

JADERNÁ ENERGIE A TECHNOLOGIE PRO JEJÍ VYUŽITÍ

Jiří Škorpík, skorpik.jiri@email.cz

- 9.3 Jaderná energie
Vazebná energie – Historické poznámky
- 9.5 Jaderné štepení
Absorpce neutronů – Štepení 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 udržení – Reaktory s magnetickým udržení
- 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 – Přepřacovací 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 Přílohy

Autor: ŠKORPÍK, Jiří, ORCID: 0000-0002-3034-1696

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

Název článku: Jaderná energie a technologie pro její využití

Název on-line zdroje: Transformační technologie (on-line journal at transformacni-
technologie.cz; engineering-sciences.education; engineering-
sciences.education; stirling-engine.education)

ISSN: 1804-8293

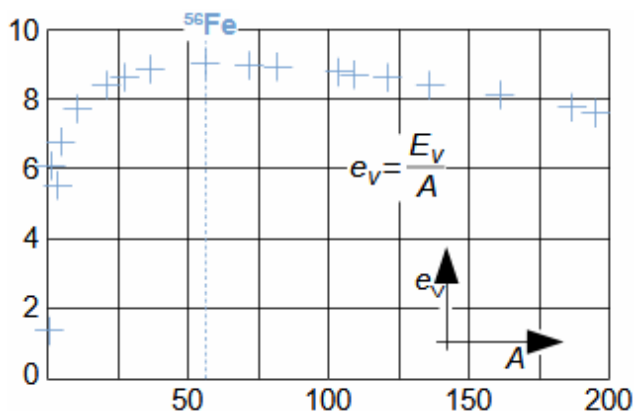
Copyright©Jiří Škorpík, 2024
All rights reserved.

Jaderná energie

Pro energetické účely využívá lidstvo atomovou energii, 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 zbraních, 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 buď 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

^{14}N

John Cockcroft

Ernest Walton

Urychlovač částic

Myšlenky umělého rozbití atomu přišly ihned po odhalení podstaty radioaktivity radioizotopů. V knize *Zákony přírody* [Peierls, 1963, s. 241] je uvedeno, že o možnosti rozbít uměle atom uvažoval už Ernest Rutherford, kterému mířeným zářičem α -zářením transmutovat ^{14}N na kyslíkové atomy ^{17}O , přičemž došlo zároveň i k odštěpení jednoho protonu 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.

Neutron

James Chadwick

Otto Hahn

Lisa Meitnerová

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. Štěpení experiment ale správně zdůvodnila a popsala v témže roce rakouská fyzička Lise Meitnerová (1879-1968) [Einstein, 1995, s. 122].

Jaderná fúze

William D. Harkins

Mark Oliphant

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 .

Absorpce neutronů
Kinetická energie neutronu
Termický neutron
Rychlý neutron
Účinný průřez pro absorpci neutronu

Hodnotu pravděpodobnosti zachycení neutronu jádrem velmi ovlivňuje jeho rychlost, 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 vyjádřena 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.

Radioaktivní přeměna
Štěpení
Řetězová reakce

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 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.

