
JADERNÁ ENERGIE A TECHNOLOGIE PRO JEJÍ VYUŽITÍ

- strana 9.3 – **Jaderná energie**
 - **Úloha 525:** – Výpočet energie uvolněné při štěpné reakci a fúzní reakci
 - strana 9.5 – **Jaderné štěpení**
 - strana 9.9 – **Jaderná fúze**
 - strana 9.11 – **Jaderné štěpné reaktory**
 - strana 9.16 – **Jaderné fúzní reaktory**
 - strana 9.19 – **Radioizotopové generátory**
 - strana 9.20 – **Štěpné jaderné reaktory provozované v ČR**
 - strana 9.21 – **Jaderná elektrárna s tlakovodními reaktory**
 - strana 9.25 – **Uran a palivový cyklus**
 - strana 9.31 – **Jaderná bezpečnost**
 - strana 9.33 – **Odkazy**
 - strana 9.35-9.37 – **Přílohy**
-

- **autor:** – ŠKORPÍK, Jiří (LinkedIn.com/in/jiri-skorpik)
- **datum vydání:** – Říjen 2011; Březen 2022; Leden 2024 (3. vydání+prejmenování z Jaderná energetika); Březen 2026 (4. vydání)
- **název:** – Jaderná energie a technologie pro její využití
- **sborník:** – *transformacni-technologie.cz*
- **provenience:** – Brno (Česká republika)
- **email:** – skorpik.jiri@email.cz

Copyright©Jiří Škorpík, 2011-2026
Všechna práva vyhrazena.

Jaderná energie

Pro energetické účely využívá lidstvo **jadernou energii**, 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 jsme zatím schopni využít pouze neřízeně v termonukleárních zbraních, řízenou fúzní reakci jsem schopni uskutečnit zatím pouze krátkodobě s vysokými náklady například pomocí urychlovačů, viz **Historické poznámky k jaderné energii**.

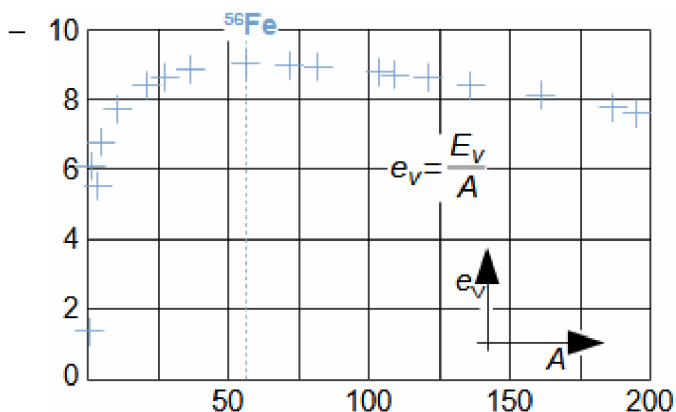
~
Jaderná energie vs.
energie chemických
reakcí

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, s. 9.4** (převodník jednotek energie eV na jednotky J je uveden například v článku *Technická matematika* [Škorpík, 2023]).

Vazebná energie
jader jako zdroj
jaderné energie

Při jaderných reakcích se energie uvolňuje tím, že se mění vazebná energie na jeden nukleon potřebná k udržení soudržnosti jádra, viz **Obrázek 922**. Z obrázku 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 buď při štěpení, radioaktivních přeměnách nebo fúzi jader. Typickým projevem takové jaderné reakce pak je uvolnění velkého množství energie ve formě kinetické energie produktů reakce a fotonů.

– 922:



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

- **Úloha 525:** – 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 525**.

~
*Historické poznámky
k jaderné energii:
první experimenty se
štěpením*

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 rozbít i uměle uvažoval už Ernest Rutherford, který pozoroval výskyt atomů ^{17}O po ozařování atomů ^{14}N 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 částic. 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 částic.

*Objev neutronu
otevřel možnost
energeticky
výhodného štěpení*

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 částic) byl německý fyzik Otto Hahn (1879-1968) v roce 1938. Výsledky experimentu ale správně zdůvodnila a popsala v témže roce rakouská fyzička Lise Meitnerová (1879-1968) [Einstein, 1995, s. 122].

*Jaderná fúze
objevena při
experimentech s
jadernými
urychlovači*

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 zmínku 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 v **aktivních zónách jaderných reaktorů**.*

~
Role termických a rychlých neutronů štěpení

Pravděpodobnost zachycení neutronu jádrem a následné štěpení je velmi ovlivněno rychlostí neutronu. Například neutrony s kinetickou energií odpovídající kinetické energii molekul okolí při běžných teplotách (tzv. termické neutrony) mají tuto pravděpodobnost výrazně vyšší než tzv. rychlé neutrony s kinetickou energií v řádech milión eV, která odpovídá jejich rychlosti po vypuzení z jádra. Obecně rychlý neutron snadněji uniká silám silné interakce. Nicméně existují i jaderné reaktory pracující s rychlými neutrony, tzv. rychlé množivé reaktory.

Pravděpodobnost zachycení neutronu a štěpení

Kvalitativně se stanovuje hodnota pravděpodobnosti zachycení neutronu štěpitelným jádrem pomocí veličiny zvané účinný průřez pro štěpení, dále jen účinný průřez. Čím je účinný průřez neutronu větší, tím větší je i pravděpodobnost absorpce neutronu jádrem.

Co se děje s jádrem po zachycení neutronu

Pohlí-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 radionuklid (a následuje radioaktivní přeměna), nebo právě rozštěpením. Pokud uvolněné neutrony způsobí štěpení dalších jader sousedních atomů, potom nastala řetězová reakce, která je buď řízená, nebo neřízená tzv lavinová.

Lavinovité štěpení pomocí neutronů v kritickém množství štěpitelných jader

Jestliže máme objem štěpitelného materiálu s velkým účinným průřezem pro absorpci neutronů, tak při po uvolnění prvních neutronů dojde prakticky okamžitě k jaderným reakcím v celém objemu štěpitelného materiálu. Aby se tak stalo, musí tento objem štěpitelného materiálu být velice čistý (tzv. zbrojní 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]. Princip lavinovitého štěpení se používá v jaderných zbraních pro vytvoření jaderné exploze. Jaderná nálož založena na principu nadkritického množství štěpitelného materiálu byla použita na bombě Little Boy svržené v roce 1945 na Hirošimu – nadkritické množství vzniklo přiblížením dvou výrazně podkritického množství ^{235}U .

