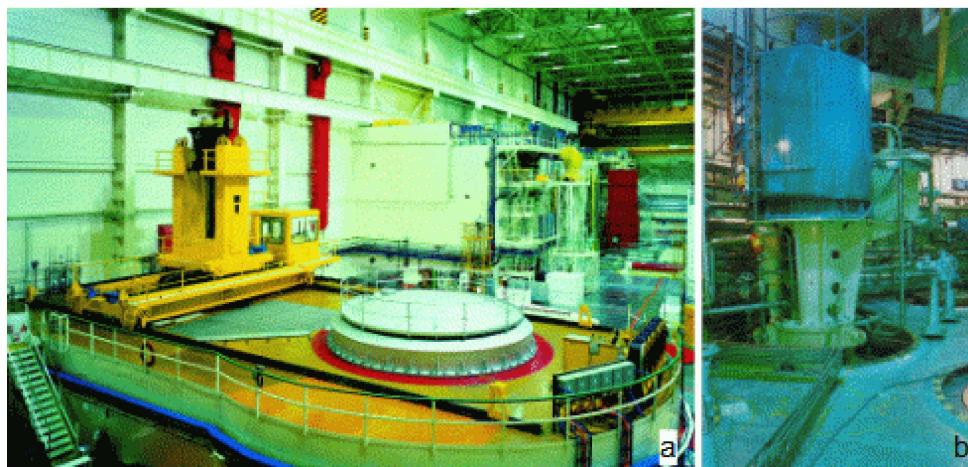
Hlavní cirkulační čerpadlo
Parogenerátor

V reaktoru je chladící voda ohřáta pod teplotu meze sytosti kapaliny, viz Tabulka 17. Tato voda cirkuluje mezi parogenerátorem a reaktorem pomocí hlavního cirkulačního čerpadla (Obrázek 18(vpravo)). Ohřátá voda ze reaktoru je odváděno do parogenerátoru, což je povrchový tepelný výměník. V parogenerátoru se přivádí k varu voda sekundárního okruhu, která opouští parogenerátor ve stavu syté páry.

	t_i	t_e	p
ETE	290	320	15,7
EDU	267	297	12,25

17: Parametry vody v reaktorech ETE a EDU

t_i [°C] teplota na vstupu; t_e [°C] teplota na výstupu; p [MPa] tlak v reaktoru.



18: Reaktorový sál (vlevo) jaderné elektrárny Dukovany a cirkulační čerpadlo (vpravo)

[Obrázky ČEZ, a.s.]

Kompenzátor objemu
Elektroohříváky

Pojistný ventil
Barbotážní nádrž
Pojistná membrána

Důležitým předpokladem správného chlazení reaktoru je udržování stálého tlaku chladícího okruhu. To se děje pomocí kompenzátoru objemu dvojím způsobem. Tlak lze snižovat sprchou se studenou vodou, která snižuje tlak sytých par nad hladinou kompenzátoru objemu, viz Obrázek 16. V případě, že je tlak naopak nutné zvýšit, pak se zapnou elektroohříváky, které jsou nainstalovány pod hladinou kompenzátoru.

V případě, že tlak v primárním okruhu vzroste nad povolenou mez je otevřen pojistný ventil a část páry z kompenzátoru objemu je vyfouknuta do barbotážní nádrže (jedná se o směšovací kondenzátor – pára probublává studenou vodou čímž kondenuje a zároveň vodu ohřívá kondenzačním teplem). V případě nárůstu tlaku v barbotážní nádrži praskne pojistovací membrána a část páry z barbotážní nádrže unikne do hermeticky uzavřeného prostoru, ve kterém je nádrž umístěna.