Jaderná exploze
Kritické množství
 ^{235}U
 ^{239}Pu

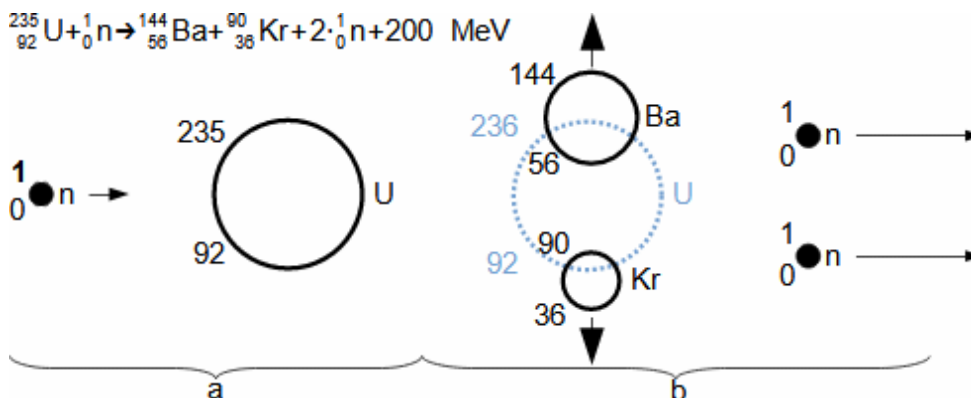
Jestliže máme v nějaký objem štěpitelného materiálu s velkým účinným průřezem pro absorpci neutronů, tak při neřízeném štěpení dojde prakticky okamžitě k jaderným reakcím v celém objemu štěpitelného materiálu (lavinovité štěpení) po uvolnění prvních neutronů. Aby se tak stalo, musí tento objem štěpitelného materiálu být velice čistý (tzv. 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]. Pro lavinovité štěpení je charakteristický jaderný výbuch, tedy okamžité uvolnění jaderné energie, které se využívá v jaderných zbraních.

Štěpení v reaktoru
Štěpitelný izotop
 ^{235}U

Řízené štěpení jader se široce využívá v jaderných elektrárnách, ve kterých se pomocí tepelného oběhu⁶ (nejčastěji se jedná o parní oběh) transformuje teplo z jaderného štěpného reaktoru na práci. 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
 ^{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 vysoce 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 bilance

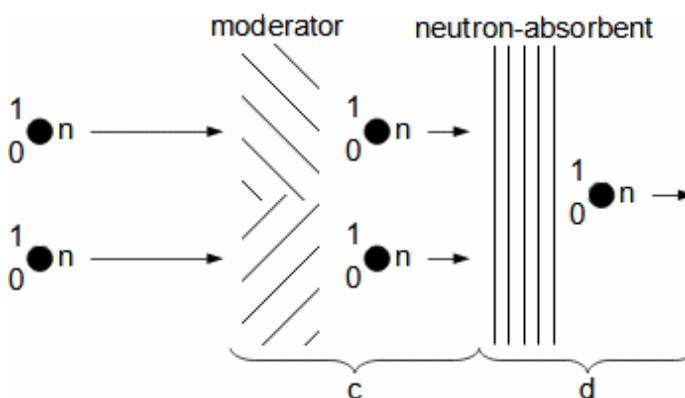
Nově vzniklá jádra mají v okamžiku vzniku vysokou kinetickou energii rovnající se přibližně energii 166 MeV. Nárazy jader do okolních atomů se snižuje jejich kinetická energie ve prospěch zahřívání okolní hmoty. Dále se uvolní energie ve formě kinetické energie sekundárních neutronů o celkové energii 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
 Grafit
 Voda

Počet uvolněných neutronů při rozpadu izotopu ^{236}U závisí podle typu vzniklých jader. V případě Rovnice 2 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 , 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 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]).

Počet neutronů
 Absorbátor
 Bór
 Kadmium

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; moderátor-moderátor; c-snížení rychlosti neutronů ve hmotě moderátoru; d-zachycení nadbytečných neutronů ve hmotě absorbátoru.

Aktivní zóna Základní stavy	<p>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 stavy se nazývají základními stavy aktivní zóny.</p>
Podkritický stav	<p>Jestliže počet štěpných reakcí způsobené neutrony uvolněné při štěpení v první generaci je menší než počet štěpných reakcí v první 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 (příměsí v palivu) či absorbátorem. Tento stav je žádoucí například při snižování výkonu aktivní zóny.</p>
Kritický stav	<p>Jestliže počet štěpných reakcí v druhém sledu způsobené neutrony uvolněné při štěpení v první generaci je stejný jako počet štěpných reakcí v první 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.</p>
Nadkritický stav Havárie	<p>Jestliže počet štěpných reakcí v druhé generaci je větší než počet štěpných reakcí v první 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 z kvůli nezastavení nadkritického stavu v aktivní zóně, a to havárie v Sovětské jaderné elektrárně Černobyl (1986) a amerického experimentálního reaktoru SL-1 (1961).</p>
Multiplikační faktor	<p>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.</p>