Lavinovité štěpení pomocí neutronů v podkritickém množství štěpitelných jader

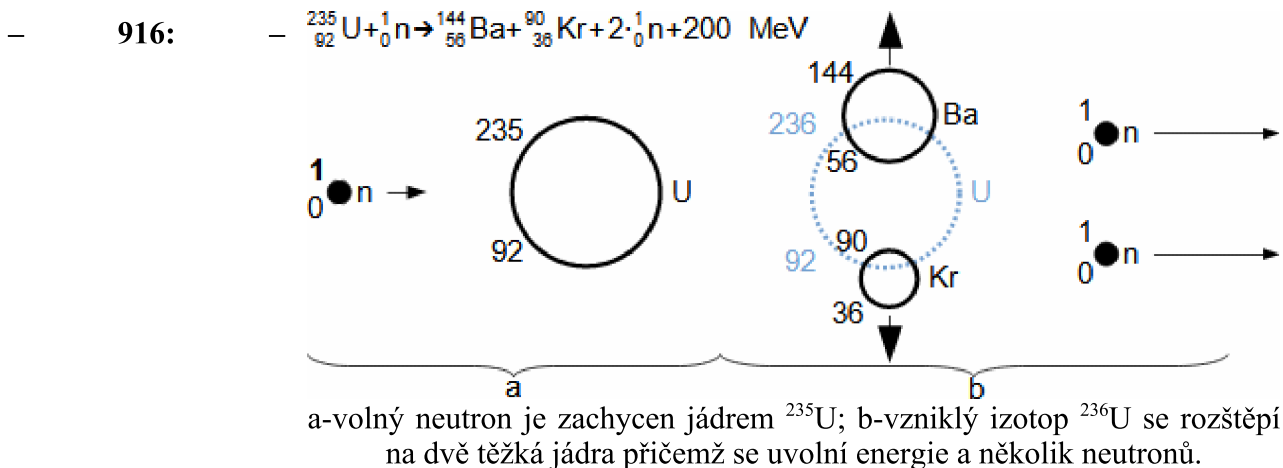
Nicméně uvedená kritická množství platí pro standardní tlaku a teplotu, při vyšším tlaku je potřebné množství menší, což je princip prakticky všech současných jaderných náloží, kde se hustota štěpitelných jader na krátký okamžik zvýší výbuchem chemické nálož, která štěpitelný materiál obklopuje. Toto řešení výrazně zvyšuje bezpečnost při manipulaci s jadernou hlavicí – dokud nedojde k odpálení chemické výbušniny, tak k řetězové reakci nemůže dojít. Uranová Little Boy je jedinná známá jaderná bomba založena na explozi nadkritického množství štěpitelného materiálu.

Řízené štěpení pomocí neutronů v jaderných reaktorech

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. Štěpná reakce se řídí pomocí regulace množství a rychlosti neutronů v objemu štěpitelného materiálu. Vhodný izotop pro štěpení v takových reaktorech musí splňovat podmínku 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 neutronem

Štěpení jádra ^{235}U probíhá pomocí jednoho pomalého neutronu, viz **Obrázek 916**. Po pohlcení neutronu vznikne izotop uranu ^{236}U . Tento izotop je vysoce nestabilní a je velmi vysoká pravděpodobnost (cca 88 %), že se ihned rozpadne na dvě jádra těžkých prvků (v opačném případě je pouze vyzařeno 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.



Energie uvolněná při štěpení uranu

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.

Rychlost rychlých neutronů uvolněných po štěpení uranu

Počet uvolněných neutronů při rozpadu izotopu ^{236}U závisí podle typu vzniklých jader. V případě **Rovnice 916, s. 9.6** se uvolnily dva neutrony. Rychlost 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 jistotou, pravděpodobností zachyceny dalšími jádry ^{235}U , nebo jádry jiných izotopů, které se pak stávají radioaktivními, ale mnohem pravděpodobněji uniknout mimo objem látek připravených ke štěpení, pokud nejsou bezprostředně zpomaleny.

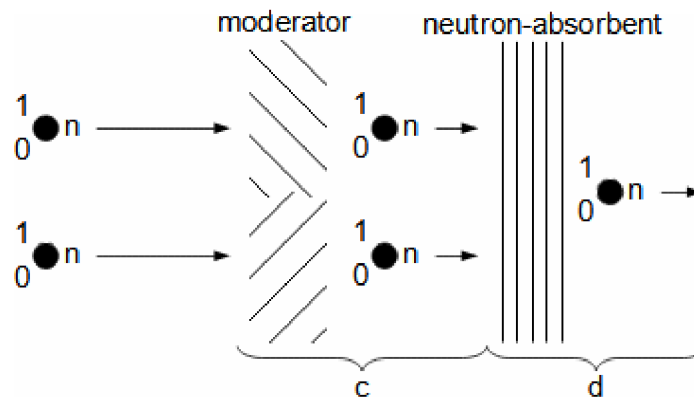
Zpomalování neutronů pro štěpení uranu pomocí moderátoru na termické rychlosti

V jaderných reaktorech se zvyšuje účinný průřez ^{235}U pro absorpci neutronů zpomalením rychlých neutronů po štěpení pomocí moderátoru, **Obrázek 1252, s. 9.8**. Samotné zpomalení se děje ve formě pružných srážek neutronů s jádry moderátoru. Vlastnost moderátoru musí být taková, aby zpomaloval neutrony na požadovanou rychlost, ale zároveň aby znatelně tyto neutrony nepohlcoval. Materiálem moderátoru proto bývají lehčí prvky obvykle ultra čistý grafit nebo voda – u lehkovodních reaktorů je současně i chladičem. Nejčastěji je snížena rychlost neutronů na 2 až 4 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ podle teploty okolí. Při této rychlosti jsou neutrony v molekulárně kinetické rovnováze se svým okolím (rozsah rychlostí odpovídá teplotám od 20 °C do 700 °C) jedná se tedy o termické neutrony. Nicméně maximální účinný průřez pro absorpci neutronu je při rychlosti neutronu 40 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ (kinetické energie neutronu 7 eV) [Něstěrenko a kol, 1959, s. 30-31]).

Regulace počtu neutronů při štěpení uranu absorbátorem

Abychom mohli ovlivňovat počet následujících štěpných reakcí, respektive výkon, musíme umět také počet neutronů regulovat. Regulace počtu neutronů se provádí pomocí absorbátoru (**Obrázek 1252, s. 9.8**). Absorbátor musí ve velké míře pohlcovat neutrony. To je například bór nebo kadmium. Změnou obsahu absorbátoru v aktivní zóně se reguluje výkon reaktoru.