Sekundární okruh
Parní turbína
Přihřívání
Separátor vlhkosti

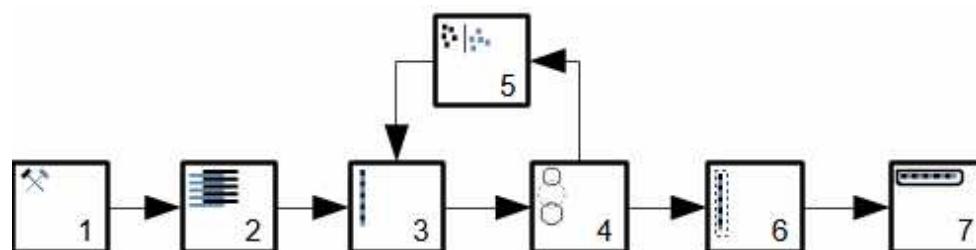
V sekundárním okruhu je zařazena parní turbína, ve které expanduje sytá pára, respektive mírně přehřátá o několik stupňů Celsia, viz Tabulka 19. Při expanzi syté páry z tak vysokého tlaku by pára na konci turbíny měla nízkou suchost páry, proto je expanze páry rozdělena na dvě části, viz Obrázek 15. Pára nejdříve o stavu sytosti-a vstupuje do vysokotlaké dílu turbíny, kde expanduje do tlaku p_c . Z vysokotlakého dílu turbíny neproudí pára do dalších dílů turbíny přímo, ale přes přihřívák, kde se její teplota zvýší téměř na teplotu páry v parogenerátoru, tedy při tlaku p_c bude výrazně přehřátá. Ještě před přihřívákem je ale separátoru vlhkosti z proudu páry. V nízkotlakých tělesech turbíny pára expanduje do tlaku v kondenzátoru.

	t_a	p_a
ETE	278,5	6,3
EDU	260	4,61

19: Parametry páry na výstupu z parogenerátorů v ETE a EDU
 t_a [°C] teplota na výstupu; p_a [MPa] tlak páry. Značení odpovídá Obrázku 15.

Uran a palivový cyklus

Energie obsažená v jednom kilogramu uranu je sice imponující, ale získat kilogram uranu ve formě vhodné pro jaderný reaktor je technologicky složitý a drahý proces, navíc při štěpení uranu ^{235}U vznikají v aktivní zóně reaktoru radionuklidy, proto použité palivo nelze jednoduše zneškodnit přírodní cestou, pouze recyklovat (přepracovat) nebo trvale uložit na bezpečné místo. Proces od o těžby uranové rudy přes použití vytěženého uranu v reaktoru až po jeho recylaci či uložení se nazývá palivový cyklus uranu, viz Obrázek 20.



20: Schéma palivové cyklu uranu

1 těžba a úprava uranové rudy; 2 obohacování uranu; 3 výroba palivové kazety; 4 štěpení v reaktoru; 5 přepracovací závod; 6 mezisklad použitého jaderného paliva; 7 hlubinné (konečné) úložiště radioaktivního odpadu.

**Těžba a úprava
uranové rudy**

Přírodní uran

Uran se těží obvykle klasickým hornickým způsobem. Přesněji těží se uranová ruda (Obrázek 21), ze které se dalšími úpravami separuje (například loužením) tzv. přírodní uran. Koncentrace uranu v uranové rudě závisí na nalezišti. Chudá rudná žíla obsahuje jen asi 2 až 3 g uranu na tunu rudy, bohaté rudné žíly obsahují od 10 do 30 kg uranu na tunu rudy [Kadrnožka, 2006]. Naproti tomu samotný přírodní uran je složen z izotopu ^{238}U (tvoří 99,282 % hmotnosti), izotopu ^{235}U (tvoří 0,712 % hmotnosti) a izotopu ^{234}U (tvoří 0,006 % hmotnosti) [Něstřenko, 1959, s. 21].

**21: Úlomek uranové rudy**

Obrázek ČEZ, a.s.

Dolní Rožínka
Mydlovary

V ČR byl uzavřen poslední důl na uranovou rudu v Dolní Rožínce v roce 2017. Úprava uranové rudy, která probíhala v MAPE Mydlovary nese sebou velkou ekologickou zátěž – laguny toxického a radioaktivního odpadu, které vznikly při loužení dodnes zůstávají na místě.

Obohacování uranu

Pro některé reaktory (včetně lehkovodních reaktorů) je potřebná koncentrace izotopu ^{235}U v palivu vyšší, než je v přírodním uranu. Zvyšování koncentrace jednoho izotopu uranu v palivu na úkor jiného je možné, buď oddělováním nežádoucích izotopů nebo obohacování/přidáváním požadovaného izotopu [Něstřenko, 1959, s. 21].