Regulační tyče
 Absorbátor
 Aktivní zóna
 Zpožděné neutrony
 Radioaktivní přeměny

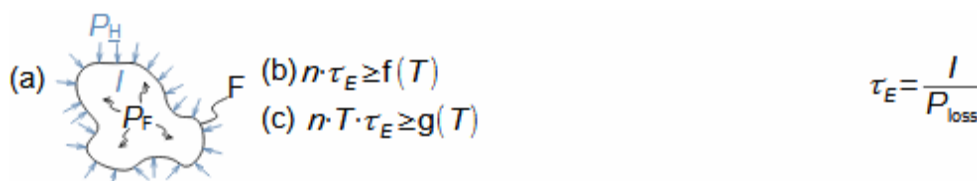
Výkon aktivní zóny v jaderném reaktoru se standardně reguluje pomocí regulačních tyčí obsahující absorbátor, které se do aktivní zóny zasouvají (výkon klesá) nebo vysouvají (výkon roste). Zasouváním regulačních tyčí dochází k pohlcování neutronů. Při přechodu ze stavu podkritického na nadkritický stav 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 přirozeném rozpadu 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 bilance
 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 plazma 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

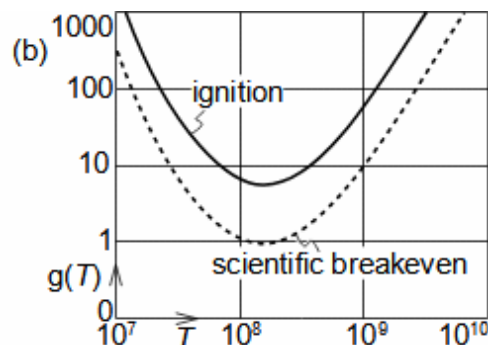
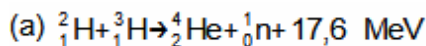
(a) energetická bilance 1 m³ plazmatu; (b) Lawsonovo kritérium; (c) Lawsonovo kritérium pro případ konstantního tlaku plazmatu. F-vyšetřovaný objem fúzního paliva. I [eV·m³] tepelná energie (entalpie) plazmatu v jednotce objemu; n [m⁻³] hustota jader; P_F [eV·s⁻¹·m⁻³] fúzní výkon; P_H [eV·m⁻³] tepelný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

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 vyrovnání (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 bilance 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.

Vědecké vyrovnání
Zapálení
Inženýrské vyrovnání
Jaderná fúzní elektrárna
Vlastní spotřeba

Fúze vodíku
Slunce
Inženýrské vyrovnání

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 Slunce², 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 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].

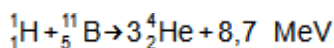


5: Rovnice jaderné fúze vodíku

(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 bilance
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 nabitě částice, které lze zpomalit přímo pomocí magnetohydrodynamického generátoru a odpadne nutnost transformace uvolněného tepla pomocí tepelného oběhu.



6: Příklad bezneutronové fúzní reakce

Jaderné štěpné reaktory

Aktivní zóna
Regulační tyče

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. Základní části jaderného reaktoru je aktivní zóna, která obsahuje štěpitelná atomová jádra. Touto aktivní zónou procházejí jednak chladicí kanálky a jednak otvory pro vedení regulačních tyčí obsahující absorbátor. 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 spuštění prvního jaderného reaktoru. Všimněte si ruční manipulace s regulační tyčí. Autor obrázku: Gary Sheehan (1957) [Wikimedia Commons].

