

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA PEDAGOGICKÁ
KATEDRA CHEMIE

Jaderné reakce a využití jaderné energie
Bakalářská práce

Marie Mrázová

P16B0024P

Chemie se zaměřením na vzdělávání

Plzeň 2019

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně
s použitím uvedené literatury a zdrojů informací.

Plzeň, 28. 6. 2019.....

vlastnoruční podpis

Velice ráda bych poděkovala PaedDr. Vladimíru Sirotkovi, CSc, za odborné vedení bakalářské práce, ochotu, trpělivost a za cenné rady, které mi poskytl při konzultacích. Také bych moc ráda poděkovala i ostatním učitelům Pedagogické fakulty za získání odborných znalostí během celého studia. Dále bych chtěla poděkovat rodině a nejbližším za to, že mi pomáhali a pomáhají během studia.

Obsah

1. ÚVOD.....	3
2. STRUKTURA ATOMU	4
2.1. Základní pojmy.....	4
2.2. Atomové jádro	5
2.2.1. Hmotnost a vazebná energie jádra.....	6
2.2.2. Poloměr atomového jádra.....	6
2.2.3. Jádro a jeho tvar.....	6
2.3. Subatomární částice.....	7
3. RADIOAKTIVITA	8
3.1. Příčiny radioaktivity	9
3.2. Radioaktivní záření.....	10
3.2.1. Záření alfa.....	11
3.2.2. Záření beta	11
3.2.3. Záření gama	12
3.2.4. Neutronové záření	13
3.3. Kinetika radioaktivních přeměn	13
3.3.1. Rychlost radioaktivní přeměny.....	13
3.3.2. Základní zákon radioaktivních přeměn a přeměnová konstanta	14
3.4. Měření radioaktivity	15
3.4.1 Působení na fotografickou desku.....	15
3.4.2. Ionizace plynu	16
4. JADERNÉ REAKCE	17
4.1. Energetika jaderné reakce.....	18
4.2. Rychlost a výtěžek jaderné reakce	18
4.3. Rozdělení jaderných reakcí	19
4.3.1. Transmutace	19

4.3.2. Štěpná reakce.....	19
4.3.3. Jaderná syntéza	20
4.4. Štěpení jádra a využití jaderné energie.....	20
4.4.1. Historie štěpné reakce.....	20
4.4.2. Štěpná jaderná reakce	21
4.4.3. Řízená řetězová reakce a regulace výkonu reaktoru	21
4.4.4. Výroba uranu a jaderného paliva.....	25
4.4.5. Uran jako palivo	26
4.4.5. Jaderný reaktor	27
4.4.6. Části jaderného reaktoru.....	28
4.4.7. Typy reaktorů	29
4.4.8. První jaderný reaktor	36
4.4.9. Jaderná elektrárna	37
4.4.10. Výhody a nevýhody využití jádra.....	38
4.4.11. Jaderné havárie	39
4. 5. Termonukleární reakce a využití termonukleární energie.....	40
4.5.1 Fúzní palivo	40
4.5.2. Princip tokamaku.....	41
4.5.3. ITER	43
4.6. Jaderné zbraně	44
4.6.1. Štěpné jaderné zbraně.....	44
4.6.2. Termonukleární zbraně.....	45
4.6.3. Zákaz používání jaderných zbraní.....	46
5. ZÁVĚR.....	47
6. Seznam obrázků.....	48
7. Seznam tabulek.....	49
8. SEZNAM LITERATURY.....	50

9. RESUMÉ.....	53
----------------	----

1. ÚVOD

V bakalářské práci se zaměřuji na jaderné reakce a využití jaderné energie. V práci se zabývám strukturou atomového jádra, radioaktivitou a využitím jaderných reakcí. Podrobně je pojednáno zejména o využití jaderné energie při jaderném štěpení a jaderné fúzi.

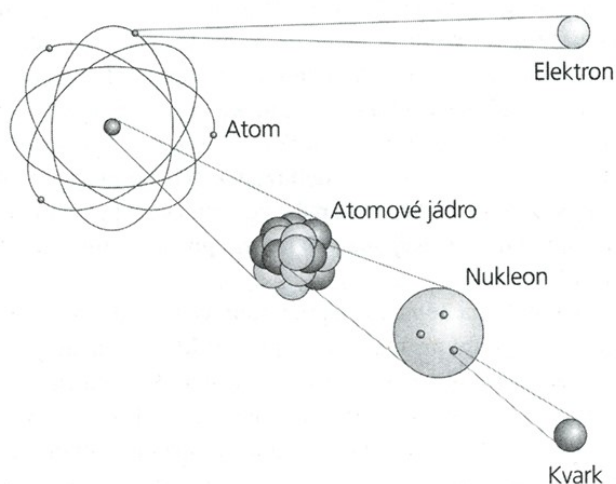
Jaderná energie se začala využívat od druhé poloviny 20. století. Od té doby se využití jaderné energie stalo jedním z hlavních odvětví vědeckého výzkumu i energetiky.