Obohacovací závod
Uranový koncentrát
 UF_6

Obohacený uran
 UO_2
Palivová tableta
Palivový proutek

Použitá palivová kazeta
Radionuklidy

Radioaktivní přeměny
Ionizující záření
Bazén použitého paliva
Stínení
Filtrace vody
Ředění vody

Obohacování je velmi složitý a finančně náročný technologický proces. Obohacování se provádí v obohacovacích závodech, které jsou pouze ve státech, které mají velkou spotřebu jaderného paliva, jako jsou USA, Německo, Rusko, Japonsko a další. Před obohacováním musí být původní uranová ruda přeměněna kombinací chemických a fyzikálních metod na uranový koncentrát zvaný „žlutý koláč“. Z něj je během dalšího zpracování získán UF_6 (fluorid uranový). Tento fluorid má vhodné mechanické vlastnosti pro obohacování zejména v tom, že fluorid se vyskytuje pouze v jednom typu izotopu, takže výsledná molekula UF_6 s ^{238}U je vždy o tři neutrony těžší než molekula s ^{235}U – na druhou stranu se jedná o vysoce toxickej a silně korozivní sloučeninu.

Obohacování se provádí například plynnou difuzí, odstřeďováním a nebo nejmoderněji pomocí laseru [csvts.cz, 2007] – obohacený přírodní uran obsahuje 95 % izotopu ^{238}U a až 5 % ^{235}U . Poté se obohacené palivo ve formě UO_2 lisuje a spéká do palivové tablety o průměru cca 1 cm a výšce 1 až 9 cm podle typu reaktorů, pro které jsou určeny (jsou hnědé barvy). Tyto tablety se na sebe skládají v trubičce ze slitiny zirkonia, přičemž mezi stěnou trubičky a tabletami je mezera vyplněná heliem. Tyto trubičky se hermeticky uzavřou a vznikne palivový proutek.

Palivová kazeta

Výroba palivové kazety (Obrázek 10) může probíhat mimo obohacovací závod z dodaných palivových proutků, protože se jedná sice o standardní strojírenský proces a tyto výrobní závody jsou ve více státech, např. ve Švédsku. Materiál palivové kazety je opět slitina zirkonia a nebo i z nerezové austenitické oceli.

Palivová kazeta vydrží podle typu reaktoru přibližně 4 roky v provozu za tu dobu se změní složení přibližně na 1 % ^{235}U , 1 % Pu, 3 % štěpných produktů a asi 95 % neškodného ^{238}U . A je zněj, na rozdíl od čerstvého paliva, vysoce radioaktivní materiál.

Použité palivové kazety se nejprve ukládají do bazénu vedle reaktoru (Obrázek 22), kde voda slouží jako chlazení pro teplot uvolňované z radioaktivních přeměn i jako stínění vznikajícího ionizujícího záření. V tomto bazénu se nachází po dobu několika let než aktivita použitého paliva podstatně neklesne. Během skladování jsou uvolňované částečky požitého paliva z vody odfiltrovány a zbylá voda je ředěná s „čistou vodou“, aby se snížil obsah tritia vzniklého z neutronového záření na požadovanou mez, pak je voda vypuštěna do přírody. Někdy bývá použité palivo vedle reaktoru skladováno po celou dobu životnosti elektrárny.



22: Zavážecí stroj nad reaktorem v EDU

Vpravo bazén použitého paliva a šachta pro manipulační kontejnery s čerstvým palivem. Zavážecí stroj slouží k manipulaci s palivovými kazetami v bezprostřední blízkosti reaktoru a v reaktoru. Obrázek ČEZ, a.s.

Přepracovací závod

Produkty štěpení

Separace

Jaderná bomba

MOX

UO₂

PuO₂

Použité jaderné palivo stále obsahuje štěpitelné izotopy ²³⁵U. Proto se někdy podrobuje přepracování. K tomu je třeba odstranit radioaktivní produkty štěpení. Tento proces je vzhledem k radiaci a chemickým podmínkám spojených s oddělením štěpných produktů od izotopů ²³⁵U a ²³⁸U velice obtížný a nákladný. I dnes je tento proces nákladnější než vytěžit a obohatit přírodní uran. Při manipulaci s tímto materiálem může být použito jen robotů a dálkově ovládaných manipulátorů.

Přepracovacích závodů je méně než obohacovacích. To je dáno i politickým rozhodnutím. V přepracovacím závodě lze z podstaty jeho účelu totiž separovat ve vysokých koncentracích ²³⁵U a ²³⁹Pu, které mohou být použity pro výrobu jaderných zbraní.