Obminsk
Nautilus

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 lodní 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 CO_2). 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

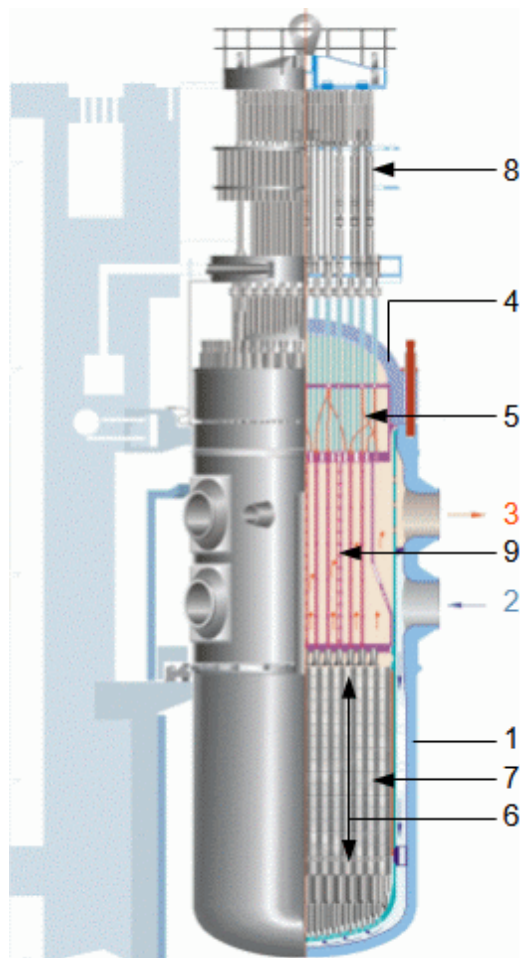
Jaderný reaktor je zařízení, ve kterém se realizuje řízená štěpná reakce. Dnes se používá několik typů reaktorů, které lze dělit podle různých kritérií (podle použitého chladicího média aktivní zóny reaktoru, jestli chladivo dosahuje varu či nikoliv, podle typu moderátoru...). Základním kritériem, podle 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).

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 tlakovodního 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 nuklidy absorbátoru v různých koncentracích, podle účelu jejich použití a odtud se rozlišují tyče kompenzační, řídicí a havarijní.

Kompenzační tyče

Štěpitelné palivo

H_3BO_3

Reaktivita

Základní absorpce

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 absorpce 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

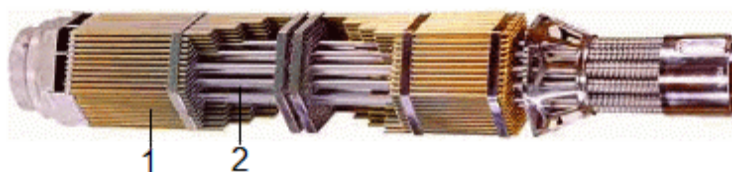
Okamžité změny výkonu reaktoru se provádí pomocí řídicích tyčí. Tyto tyče reagují na jakoukoliv změnu výkonu a podle okamžité potřeby se do aktivní zóny zasunují nebo se z ní vysunují, tím se udržuje stav aktivní zóny $\rho=0$. Účinnou složkou řídicích tyčí, která absorbuje neutrony je většinou bór ve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

Havarijní tyče
Rychlost posuvu

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.

Havarijní a regulační soubor
Palivová kazeta
Klastr

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].

Kritická teplota vody

Teplu 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 reaktorů

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

Jaderné fúzní reaktory

V současnosti je sice uskutečňována jaderná fúze v experimentálních reaktorech, ale zatím ještě nedosáhl žádný experiment alespoň hodnot pro vědeckého vyrovnání. 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

Vodíková bomba

Ivy Mike

Zapálení

Edward Teller

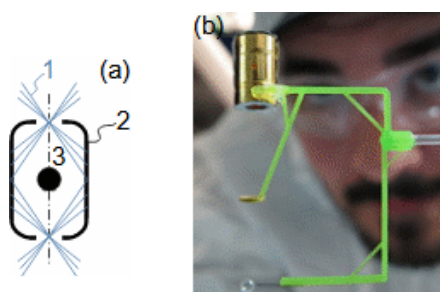
Za první úspěšnou energeticky kladnou realizaci fúzní reakce lze považovat test americké vodíkové bomby Ivy Mike v roce 1952. V tomto případě bylo dosaženo podmínek pro zapálení deuteria a tritia uvnitř pomocí masivního toku γ -záření, které stlačovalo náplň. Toto záření bylo generováno jadernou štěpnou explozí. 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), a proto je považován i za vynálezce tohoto druhu zbraně [Kraus, 2014].