– 1252: –
 Příklad regulace parametrů neutronů při štěpení uranu



(neutron-absorbent)-absorbátor; moderator-moderátor; c-snížení rychlosti neutronů ve hmotě moderátoru; d-zachycení nadbytečných neutronů ve hmotě absorbátoru.

~
 Tři základní stavy aktivní zóny reaktoru

Objem reaktoru, ve kterém probíhá řízená jaderná reakce, protože se v ní nechází štěpitelný materiál se nazývá aktivní zóna. V aktivní zóně může z pohledu bilance neutronů nastat: podkritický stav; kritický stav nebo nadkritický stav. Tyto tři stavy se nazývají základními stavy aktivní zóny reaktoru, zkráceně reaktoru.

Podkritický stav jaderného reaktoru

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 aktivní zóny reaktoru

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 aktivní zóny reaktoru

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 havárie v Sovětské jaderné elektrárně Černobyl (1986) a amerického experimentálního reaktoru SL-1 (1961).

*Multiplikační faktor
aktivní zóny*

Výše uvedené tři stavy 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.

*Regulace výkonu
aktivní zóny reaktoru
pomocí regulačních
tyčí a zpožděných
neutronů*

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). 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.

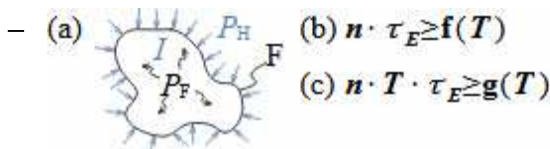
Jaderná fúze

*Zatím co radioaktivní přeměny a jaderné štěpení může probíhat při normálních tlacích a teplotách, tak jaderné fúze lze se ziskem energie provést pouze za velmi vysokých teplot nebo tlaků a nejlépe za kombinaci obého, aby jádra byla schopna překonat odpudivé síly. Je samozřejmé, že při těchto teplotách se už atomy nachází ve formě plazmatu. **Energetická bilance jaderné fúze** závisí na hodnotách klíčových fyzikálních veličin vystupující v tzv. **Lawsonově kritériu**. Přičemž jedna z možných fúzních reakcí, se kterou se uvažuje v první generaci jaderných fúzních reaktorů je fúze jader vodíku.*

*~
Lawsonovo kritérium*

Potřebné hodnoty stavových veličin pro jadernou fúzi lze stanovit z tzv. Lawsonova kritéria. Toto kritérium vychází z energetické bilance fúzní reakce, viz **Obrázek 876a**.

– 876:



$$\tau_E = \frac{I}{P_{loss}}$$

(a) energetická rovnováha 1 m³ plazmatu; (b) Lawsonovo kritérium; (c) Lawsonovo kritérium pro případ konstantního tlaku plazmatu. F – vyšetřovaný objem fúzního paliva. I [eV·m⁻³] tepelná energie (entalpie) plazmatu v jednotce objemu; n [m⁻³] hustota jader; P_F [eV·s⁻¹·m⁻³] fúzní výkon; P_H [eV·m⁻³] tepelný příkon pro 1 m³ plazmatu dodávaný zvenčí; P_{loss} [eV·s⁻¹·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).

*Parametry
Lawsonova kritéria*

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 876b, s. 9.9**, která se nyní nazývá po něm jako Lawsonovo kritérium.

~
*Energetická bilance
pro vědecké
vyrovnání*

Tvar funkce $f(T)$, respektive $g(T)$ z **Rovnic 876, s. 9.9** je závislý na energetické bilanci plazmatu, přičemž pro provozování fúzní reakce a její řízení jsou podstatné tři stavy. První stav se nazývá vědecké vyrovnání (scientific breakeven), při které nastává rovnost $P_F = P_H$. Nicméně k jaderné fúzi uvnitř objemu může dojít i při hodnotách, kdy je fúzní výkon P_F menší než výkon dodávaný zvenci P_H , například pomocí již zmíněných urychlovačů nabitých částic.

*Energetická bilance
pro zapálení*

Druhý případ energetické bilance je nazýván zapálení (ignition), při které nastává rovnost $P_F = P_{\text{loss}}$.

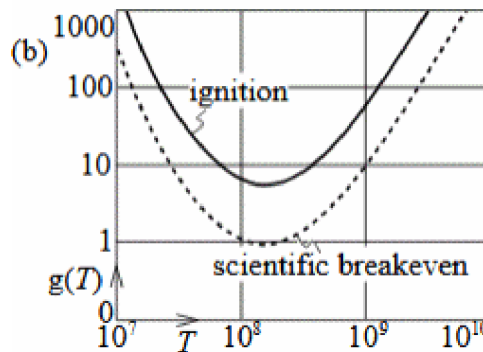
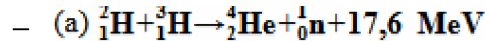
*Energetická bilance
pro inženýrské
vyrovnání*

Třetí případ energetická rovnováha se nazývá inženýrské vyrovnání (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 různých izotopů
vodíku*

Z **Obrázku 922, s. 9.3** 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 vyrovnání fúze izotopu vodíku ^2H (deuterium) a ^3H (tritium) podle **Rovnicí 1040, s. 9.11**. 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].

– 1040:



(a) rovnice fúze deuteria a tritia; (b) průběh funkcí $g(T)$ pro fúzní reakci podle **Rovnice 876a**. $g(T)$ [$10^{21} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{keV} \cdot \text{s}$]; T [K]. Data pro graf byla čerpána z [Entler et al., 2019].

Problémy s vysokými energiemi neutronů při fúzi těžkých vodíkových jader

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).

Bezneutronové fúzní reakce lehkých vodíkových jader v magnetohydrodynamických generátorech

Do budoucna se uvažuje také s bezneutronovými fúzními reakcemi, mezi které patří například fúze 4 jader lehkého vodíku, což je úhrnná fúzní reakce probíhající v jádru Slunce, nebo fúze jádra vodíku a Boru podle **Rovnice 878** [Entler et al., 2019]. Navíc budou vznikat jen elektricky nabitě částice, které lze zpomalit přímo pomocí magnetohydrodynamického generátoru a odpadne nutnost transformace uvolněného tepla pomocí tepelného oběhu.