Plutonium z přepracovacího závodu se ale také používá jako palivo typu MOX (mixed oxide fuel) pro jaderné reaktory. Jedná se o kombinaci přírodního uranu ve formě jeho oxidu UO₂ a plutonia ve formě PuO₂. Množství PuO₂ se v takové směsi pohybuje od 1 až 7 % podle typu chlazení reaktoru a až 30 % u reaktorů s rychlými neutrony. Palivo MOX je významným palivem v Japonsku, které nemá vlastní zásoby přírodního uranu a snaha o samostatnost a technologický náskok ospravedlňuje vyšší náklady na separaci Pu z použitého paliva (3. blok jaderné elektrárny Fukušima I používal právě toto palivo [Wagner, 2015, s. 18]). Palivo MOX s nízkým obsahem PuO₂ má podobné vlastnosti jako palivo s obohaceným uranem a lze jej použít v tlakovodním reaktoru.

Plutonium
Rychlé neutrony
Tekutá sůl
Množivé reaktory

Jak je zmíněno v předchozím odstavci lze v přepracovacím závodu vyrobit i štěpné palivo s velmi vysokým podílem plutonia. Takové palivo se používá v reaktorech s rychlými neutrony, které nemají moderátor, protože rychlé neutrony mají větší účinný průřez pro absorpci jádrem plutonia. U těchto reaktorů je hustota uvolňovaného tepla tak vysoká, že již nelze pro chlazení použít plyn nebo vodu a používá se tekutých solí. Těmto reaktorům se také říká rychlé množivé reaktory, protože jsou schopny štěpit některé produkty vzniklé při předchozích štěpných reakcích.

Mezisklad použitého jaderného paliva

Kontaminované látky
Životní prostřední
Nízká aktivita
Střední aktivita
Vysoká aktivita

Vysoká aktivita
Mokré chlazení
Suché chlazení

Mezisklad v areálu
EDU
Bezpečnostní kontejner

V meziskladu použitého paliva se skladuje použité palivo po dobu několika desítek let, dokud se nesníží jeho aktivita tak, aby mohlo být trvale (bez nutného chlazení) uloženo. Ve skladech použitého paliva se skladuje nejen použité palivo, ale i jiné radioaktivní látky a látky kontaminované radionuklidy, které vznikly při provozu elektrárny (použité součástky a přístroje, ochranné pomůcky atd.). Všechny tyto látky musí být bezpečně odděleny od životního prostředí (nebezpečí úniku ionizujícího záření a případně únik radioaktivních častic do okolí). Radioaktivní látky rozdělujeme na nízko, středně a vysokoradioaktivní. Nízko a středně aktivní odpady se dělí na krátkodobé, které mají poločas přeměny kratší než 30 let a aktivita zdvojů α -záření dosahuje max. $4 \text{ MBq} \cdot \text{kg}^{-1}$ a na dlouhodobé. Vysoko aktivní odpady jsou definovány jako ty, které vyvíjejí teplo a při skladování je nutné je chladit.

V případě radioaktivních látek s vysokou aktivitou, což jsou i použité kazety je nutné zajistit jejich chlazení, jinak může dojít k jeho roztavení a výparu mohou kontaminovat okolí radioaktivními česticemi. Podle metody chlazení paliva se mezisklady rozdělují na suché (chlazení vzduchem) a mokré (chlazení vodou – bazén). Prvním meziskladem použitého paliva je bazén vedle reaktoru.

V ČR je zatím pouze jeden mezisklad použitého jaderného paliva, který je umístěn v areálu EDU. Jedná se o suchý mezisklad. Použité palivové kazety jsou nejdříve uloženy ve speciálních bezpečnostních kontejnerech (Obrázek 23), které chrání kazety před mechanickým poškozením. Celý sklad je neustále chlazen cirkulujícím vzduchem proudícím mezi kontejnery. V areálu EDU je také úložiště nízko a středně radioaktivních odpadů, které je ve vlastnictví státu.



23: Suchý mezisklad použitého jaderného paliva v areálu jaderné elektrárny Dukovany

Obrázek ČEZ, a.s.

Konečné úložiště radioaktivního odpadu

Hlubinné úložiště

Tento typ skladu musí dokázat uchovat bezpečně radioaktivní odpad po dobu až 100 000 let dokud radioaktivní pozadí jeho obsahu nebude rovno přirozenému pozadí. Konečná úložiště jsou zároveň hlubinná umístěné v horninovém nebo jílovém masívu, aby jím nemohla prosakovat voda. Musí být také v geologicky klidné lokalitě [Marek, 2020]. V současnosti se taková úložiště teprve budují, viz Obrázek 24, respektive naplňují.