Lasser

hohlraum

NIF Laser

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. 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.



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 udržení

TOKAMAK

Igor Kurčatov

Andrej Sacharov

Toroidální směr

Poloidní směr

Existuje více typů jaderných fúzních reaktorů s magnetickým udržení, přičemž jedno z nejslibnějších zařízení pro řízenou fúzi atomových jader je TOKAMAK (zkratka ruských slov: TOroidalnaja KAmarea i MAgnitnyje Kатуški – 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 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.

Magnetické pole

Ohnický ohřev

Mikrovlnný ohřev

Kinetický ohřev

Fúzní energie

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. 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

Vývěva

Faktor velikosti

Teplo s TOKAMAKů je odváděno chladícím 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.

TOKAMAK JET

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.

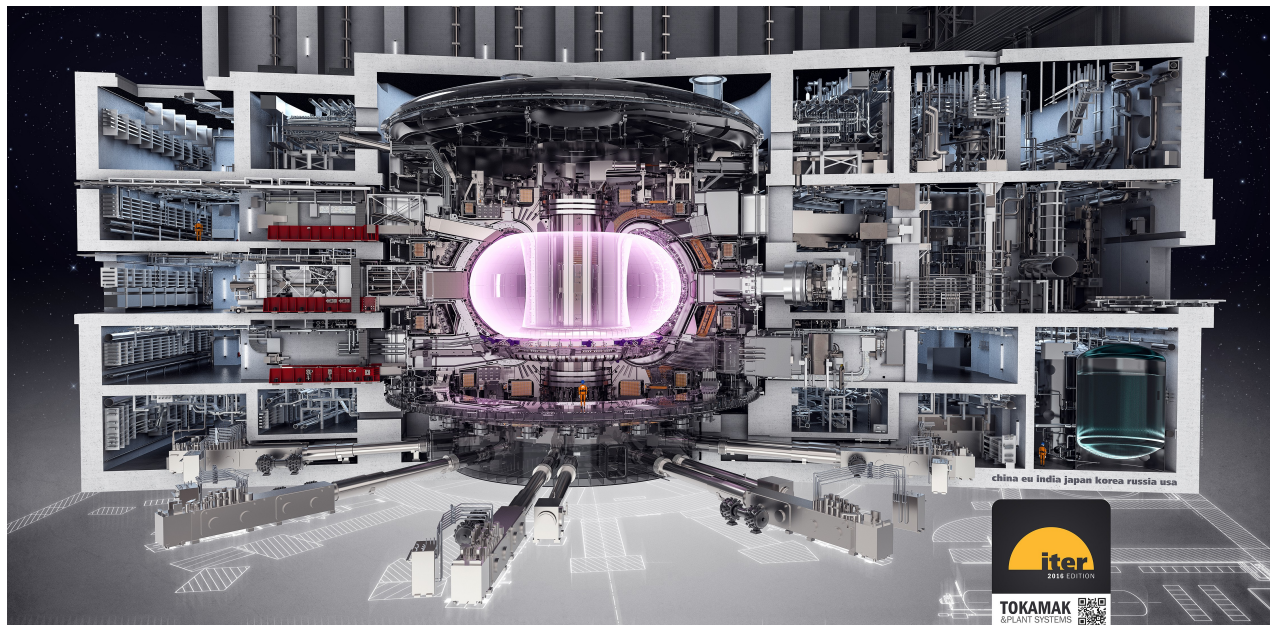
ITER

Jaderné štěpení

Lithium

Tritium

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].



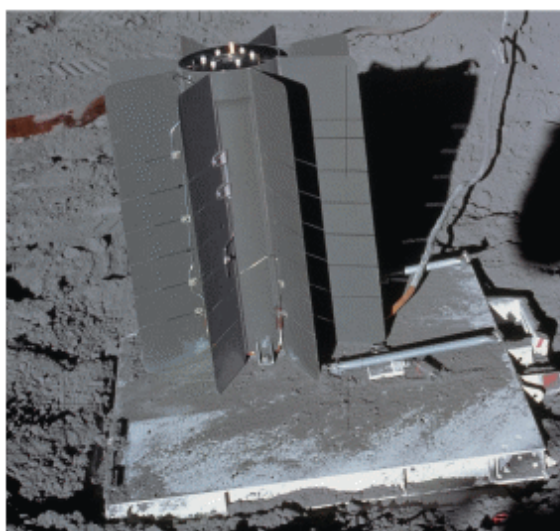
12: Jaderný fúzní reaktor typu TOKAMAK v ITERU

Obrázek [Obrázek: iter.org].