– 878:



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 masívně finančně podporovanou státem, viz **Historické poznámky k jaderným reaktorům**. Základní částí jaderného reaktoru je aktivní zóna, která obsahuje štěpitelné palivo. Touto aktivní zónou procházejí jednak chladicí kanálky a jednak otvory pro vedení regulačních tyčí obsahující absorbátor. Jednotlivé typy reaktorů se od sebe liší nejčastěji chladicí látkou a moderátorem, nicméně existují i jiná kritéria, podle kterých lze provést rozdělení reaktorů, přičemž ten nejpoužívanější typ energetice je tzv. tlakovodní reaktor.*

~
*Historické poznámky
 k jaderným
 reaktorům: produkční
 reaktory*

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] označovaný jako Chicago Pile (česky milíř). Reaktor měl výkon přibližně necelý kilowatt, viz **Obrázek 233**. Další navazující reaktory byly v USA postaveny a provozovány pro účely projektu Manhattan (vývoj atomové pumpy), respektive za účelem tvorby plutonia v aktivní zóně reaktoru, proto se takové reaktory označují jako produkční [Jungk, 1965].

– 233: –



Prosinec 1942 Chicago – kresba zachycuje spuštění prvního jaderného reaktoru. Všimněte si ruční manipulace s regulační tyčí. Autor obrázku je Gary Sheehan (1957) [Wikimedia Commons].

*1954: Nástup
 energetických
 reaktorů na souši i
 na moři*

Mimo jaderných reaktorů pro zbrojní 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 lovní systémy.

*Jaslovské Bohunice
 A1*

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
podle rychlosti
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 chladicího 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).

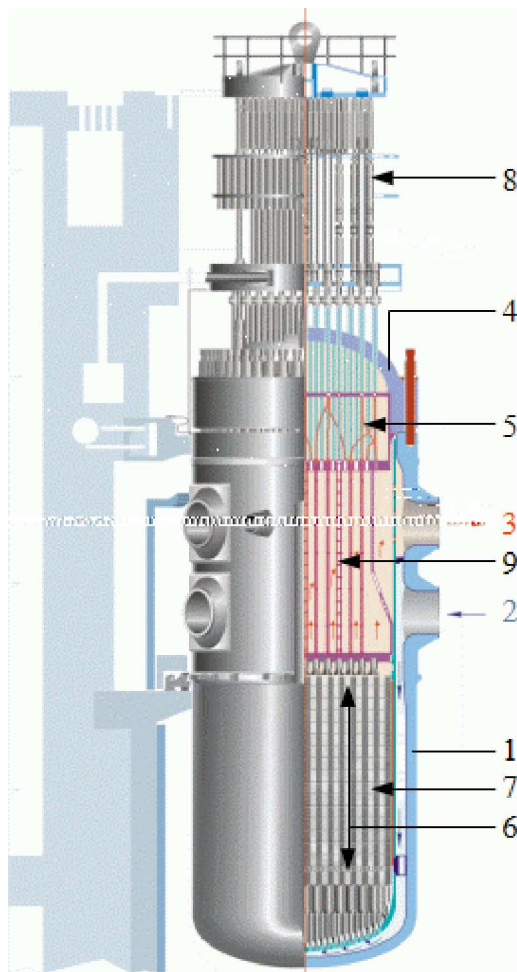
*Rozdělení reaktorů
podle moderátorů*

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– Pressurized Water Reactor, ruská VVER–vodo-vodjanoj energetičeskij reaktor), 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.

~
*Systém rozmístění
paliva v tlakovodních
reaktorech*

Palivo v tlakovodním reaktoru (**Obrázek 1082, s. 9.14**) je obvykle ve formě tablet skládaných do trubiček takže vznikne tzv. palivový proutek. Soubor těchto proutků se skládá do palivové šestihranné (reaktory odvozené ze sovětských konstrukcí), 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.

– **1082:** –
*Jaderný reaktor
 VVER 1000
 (tlakovodní)*



1-tlaková nádoba reaktoru; 2-přívod chladicí 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 v
 tlakovodních
 reaktorech*

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 nuklidy absorbátoru v různých koncentracích, podle účelu jejich použití a odtud se rozlišují tyče kompenzační, řídicí a havarijní. U moderních tlakovodních reaktorů mají regulační tyče přímo součástí palivových kazet, kde vedle palivových proutků jsou duté trubičky v palivovém souboru, uvnitř kterých se pohybují regulační tyče – tyto tyče se pohybují ve skupinách nazývané klastry a palivové kazety obsahující tyto klastry se označují jako havarijní a regulační soubor, viz **Obrázek 531**. U starších tlakovodních reaktorů jsou zvláště kazety s palivem a zvláště kazety s regulačními tyčemi.

– **531:** –
*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].

- Kompenzační tyče a H_3BO_3 v tlakovodních reaktorech* 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 chladicí vody – tzv. základní absorpce reaktoru. Koncentrace kyseliny borité je ve vodě snižována tak, jak se spotřebovává palivo v aktivní zóně. Cílem je udržet konstantní hodnotu multiplikačního faktoru k .
- Řídící tyče v tlakovodních reaktorech mění reaktivitu* Okamžité změny výkonu reaktoru se provádí pomocí řídicích tyčí jejíž účinnou složkou jsou absorbátory – většinou bór ve formě oceli legované bórem, řidčeji kadmium nebo hafnium ve formě slitin. Tyto tyče reagují na jakoukoliv změnu výkonu a podle okamžité potřeby se do aktivní zóny zasunují nebo se z ní vysunují. Tímto se reguluje objem štěpitelného materiálu v aktivní zóně, ke kterému se mohou dostat neutrony. Rychlost změny výkonu reaktoru je přímo úměrná tzv. reaktivitě aktivní zóny ρ , viz její definiční **Vzorec 527**.
- **527:** – $\rho = \frac{k-1}{k} \rho$ [1] reaktivita.
- Havarijní tyče v tlakovodních reaktorech* Štěpnou reakci lze okamžitě zastavit zasunutím havarijních tyčí do aktivní zóny, například v případě nenadálých událostí, na které už nestačí kompenzační a řídicí tyče. Havarijní tyče mají podobné složení jako řídicí tyče, ale za normálních podmínek jsou zcela vysunuty a mají rychlejší mechanismus zasouvání.
- Maximální provozní teplota vody v tlakovodních reaktorech* Teplo vzniklé v aktivní zóně reaktoru je odváděno ve formě ohřáté vody pod vysokým tlakem tak, aby nedošlo k varu chladicí 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.
- Výkony tlakovodních reaktorů* Zatím nejmenší provozovaný tlakovodní reaktor byl na výzkumné jaderné ponorce NR-1. Tento reaktor poskytoval výkon pro pohon 75 kW parní turbíny. Největší tlakovodní reaktory jsou schopny poskytovat dostatek energie pro pohon 1 400 MW parních turbín.