24: Pohled na hlubinné úložiště jaderného odpadu u jaderné elektrárny Forsmark (Švédsko)

Nachází se 1,5 km od pobřeží a samotné úložiště je 80 m pode dnem Baltského moře v granitových horninách. V blízkosti úložiště je i stejnojmenná jaderná elektrárna (na obrázku v pozadí). Obrázek Forsmark

Označení úložiště
WIPP
Onkalo

Významným problémem hlubinného úložiště je také jeho označení tak, aby i budoucí generace pochopili, že na uvedeném místě se nachází radioaktivní odpad. Po naplnění konečného úložiště bude tento prostor zcela opuštěn, a tím i v podstatě končí jakékoli závazky původních majitelů odpadu vůči okolí. například z toho důvodu bude kolem hlubinného úložiště WIPP (waste isolation pilot projekt) v Novém Mexiku zbudováno několik žulových sloupů a přímo nad úložištěm mohyla ze zeminy s komorou uvnitř, opět ohraničenou masivními žulovými sloupy a s nápisem Zákaz vstupu + informace o úložišti. Navíc informaci o úložišti bude v archivech po celém světě. Naopak okolí Finského úložiště Onkalo bude navráceno do původního stavu (borový les), bez sebemenší připomínky co pod povrchem leží [Anon., 2021].

Jaderná bezpečnost

Úřad pro jadernou bezpečnost

Každé jaderné zařízení může své okolí kontaminovat nežádoucími chemickými reakcemi a ionizujícím záření [Moyer, 2012] ve formě rozptýleného chemicky aktivního a radioaktivního materiálu, proto musí být vybaveno několika nezávislými ochranami, které zabrání nebo podstatně omezí možný únik těchto látek mimo jejich pracovní prostor do okolí během řádného provozu i havárie. Tyto ochrany mohou být aktivní (různé absorpční a kondenzační zařízení..) a pasivní (ochranná obálka budovy, kontejnery...). V České republice má na starost dozor nad jadernou bezpečností, vystavovaní povolení a návrh předpisů/zákonů Úřad pro jadernou bezpečnost (<https://www.sujb.cz/>).

MAAE(International Atomic Energy Agency)
Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí

Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE, anglicky: International Atomic Energy Agency, zkráceně IAEA) přijala, a v roce 1991 zavedla, mezinárodní stupnici pro hodnocení jaderných nehod, viz Tabulka 25. Stupnice má sloužit především k rychlému a srozumitelnému informování veřejnosti o závažnosti nehod. Nenahrazuje povinnost provozovatele provést důkladný rozbor příčin a následků událostí.

0 Událost pod stupnicí (zero level-below scale)	Situace při kterých nejsou překročeny provozní limity a podmínky, a které jsou bezpečně zvládnuty vhodnými postupy.	
1 Odchylka (anomaly)	Funkční nebo provozní odchylky od ústředně povolených limitů. Poruchy nepředstavující žádné bezpečnostní riziko, ale odhalují nedostatky bezpečnostních zařízení.	
2 Porucha (incident)	Technické poruchy nebo odchylky, které neovlivňují bezpečnost elektrárny přímo nebo bezprostředně. Neovlivňuje bezpečnost elektrárny, ale vede ke zdokonalení bezpečnostních opatření.	Mihama 1991 (Japonsko)
3 Vážná porucha (serious incident)	Ozáření personálu nad normu (dávky překračují 50 mSv), nepatrný únik radioaktivity do okolí. Únik radioaktivních částic mimo elektrárnu nad povolené limity. Následkem je individuální dávka pro nejzasaženější skupinu obyvatel v okolí elektrárny řádově desetiny mSv. Všechny poruchy, při kterých by další selhání bezpečnostních systémů mohlo vést k havárii.	Forsmark 2006 (Švédsko)
4 Havárie s účinky v jaderném zařízení	Částečné poškození aktivní zóny, ozáření personálu. Ozáření obyvatel na hranici limitu. (accident mainly in installation)	Bohunice-A1 1977 (ČSSR)
5 Havárie s účinky na okolí (accident with offsite risk)	Vážnější poškození aktivní zóny. Únik radionuklidů (100 až 1000 TBq jádu 131 nebo jiných podobně významných radionuklidů) mimo elektrárnu. Nutnost částečné evakuace okolí.	Three Mile Island 1979 (USA)
6 Závažná havárie (serious accident)	Únik radionuklidů (1 000 až 10 000 TBq jádu 131 nebo jiných podobně významných radionuklidů) mimo elektrárnu. Nutnost využití havarijních plánů k ochraně okolí.	
7 Velká havárie (major accident)	Únik radionuklidů (více jak 10 000 TBq jádu 131 nebo jiných podobně významných radionuklidů) mimo elektrárnu na velké území. Okamžité zdravotní následky. Poškození životního prostředí.	Černobyl 1986 (SSSR) Fukušima I 2011 (Japonsko)