Radioizotopové generátory

Radioaktivita
Termoelektrický
generátor
Stirlingův motor

Radioizotopové generátory využívají teplo uvolňované při radioaktivních přeměnách radionuklidů uvnitř generátoru k transformaci na elektřinu pomocí termoelektrických generátorů, Obrázek 13. 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 [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 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. Plutoniiová náplň je válcovitého tvaru, přičemž mezi ní a válcovým pláštěm jsou umístěny termočlánky (442 kusů), které jsou druhou stranou připojeny k chladicím plochám – na obrázku jsou dobře patrné. Uvnitř pláště byla teplota $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, na chladicích plochách už jen $275\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výška zařízení je necelého 0,5 m. Technické údaje [Anon., 2020cit.], obrázek [Wikimedia Commons].

Ostrovni 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 odlehlých 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 po proběhlých rekonstrukcích 1822 MWe.

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 (Vrabc)
VR-2

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.

LVR-15
LR-0

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 nakládání 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
Chladicí 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 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...

VE Dalešice
Rozvodna Slavětice
Meteorologický stožár

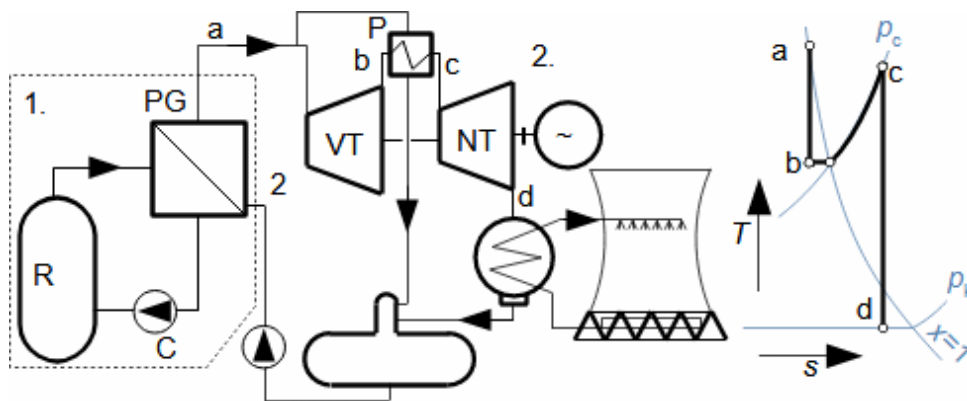
K samotné elektrárně jsou přidružené přímo další závody, které nemusí být v bezprostřední blízkosti elektrárny. Především se jedná o zdroje chladicí vody, rozvodny elektřiny, ze které je elektřina z elektrárny distribuována do nadřazené sítě apod. V případě EDU se jedná o přečerpávací elektrárnu Dalešice (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
Kontejment
Barbotážní věž

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)) 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
Parní oběh
Parogenerátor
Primární okruh
Sekundární okruh

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 chladicí médium, které chladí reaktor a získané teplo předává v parogenerátoru přes teplosměnnou plochu do okruhu sekundárního, který je tvořen klasickým parním oběhem⁶ a technologiemi k nim náležejícími.