Jaderné fúzní reaktory

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

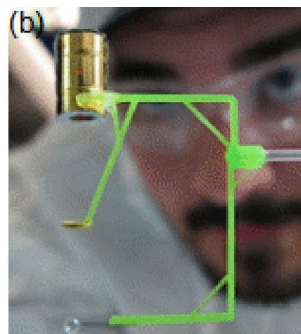
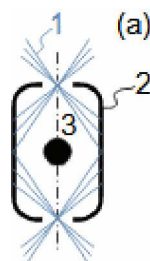
~
První experimenty s
reaktory s
inerciálním udržením

Za první úspěšnou energeticky kladnou realizaci fúzní reakce lze považovat test fúzní principu spuštěného masivním γ -zářením zaměřené na kapsli obsahující směs deuteria a tritia, která byla tímto zářením stlačena. Tento test proběhl pravděpodobně 9. května 1951 (exploze George), kdy potřebný tok γ -záření byl generován štěpnou explozí uranové nálože. Celý test byl skutečně se záměrem ověřit princip termionukleární bomby [Hnatowicz, 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].

Reaktory s
inerciálním udržením
pomocí laseru

V jaderných fúzních reaktorech s inerciálním udržení není využíváno jaderných explozí ke generování γ -záření, ale laserů, které generují toto záření ozařováním vnitřního pláště komory (tzv. hohlraum) s palivem, viz **Obrázek 879**. Podmínkou je, aby plášť komory byl z materiálu, který po ozaření laserem uvolňuje γ -záření, což je například zlato. Existují také realizace, kdy je mohutný svazek laserových paprsků nasměřován přímo na palivo ve tvaru kuličky z mnoha stran, ale tímto způsobem je vytvoření potřebného tlaku více energeticky náročný. Prozatím se takto podařilo vyrobit pomocí fúzní reakce v jednom pulsu 3,15 MJ energie v americkém zařízení NIF Laser v roce 2022.

879:



(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.

~
*První experimenty
reaktorů s
magnetickým
udržením*

Existuje více typů jaderných fúzních reaktorů s magnetickým udržením, přičemž jedno z nejslibnějších zařízení pro řízenou fúzi atomových jader je TOKAMAK (zkratka ruských slov: TOroidalnaja KAmarea i MAgnitnyje Katuški – 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 cívkami a transformátorovým jádrem, **Obrázek 235, s. 9.18.**

*Popis reaktoru s
magnetickým
udržením typu
TOKAMAK*

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 poloidálním 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. Cílem těchto dvou směrů je vytvoření siločary ve tvaru šroubovic, které by směřovaly ionty do centra nejvyššího tlaku v ose tokamaku. Toroidální složka magnetického pole (o síle 1-10 Tesla) je vytvářena magnetickými cívkami, 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.

*Ohřev plazmatu v
reaktoru s
magnetickým
udržením*

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.

Chlazení reaktorů s magnetickým udržením

Teplo z TOKAMAKŮ je odváděno chladicím systémem jeho pláště. Produkty fúze a částice uvolněné při bombardování pláště reaktoru zářením jsou odváděny vývěvou 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.

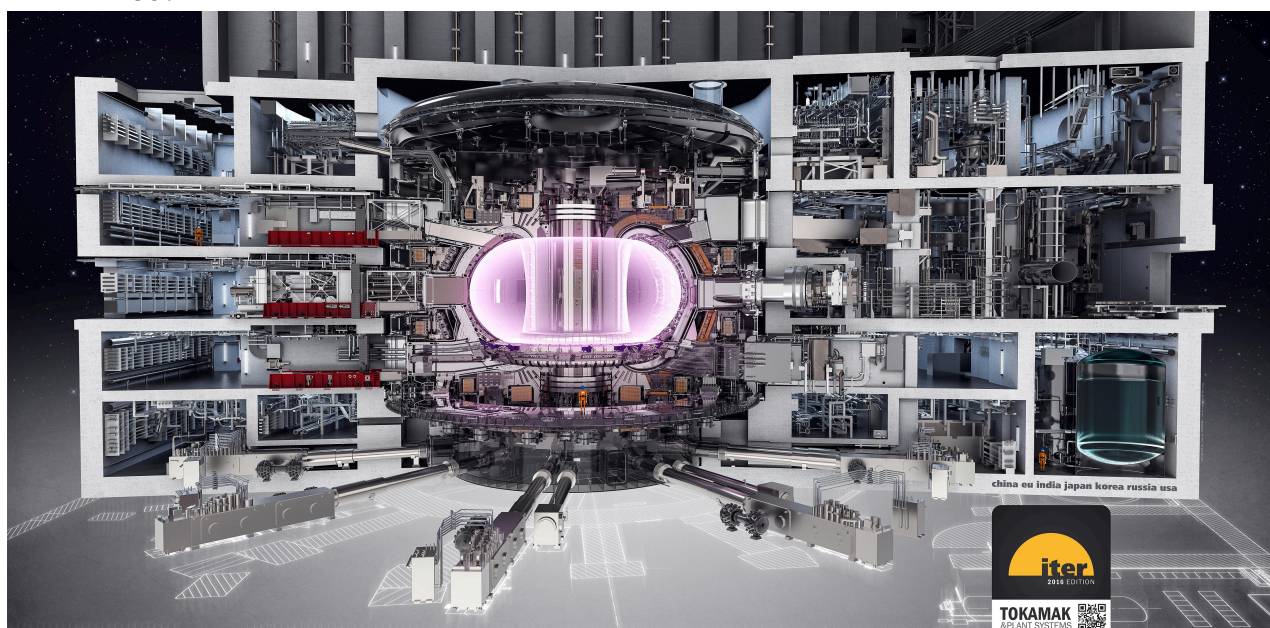
Provozované reaktory s magnetickým udržením

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.

ITER – největší projekt reaktoru s magnetickým udržením

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, viz **Obrázek 235**. 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].