25: Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí

Úlohy

Úloha 1:

Stanovte jaké množství energie se uvolní při ideálním štěpení 1 kg ^{235}U a při štěpení 1 kg přírodního uranu. Jaká energie se uvolní při sloučení vodíku v jednom 1 kg H_2O ? Stanovte jaké množství čistého uranu ^{235}U nebo vody (lehká voda) by bylo potřeba k nahrazení energie veškerých fosilních paliv spotřebovaných v ČR v roce 2005? Řešení úlohy je uvedeno v Příloze 1.

§1:	zadání:	$m_{\text{U}}; m_{\text{pU}}; m_{\text{H}}$	§5:	odečet:	Q_{ff}
§2:	odečet:	$e_{\text{U}}; N_{\text{A}}; m_{\nu}; A_r$		výpočet:	$m_{\text{U}2005}$
	výpočet:	$M_{\text{U}}; v_{\text{U}}; Q_{\text{U}}$	§6:	výpočet:	$m_{\text{H}_2\text{O}2005}$
§3:	odečet:	$\omega_{235\text{U}}$			
	výpočet:	Q_{pU}			
§4:	odečet:	e_{H}			
	odečet:	$A_{r,\text{H}_2\text{O}}$			
	výpočet:	$M_{\text{H}_2\text{O}}; v_{\text{H}}; Q_{\text{H}_2\text{O}}$			

Popisek symbolů je v [Příloze 1.](#)

Odkazy

- ŠKORPÍK, Jiří, 2013, Stirlingův motor, *Transformační technologie*, Brno, [on-line], ISSN 1804-8293, https://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor_332013.html.
- ŠKORPÍK, Jiří, 2022, Úvod do světa atomů a molekul, *Transformační technologie*, Brno, [on-line], ISSN 1804-8293, https://www.transformacni-technologie.cz/uvod-do-sveta-atomu-a-molekul_2022.html.
- ŠKORPÍK, Jiří, 2023, Technická matematika, *engineering-sciences.education*, Brno, [on-line], ISSN 1804-8293, <https://engineering-sciences.education/technicka-matematika.html>.
- ŠKORPÍK, Jiří, 2024, Radioaktivita a ionizující záření, *engineering-sciences.education*, Brno, [on-line], ISSN 1804-8293, <https://engineering-sciences.education/radioaktivita-a-ionizujici-zareni.html>.
- ANON., 2010cit., *International Thermonuclear Experimental Reactor*, [on-line], <http://www.iter.org>.
- ANON., 2020cit., *The Smithsonian's National Air and Space Museum*, Washington, <https://airandspace.si.edu/exhibitions/apollo-to-the-moon/online/science/scientific-experiments.cfm>.
- ANON., 2021, Poselství do budoucnosti aneb Jak označit místo s nejnebezpečnějším odpadem světa, *Technický týdeník*, (18), ISSN 0040-1064.
- ATKINS, P. W., 2005, *Periodické království: cesta do země chemických prvků* (The Periodic Kingdom: A Journey Into The Land Of The Chemical Elements), Academia, Praha, ISBN 80-200-1185-4.
- BĚHOUNEK, František, 1945, *Svět nejmenších rozměrů*, Jaroslav Tožička, Praha.
- CSVTS.CZ, 2007, Laserové obohacování uranu poprvé komerčně, *Česká nukleární společnost*, [on-line], [cit. 2010]. Dostupné z <http://www.csvts.cz/cns/news07/071025c.htm>.
- ČEZ, a.s., [on-line], [cit. 2011]. Dostupné z <http://www.cez.cz>.
- EINSTEIN, Albert, 1995, *Z mých pozdějších let, Jak vidím svět II* (Out of My Later Years), Lidové noviny, Praha, ISBN 80-7106-116-6.
- ENTLER, Slavomír; FICKER, Ondřej; HAVLÍČEK, Josef; HORÁČEK, Jan; HRON, Martin, MLYNÁŘ, Jan, PÁNEK, Radomír, ŘÍPA, Milan, STÖCKEL, Jan, VARJU, Jozef, 2019, *Budoucnost energetiky: jaderná fúze*, Středisko společných činností AV ČR, v.v.i., Praha, ISBN 978-80-270-6057-3.
- ERU (Energetický regulační úřad), [on-line], [cit. 2019]. Dostupné z <http://www.eru.cz>.
- FERMI, Laura, 1975, *Atomy v rodině*, Práce, Praha.
- FORSMARK, [on-line], [cit. 2010]. Dostupné z <http://www.Forsmark.com>.
- HÁLA, Jiří, 1998, *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*, KONVOJ, Brno, ISBN 80-85615-56-8.
- HEISENBERG, Werner, 1997, *Část a celek: rozhovory o atomové fyzice*, Votobia, Olomouc, ISBN 80-7198-216-4.
- HNATOWICZ, Vladimír, 2024, *Jaderné zbraně: princip a historie*, Naše vojsko, Praha, ISBN 9788020620248.
- HORÁK, Zdeněk, KRUPKA, František, ŠINDELÁŘ, Václav, 1961, *Technická fysika*, SNTL, Praha.
- JUNGK, Robert, 1965, *Jasnější než tisíc slunci: osudy atomových vědců*, Mladá fronta, Praha.