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

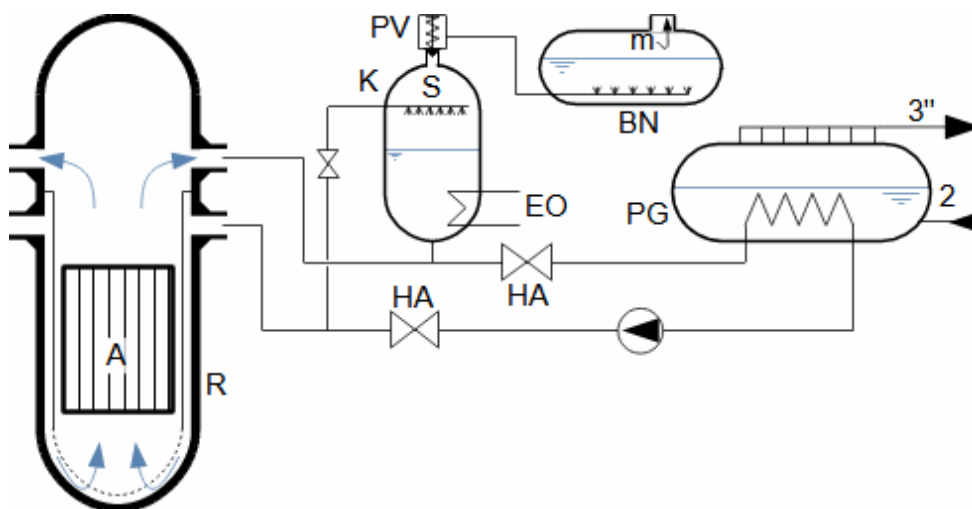
1 zařízení náležející do primárního okruhu; 2 zařízení náležející do sekundárního okruhu. R-jaderný reaktor; C-cirkulační čerpadlo; PG-parogenerátor; P-přihřívák; VT-, NT-vysokotlaké a nízkotlaké díly turbíny. T [K] absolutní teplota; s [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] měrná entropie vody/vodní páry;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

Tepelná účinnost

Tepelná účinnost⁶ 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-pojistná membrána; EO-elektroohřívák.

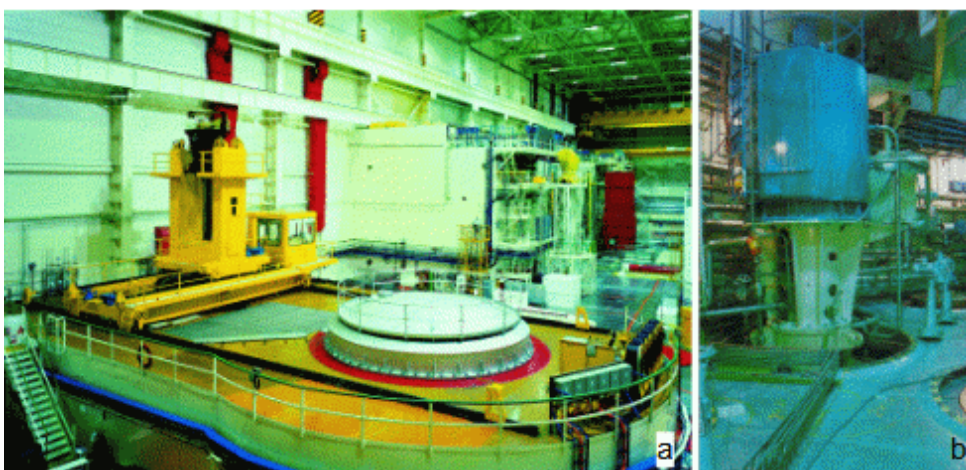
Hlavní cirkulační
čerpadlo
Parogenerátor

V reaktoru je chladicí voda ohřata 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 odváděna 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

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 16. V případě, že je tlak naopak nutné zvýšit, pak se zapnou elektroohříváky, které jsou nainstalovány pod hladinou kompenzátoru.

Pojistný ventil
Barbotážní nádrž
Pojistná membrána

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.