– 235: –

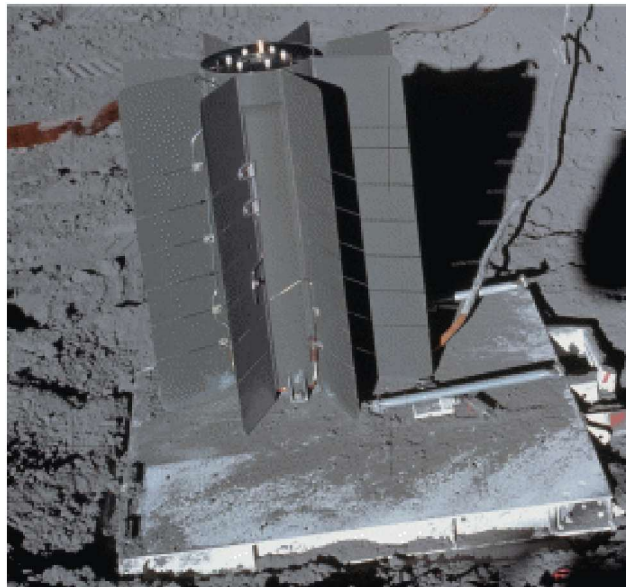


Obrázek [Obrázek: iter.org].

Radioizotopové generátory

*V radioizotopových generátorech probíhá transformace tepla na elektřinu pomocí termoelektrických generátorů, přičemž teplo vzniká při radioaktivních přeměnách radionuklidů uvnitř generátoru, **Obrázek 230.** Takové zařízení je sice jednoduché a spolehlivé, ale má také nízkou účinnost transformace tepla na elektřinu. Proto se experimentuje i s využitím transformace tepla pomocí Stirlingova motoru. 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. První zařízení byla vyvinuta ve vojenských laboratořích Mound Laboratories v USA v roce 1954.*

– **230:** –
Radioizotopový generátor zanechaný posádkou Apolla 14 na měsíci jako zdroj elektřiny 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 patrné. Uvnitř pláště byla teplota $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, na chladících plochách už jen $275\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výška zařízení je necelého 0,5 m. Technické údaje [Anon., 2020], obrázek [Wikimedia Commons].

Výhody a nevýhody radioizotopových generátorů

Radioizotopové generátory jsou bezobslužné velmi jednoduché zdroje elektrické energie, v drtivé většině určené pro práci v ostrovním provozu například v kosmickém prostoru nebo v odlehlých koutech Země bez možného přístupu obsluhy. 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.

Štěpné jaderné reaktory provozované v ČR

*V České republice jsou v současnosti v provozu štěpné jaderné reaktory ve dvou jaderných elektrárnách a to **JE Dukovany** a **JE Temelín** a další čtyři reaktory v ostatních jaderných provozech. 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]. **Ostatní štěpné jaderné reaktory jsou školní, experimentální nebo produkční.***

~
*Jaderná elektrárna
Dukovany se čtyřmi
štěpnými jadernými
reaktory*

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 se dvěma
štěpnými jadernými
reaktory*

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).

~
*Školní a
experimentální
štěpné reaktory při
ČVUT*

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). Reaktor VR-2 je podobné konstrukce, ale menší.

*Produkční a
experimentální
štěpné reaktory při
VUJE v Řeži*

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 s tlakovodními reaktory

*Jaderná elektrárna stlakovodními štepnými reaktory je komplex několika průmyslových budov, kde se zajišťuje výroba elektrické energie a nakládání s palivem. Na **Obrázku 528** je celkový pohled na **areál jaderné elektrárny Dukovany**, jejíž **zařízení** je v této kapitole převážně popisováno popisováno.*

– 528: –



Fotografie: [ČEZ, a.s., 2007].

~
*Budovy v areálu
JEDU*

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 dozorny 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 chladicí vody, chladicí 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...

*Součásti JEDU
stojící mimo její
areál*

K samotné elektrárně jsou přidružené přímo další závody, které nemusí být v bezprostřední blízkosti elektrárny. Především se jedná o zdroje chladící vody, rozvodny elektřiny, 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.

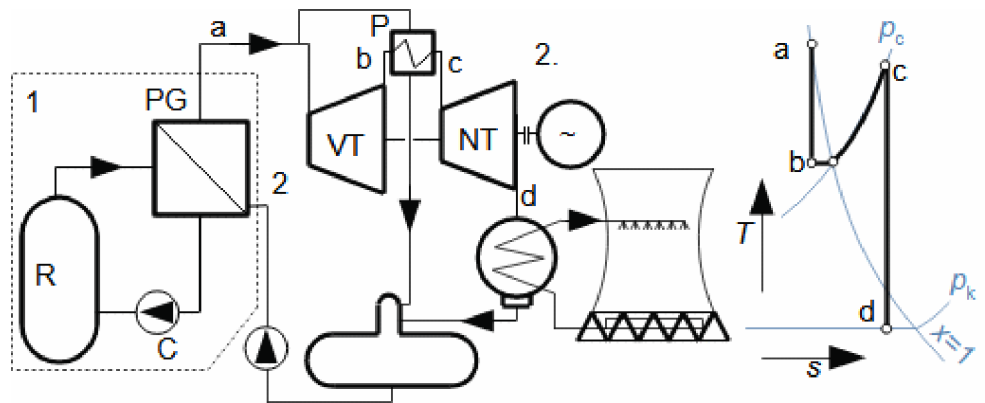
*Reaktorová budova v
areálu JEDU*

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 1267(vlevo), s. 9.24**) tlakuvzdorný a pro snížení tlaku, respektive zamezení úniku radioaktivních částic v případě netěsností na reaktoru je vybavená tzv. barbotážní věží. Jedná se o pasívní 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.

~
*Schéma zařízení
jaderné elektrárny s
tlakovodním
reaktorem*

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 1083, s. 9.23**. 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.