- KADRNOŽKA, Jaroslav, 2006, *Energie a globální oteplování – Země v proměnách při opatřování energie*, VUTIUM, Brno, ISBN 80-214-2919-4.
- KRAUS, Ivo, 2014, *Století fyzikálních objevů: objevy, které změnily fyzikální obraz světa*, Academia, Praha, ISBN 978-80-200-2373-5.
- MAREK, Jiří, 2020, Jsou radioaktivní odpady limitujícím faktorem rozvoje jaderné energetiky?, *All for power*, (2), AF POWER agency, a.s., Praha, ISSN 1802–8535.
- MOYER, Michael, 2012, FÚZE: Falešný úsvit, *Scientific American*, (8), Espero publishing, s.r.o. Praha.
- NĚSTĚRENKO, G., SOBOLEV, A., SUŠKOV, J., 1959, *Atomová letadla*, Naše vojsko, Praha. Z ruského originálu Primeněnije atomonych dvigatélej v aviaciji.
- OLIPHANT, M., HARTECK, P., RUTHERFORD, E., 1934, Transmutation Effects Observed with Heavy Hydrogen, *Proceedings of the Royal Society A*, 144, 692-703, <https://doi.org/10.1038/133413a0>.
- PEIERLS, Rudolf, 1963, *Zákony přírody*, Orbis, Praha. Translation from: 1957, "The Laws of Nature", George Allen & Unwin, London.
- ŘEŽ S.R.O., [on-line], [cit. 2015]. Dostupné z <http://reaktory.cvrez.cz/>.
- ŘÍPA, Milan, WEINZETTL, Vladimír, MLYNÁŘ, Jan, ŽÁČEK, František, 2005, *Řízená termojaderná syntéza pro každého*, Ústav fyziky plazmatu AV ČR, Praha, ISBN 80-902724-7-9.
- TVEL Fuel Company, [on-line], [cit. 2010]. Dostupné z <http://www.tvel.ru>.
- VACÍK, Jiří, BARTHOVÁ, Jana, PACÁK, Josef, STRAUCH, Bohuslav, SVOBODOVÁ, Miloslava, ZEMÁNEK, František, 1995, *Přehled středoškolské chemie*, SPN-pedagogické nakladatelství, a.s., Praha, ISBN 80-85937-08-5.
- VOHLÍDAL, Jiří. JULÁK, Alois. ŠTULÍK, Karel, 2010, *Chemické a analytické tabulky*, Grada, Praha, ISBN 978-80-7169-855-5.
- WAGNER, Vladimír, 2015, *Fukušima I poté.*, Novela bohemica, Praha, ISBN 978-80-87683-45-3.
- WIKIMEDIA COMMONS, [on-line], [cit. 2010]. Dostupné z <http://commons.wikimedia.org>.