Sekundární okruh
Parní turbína
Přihřívání
Separátor vlhkosti

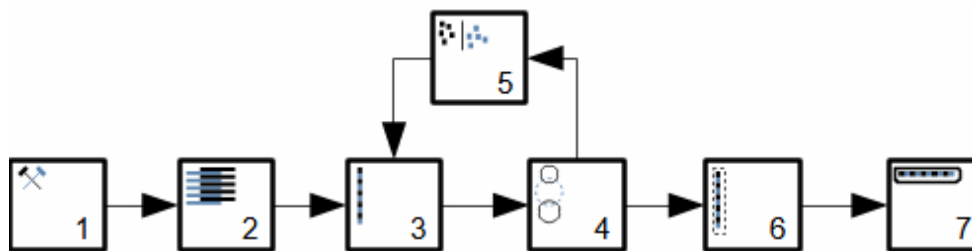
V sekundárním okruhu je zařazena parní turbína, ve které expanduje sytá pára, respektive mírně přehřátá o několik stupňů Celsia, viz [Tabulka 19](#). Při expanzi syté páry z tak vysokého tlaku by pára na konci turbíny měla nízkou suchost páry, proto je expanze páry rozdělena na dvě části, viz [Obrázek 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 separátor 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 (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 20](#).



20: Schéma palivového 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) [Něstěrenko, 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 [Něstěrenko, 1959, s. 21].

Obohacovací závod Uranový koncentrát UF_6	<p>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, na druhou stranu je vysoce toxický a silně korozivní.</p>
Obohacený uran UO_2 Palivová tableta Palivový proutek	<p>Obohacování se provádí například plynou difuzí, odstředováním 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.</p>
Palivová kazeta Zirkonium Austenitická ocel	<p>Výroba palivové kazety (<u>Obrázek 10</u>) 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.</p>
Použitá palivová kazeta Radionuklidy	<p>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 zněj na rozdíl od čerstvého paliva vysoce radioaktivní materiál.</p>
Radioaktivní přeměny Ionizující záření Bazén použitého paliva Stínění Filtrace vody Ředění vody	<p>Použité palivové kazety se nejprve ukládají do bazénu vedle reaktoru (<u>Obrázek 22</u>), 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.</p>



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.

Přepřacovací závod
Produkty štěpení
Separace

Použité jaderné palivo stále obsahuje štěpitelné izotopy ^{235}U . Proto se někdy podrobuje přepřacování. K tomu je třeba odstranit radioaktivní produkty štěpení. Tento proces je vzhledem k radiaci a dalším faktorům 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.

Jaderná bomba

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

MOX
 UO_2
 PuO_2

Plutonium z přepřacovacího 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 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.

Rychlé množivé reaktory
Plutonium
Rychlé neutrony
Účinný průřez pro absorpci neutronu
Tekutá sůl

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 veškeré produkty štěpení lze opět v přepracovacím závodě zpracovat do budoucích palivových kazet.

Mezisklad použitého jaderného paliva
Kontaminované látky
Životní prostředí
Nízká aktivita
Střední aktivita
Vysoká aktivita

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 částic 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 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.

Vysoká aktivita
Mokrý chlazení
Suché chlazení

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
Bezpečnostní kontejner

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 umístěná 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 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

Úřad pro jadernou 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...). V České republice má na starost dozor nad jadernou bezpečností, vystavování 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 nejzasazenější 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)

25: Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí

Úlohy

Úloha 1:

Štěpná energie
Fúzní energie

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:	zadáni:	$m_U; m_{pU}; m_H$	§5:	odečet:	Q_{ff}
§2:	odečet:	$e_U; N_A; m_u; A_r$		výpočet:	m_{U2005}
	výpočet:	$M_U; v_U; Q_U$	§6:	výpočet:	$m_{H2O2005}$
§3:	odečet:	ω_{235U}			
	výpočet:	Q_{pU}			
§4:	odečet:	e_H			
	odečet:	$A_{r,H2O}$			
	výpočet:	$M_{H2O}; v_H; Q_{H2O}$			

Postup řešení Úlohy 1, popis 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, *Transformační technologie*, Brno, [on-line], ISSN 1804-8293, <https://engineering-sciences.education/technicka-matematika.html>.
- ŠKORPÍK, Jiří, 2024, Radioaktivita a ionizující záření, *Transformační technologie*, 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.
- 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 Primeněnije 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 bohemia, Praha, ISBN 978-80-87683-45-3.
- WIKIMEDIA COMMONS, [on-line], [cit. 2010]. Dostupné z <http://commons.wikimedia.org>.