– 1083: –

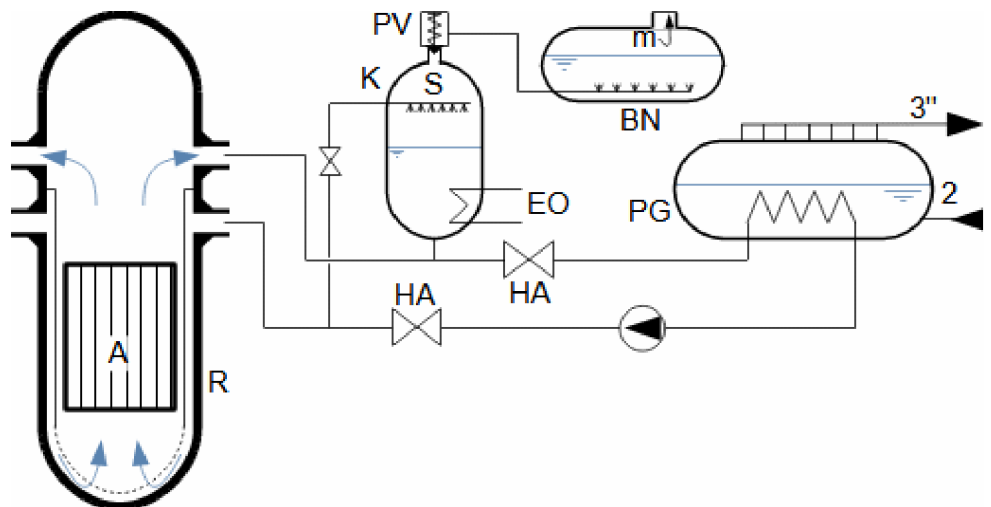


1-zařízení náležející do primárního okruhu; 2-zařízení náležející do sekundárního okruhu. R-jaderný reaktor; C-cirkulační čerpadlo; PG-parogenerátor; P-přihřívák; VT-, NT-vysokotlaké a nízkotlaké díly turbíny. T [K] absolutní teplota; s [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] měrná entropie vody/vodní páry;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

Schéma zařízení primárního okruhu jaderné elektrárny Dukovany

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 1270**). Jeden z chladících okruhů obsahuje také kompenzátor objemu a zařízení pro regulaci koncentrace kyseliny borité v chladicí vodě.

– 1270: –



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-pojistná membrána; EO-elektroohřívák.

Funkce hlavního cirkulačního čerpadla a parogenerátoru ve schématu zařízení

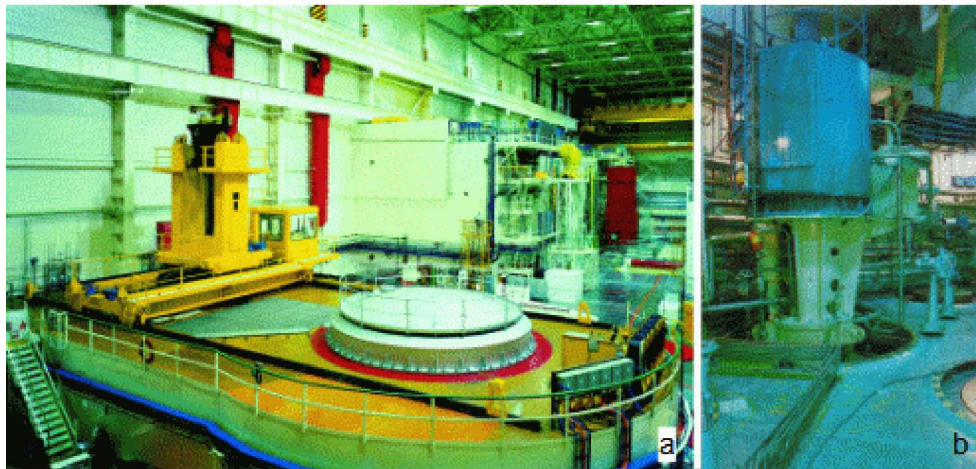
V reaktoru je chladicí voda ohřata pod teplotu meze sytosti kapaliny, viz **Tabulka 883, s. 9.24**. Tato voda cirkuluje mezi parogenerátorem a reaktorem pomocí hlavního cirkulačního čerpadla (**Obrázek 1267(vpravo), s. 9.24**). Ohřátá voda ze reaktoru je odváděna do parogenerátoru, což je povrchový tepelný výměník. V parogenerátoru se přivádí k varu voda sekundárního okruhu, která opouští parogenerátor ve stavu syté páry.

– 883: –

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

Parametry vody v reaktorech ETE a EDU: t_i [°C] teplota na vstupu; t_e [°C] teplota na výstupu; p [MPa] tlak v reaktoru.

– 1267: –



Reaktorový sál (vlevo) jaderné elektrárny Dukovany a cirkulační čerpadlo (vpravo). Obrázky ČEZ, a.s.

Funkce kompenzátoru objemu ve schématu zařízení

Důležitým předpokladem správného chlazení reaktoru je udržování stálého tlaku chladicího okruhu. To se děje pomocí kompenzátoru objemu dvojnásobným způsobem. Tlak lze snižovat sprchou se studenou vodou, která snižuje tlak sytých par nad hladinou kompenzátoru objemu, viz **Obrázek 1270, s. 9.23**. Naopak tlak lze zvyšovat pomocí elektroohříváků, které jsou nainstalovány pod hladinou kompenzátoru.

Funkce pojistného ventilu a membrány na barbotážní nádrži ve schématu zařízení

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 kondenzuje a zároveň vodu ohřívá kondenzačním teplem). V případě nárůstu tlaku v barbotážní nádrži praskne pojišťovací membrána a část páry z barbotážní nádrže unikne do hermeticky uzavřeného prostoru, ve kterém je nádrž umístěna.

Schéma zařízení sekundárního okruhu jaderné elektrárny

V sekundárním okruhu je zařazena parní turbína, ve které expanduje sytá pára, respektive mírně přehřátá o několik stupňů Celsia, viz **Tabulka 898, s. 9.25**. 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 1083, s. 9.23**. Pára nejdříve o stavu sytosti-a vstupuje do vysokotlaké díly turbíny, kde expanduje do tlaku p_c . Z vysokotlakého dílu turbíny proudí pára do dalších dílů turbíny přes přehřívák, kde se její teplota zvýší téměř na teplotu páry v parogenerátoru, tedy při tlaku p_c bude výrazně přehřátá. Ještě před přehřívákem je ale separátor vlhkosti v páře. V nízkotlakých tělesech turbíny pára expanduje do tlaku v kondenzátoru.

– **898:** –

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

Parametry páry na výstupu z parogenerátorů v ETE a EDU: t_a [°C] teplota na výstupu; p_a [MPa] tlak páry. Značení odpovídá **Obrázku 1083, s. 9.23**.

Tepelná účinnost zařízení jaderné elektrárny

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 %).