Jaderná energetika je důležitá pro budoucnost výroby elektrické energie vzhledem k tomu, že zásoby fosilních paliv se s jistotou vyčerpají mnohem dříve, než zásoby paliva do jaderných reaktorů. Způsoby výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů by nemusely stačit na pokrytí globální spotřeby elektrické energie. V současnosti se kromě energie z jaderného štěpení zkoumá i využití energie z jaderné fúze.

2. STRUKTURA ATOMU

2.1. Základní pojmy

Atomy se skládají z atomového jádra a elektronového obalu. Atomové jádro se skládá z protonů p a neutronů n . Schéma struktury atomu je na obrázku 1. Protony mají kladný elektrický náboj, neutrony jsou elektricky neutrální částice. Protony a neutrony jsou dále složeny z menších částic, které se nazývají kvarky. V současné době se kvarky a elektrony zdají být základními stavebními částicemi hmoty a jsou dále nedělitelné. Přehled základních vlastností mikročástic je v tabulce 1.



Obr. 1 - Struktura atomu¹

Tabulka 1 - Přehled vlastností základních mikročástic²

Mikročástice	Symbol	Náboj [C]	Hmotnost [kg]
elektron	e	$-1,602 \cdot 10^{-19}$	$9,109 \cdot 10^{-31}$
proton	p	$+ 1,602 \cdot 10^{-19}$	$1,673 \cdot 10^{-27}$
neutron	n	0	$1,675 \cdot 10^{-27}$

2.2. Atomové jádro

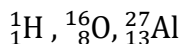
Jak bylo uvedeno, atomové jádro se skládá z protonů a neutronů. Tyto částice se také nazývají nukleony. Jádro atomu je sídlem kladného elektrického náboje a je v něm soustředěna téměř veškerá hmotnost atomu. O počtu protonů v atomovém jádře nás informuje protonové (atomové) číslo Z a o počtu neutronů neutronové číslo N . Součtem protonového a neutronového čísla dostáváme nukleonové (hmotnostní) číslo A , které udává počet všech nukleonů (protonů a neutronů) v jádře. Obecný zápis uvedených charakteristik atomu:



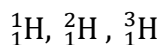
kde X je chemická značka prvku.

Na základě počtu neutronů a protonů v jádře jsou definovány pojmy nuklid, izotop a izobar.

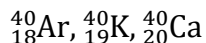
Nuklid je soubor identických atomů, jádra nuklidu mají stejné složení. Jejich protonové a nukleonové číslo je totožné. Je známo 266 stabilních nuklidů, ostatní jsou radioaktivní. Známé nuklidy jsou např.:



Izotopy jsou nuklidy mající stejné protonové číslo, ale různé neutronové číslo. Dobře známé jsou izotopy vodíku (protium, deuterium a tritium):



Izobary jsou nuklidy mající stejné nukleonové číslo a různé číslo protonové. Příkladem izobarů jsou:



Kvůli stísněnému prostoru v atomovém jádře, kde jsou protony a neutrony, je velmi silné elektrostatické odpuzování mezi protony. Mezi nukleony v jádru musí působit daleko větší přitažlivé síly umožňující větší vzájemnou soudržnost souhlasně nabitých protonů a neutrálních neutronů. Silná jaderná interakce je podstatou těchto jaderných sil.³

2.2.1. Hmotnost a vazebná energie jádra

O hmotnosti jádra by se dalo předpokládat, že se bude rovnat součtu hmotností všech nukleonů, ze kterých se jádro skládá. Ve skutečnosti je hmotnost jádra menší. Podobně jako při vzniku chemické vazby je tvorba jádra z nukleonů doprovázena úbytkem energie. Aby jádro bylo stálé, musí mít menší energii, než výchozí stavební jednotka. Úbytek energie se projeví též hmotnostním úbytkem. Stabilitu atomového jádra můžeme charakterizovat hmotnostním úbytkem Δm .

$$\Delta m = \sum m(p) + \sum m(n) - m(j)$$

kde $m(j)$ je hmotnost daného jádra, $m(p)$ je hmotnost protonů a $m(n)$ je hmotnost neutronů. Vazebná energie jádra je energie, která se uvolní při vzniku jednoho jádra z příslušných nukleonů. Také je to energie, kterou je potřeba dodat na rozbití jádra na jednotlivé nukleony. Čím větší je hodnota vazebné energie, tím je jádro stabilnější.⁴

2.2.2. Poloměr atomového jádra

Dosah jaderných sil definuje poloměr jádra r , je to vzdálenost ve které na nukleon působí jaderné síly. Jaderná síla je ze všech interakcí nejsilnější, působí mezi částicemi hmoty. Empiricky pro něj byl získán následující vztah:⁵

$$r = r_0 A^{\frac{1}{3}} \quad (r_0 = 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ m})$$

Vztah ukazuje, že poloměr jádra r závisí na počtu nukleonů A . Vztah vyvolává představu, že atomové jádro má tvar koule.