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 (přepřacovat) nebo trvale uložit na bezpečné místo. Proces od těžby uranové rudy přes použití vytěženého uranu v reaktoru až po jeho recyklaci či uložení se nazývá palivový cyklus uranu, viz **Obrázek 1268**.*

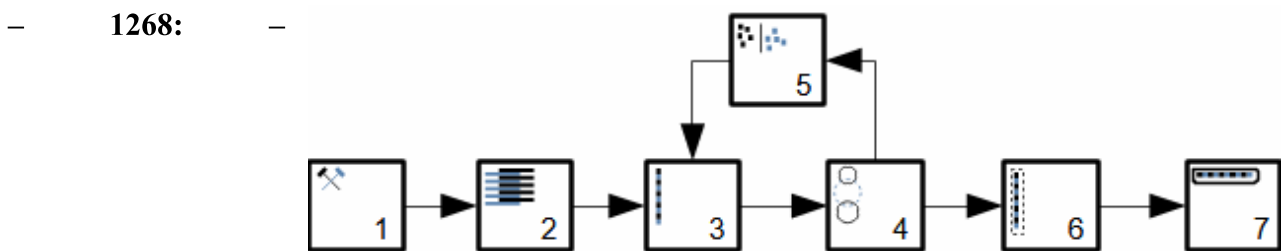


Schéma palivové cyklu uranu: 1-těžba a úprava uranové rudy; 2-obohacování uranu; 3-výroba palivové kazety; 4-štěpení v reaktoru; 5-přepřacování uranu; 6-mezisklad použitého jaderného paliva; 7-hlubinné (konečné) úložiště radioaktivního odpadu.

~
Těžba a úprava uranové rudy

Uran se těží obvykle klasickým hornickým způsobem. Přesněji těží se uranová ruda (**Obrázek 529, s. 9.26**), 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].

– **529:** –
Úlomek uranové rudy



Obrázek ČEZ, a.s.

*Těžba uranové rudy v
 Dolní Rožínce a jeho
 úprava v
 Mydlovarech*

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.

~
*Obecné metody
 obohacování
 přírodního uranu*

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

*Výroba uranového
 koncentráту UF_6
 před obohacováním*

z chemického pohledu nelze uran zpracovávat v čisté podobě, protože chemicky reaguje s okolím (oxiduje), proto 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 toxickou a silně korozivní sloučeninu.

Proces obohacení uranu a výroba palivové tablety

Obohacování se provádí například plynou difuzí, odstřediváním 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 už chemickou cestou převedené na 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.

~
Výroba palivové kazety

Výroba palivové kazety (**Obrázek 531, s. 9.14**) 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.

Přeprava palivových kazet

Palivové kazety obsahující nepoužité palivo má tak nízkou aktivitu, že je považováno za neradioaktivní. Bez radioaktivních příměsí, takže je lze přepravovat do místa spotřeby mnohem snadněji než použité palivové kazety. K přepravě se používají přepravní kontejnery obvykle pro několik kazet, viz **Obrázek 956**.

– **956:** –



Přepravení kontejnery pro palivové kazety s novým palivem od společnosti Westinghouse Electric Corporation v příjmové části skladu jaderné elektrárny Temelín.

Použitá palivová kazeta

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.

*Radioaktivní
přeměny v použitých
palivových kazetách*

Použité palivové kazety se nejprve ukládají do bazénu vedle reaktoru (**Obrázek 532**), kde voda slouží jako chlazení pro teplot uvolňované z radioaktivních přeměna 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 částičky použitého paliva z vody odfiltrovávány 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.

– 532: –



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

~
*Přepracování
použitého jaderného
paliva*

Použité jaderné palivo stále obsahuje štěpitelné izotopy ^{235}U . 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 ^{235}U a ^{238}U 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.

*Přepracování
použitého jaderného
paliva na náplně
jaderných náloží*

Vlastnictví a provoz přepracovacího závodu je politicky citlivé. V přepracovacím závodě lze totiž z podstaty jeho účelu separovat ve vysokých koncentracích ^{235}U a ^{239}Pu , které mohou být použity pro výrobu jaderných zbraní.

*Přepracování
použitého jaderného
paliva na palivo typu
MOX*

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 UO_2 a plutonia ve formě PuO_2 . Množství PuO_2 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 PuO_2 má podobné vlastnosti jako palivo s obohaceným uranem a lze jej použít v tlakovodním reaktoru.

*Přepřacování
použitého jaderného
paliva na plutonivoé
palivo pro rychlé
množivé reaktory*

Jak je zmíněno v předchozím odstavci lze v přepřacovacím 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
nepotřebných
radioaktivních látek
včetně použitého
jaderného paliva*

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 úniku radioaktivních částic do okolí).

*Rozdělení
radioaktivních látek v
meziskladu*

Radioaktivní látky ve skladu 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 zdrojů α -záření dosahuje max. $4 \text{ MBq} \cdot \text{kg}^{-1}$ a na dlouhodobé. Vysoce aktivní odpady jsou definovány jako ty, které vyvíjejí teplo a při skladování je nutné je chladit.

*Látky s vysokou
aktivitou v
meziskladu*

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

*Mezisklad v areálu
EDU*

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 533, s. 9.30**), 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.

533:



Obrázek ČEZ, a.s.

~
Konečné úložiště
radioaktivního
odpadu

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 534**, respektive naplňují.

534:

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



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

Označení konečného úložiště pro budoucí generace

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 jakékoliv 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 navraceno do původního stavu (borový les), bez sebemenší připomínky co pod povrchem leží [Anon., 2021].

Jaderná bezpečnost

Každé jaderné zařízení může své okolí kontaminovat nežádoucími chemickými reakcemi a ionizujícím zářením [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...). každé jaderné zařízení musí být registrováno u orgánu, který kontroluje a schvaluje provoz, respektive nakládání s takovým zařízením.

Kontrolní orgány

Na mezinárodní úrovni kontroluje bezpečnost jaderných zařízení MAAE(International Atomic Energy Agency), v České republice má na starost dozor nad jadernou bezpečností, vystavování povolení a návrh předpisů/zákonů Úřad pro jadernou bezpečnost (<https://www.sujb.cz/>).

Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí a pro informování kontrolních orgánů a veřejnosti

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 1269, s. 9.32**. Stupnice má sloužit především k rychlému a srozumitelnému informování veřejnosti o závažnosti nehod. Nenahrazuje povinnost provozovatele provést důkladný rozbor příčin a následků událostí.

– **1269:** –
*Mezinárodní stupnice
 pro hodnocení
 jaderných 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 jódu 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 jódu 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 jódu 131 nebo jiných podobně významných radionuklidů) mimo elektrárnu na velké území. Okamžité zdravotní následky. Poškození životního prostředí. | Černobyl 1986 (SSSR) Fukušima I 2011 (Japonsko) |

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 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 fyzika*, SNTL, Praha.
- JUNGK, Robert, 1965, *Jasnější než tisíc sluncí: 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 Primeněníje atomonych dvigatělej 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>.