2.2.3. Jádro a jeho tvar

Zavedený pojem poloměr jádra r zavádí představu, že jádro atomu má kulový tvar. Ve skutečnosti se v některých případech tvar jádra od ideální koule mírně odlišuje. Jádra tak mohou mít tvar nejen koule, ale také zploštěného elipsoidu jako např. uhlík. Jádra také mohou mít tvar protáhlého elipsoidu, nebo i složitějších těles. Vyskytují se i jádra, které mají více tvarových modifikací. Příkladem může být jádro olova ^{186}Pb , které může mít protáhlý, zploštělý nebo kulový tvar.⁵

2.3. Subatomární částice

Kromě elektronu, protonu a neutronu byly objeveny a popsány další částice, které se významně podílejí na stavbě atomového jádra. Subatomární částice lze rozdělit podle stoupající hmotnosti na tři skupiny – lehké částice (*leptony*), střední částice (*mezony*) a těžké částice (*baryony*). Všeobecně platí, že každá částice má svou antičástici s výjimkou fotonu a neutrálního mezonu.⁶

3. RADIOAKTIVITA

Radioaktivita (radioaktivní přeměna) je jev, při němž se nuklidy samovolně přeměňují na jiné. Nuklidy mající tuto vlastnost se nazývají radioaktivní. Jádro se nejčastěji přemění v jiné jádro a vyzáří částici, při čemž může ztratit část své energie formou radioaktivního záření (viz kap. 3.2). Při jaderné přeměně se mění struktura jádra - izotop jednoho prvku se mění v izotop prvku jiného. Název radioaktivita pochází z latiny: *radius* – paprsky a *activitas* – činnost.

Počet radioaktivních přeměn za jednu sekundu vyjadřuje aktivita A , jednotkou aktivity je Becquerel (Bq).

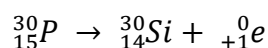
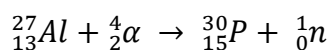
V přírodě se vyskytují *stabilní* i *radioaktivní nuklidy*. Nuklidy, které lze považovat za stabilní, jsou ve skutečnosti velmi slabě radioaktivní a přeměňují se za velmi dlouhou dobu.

Rozlišují se dva druhy radioaktivity. Z fyzikálního hlediska však mezi nimi není rozdíl.

Přírozená radioaktivita – při samovolné přeměně jader nuklidů, které se vyskytují běžně v přírodě. Těch je zatím známo zhruba 56.

Umělá radioaktivita – přeměna uměle vytvořených nuklidů připravených laboratorně při jaderných reakcích.

To, že atomová jádra u některých nuklidů nejsou stálá, si fyzici a chemici začali všimnout koncem 19. století. Radioaktivitu objevil Henri Becquerel v roce 1896 u solí uranu. V roce 1903 dostala Marie Curie-Skłodowská se svým manželem Pierrem Curie Nobelovu cenu za výzkum přírozené radioaktivity. Umělou radioaktivitou a jadernými reakcemi se zabývala jejich dcera Irène Joliot-Curie. Společně se svým manželem Frédéricem Joliot-Curie připravili v roce 1934 nestabilní nuklid fosforu ozařováním hliníku alfa částicemi. Takto vzniklý fosfor je radioaktivní a následně se přeměňuje na izotop křemíku, při čemž se uvolní jeden pozitron. Průběh reakce je znázorněn následujícími rovnicemi.⁴





Obr. 2 – Symbol pro označení radioaktivního záření⁷

3.1. Příčiny radioaktivity

Z více než 3200 známých nuklidů je stálých pouze 273. Empiricky bylo zjištěno, že jádra jsou stálá (nepodléhají radioaktivní přeměně) jen při určitém poměru mezi počtem neutronů a protonů (N/Z). Tento poměr je u stabilních lehkých jader ($Z \leq 20$) roven 1. U těžších jader se postupně zvětšuje až do 1,5. Aby byla zachována stabilita jádra při rostoucím protonovém čísle, musí v jádru přibývat větší počet neutronů než protonů. Větší počet neutronů zmenšuje vzájemné odpuzování protonů.

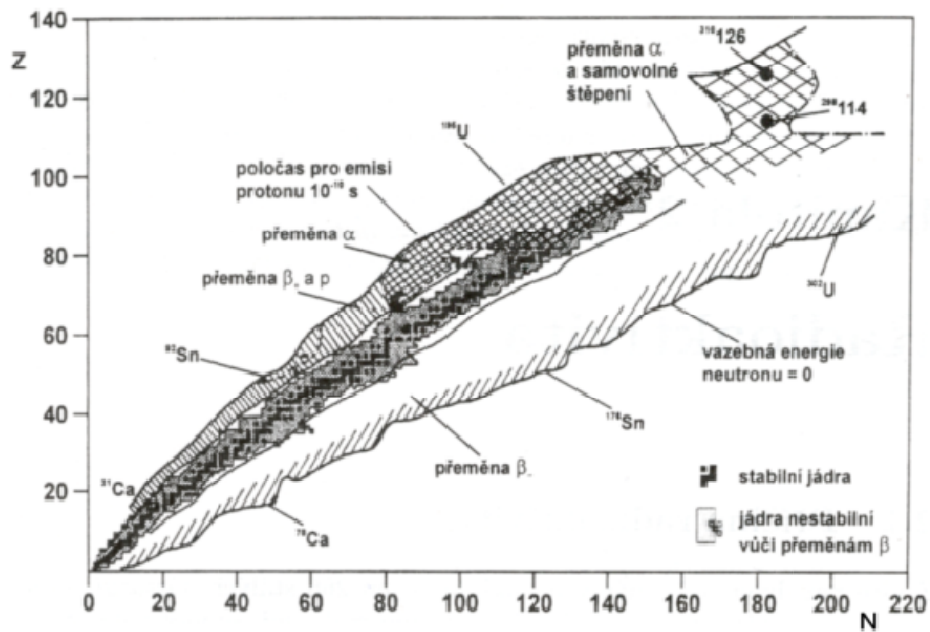
Stabilita jádra je dána tzv. *magickými čísly* pro počet protonů a neutronů v jádře. Pro počet protonů jsou to čísla: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 114, 126 a 164 a pro počet neutronů: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 114, 126, 152, 184, 258 a 308. Nuklidy mající počet protonů nebo neutronů roven magickému číslu se vyznačují značnou stabilitou. Oblast stabilních nuklidů je znázorněna na obr. 3.³

Velmi stabilní jsou pak především tzv. „dvojmagické nuklidy“ – počty protonů i neutronů jsou oboje rovny magickým číslům. Např.: $^{16}_8\text{O}$, $^{40}_{20}\text{Ca}$, $^{208}_{82}\text{Pb}$, $^{298}_{114}\text{Fl}$.

Pokud má jádro pro určité protonové číslo příliš málo nebo mnoho neutronů, stává se radioaktivním. Dochází k samovolné přeměně nejčastěji na jiné jádro a k vyzáření částice. Produkty, které vzniknou, nesou vždy určitou kinetickou energii, z čehož plyne, že při radioaktivní přeměně se uvolňuje energie. To je možné pouze tehdy, když původní jádro má větší klidovou energii (hmotnost), než činí součet klidových energií (hmotností) produktů přeměny. Nerovnost představuje základní (hmotnostní) podmínku radioaktivity.^{3,5}

$$M(X) > M(Y) + M(\text{částice}) \quad ,$$

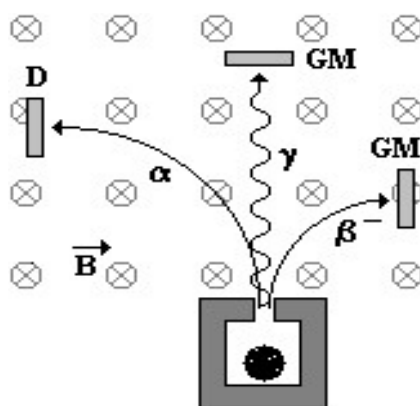
kde $M(X)$ je hmotnost původního jádra a $M(Y)$ je hmotnost produktu.



Obr. 3 - Oblast stabilních nuklidů (řeka stability)⁵

3.2. Radioaktivní záření

Radioaktivní prvky mají schopnost vysílat záření, které proniká i tmavým papírem a tenkými kovovými fóliemi. Toto záření označujeme jako radioaktivní (jaderné), jelikož se jedná o záření, které je vysílané při přeměně jádra. Existuje několik druhů radioaktivního záření, které se od sebe liší schopností pronikat látkou a svým chováním v elektrické a magnetickém poli. Tyto druhy radioaktivního záření byly označeny jako záření alfa α , záření beta β a záření gama γ . Jednotlivé druhy radioaktivního záření lze rozlišit v homogenním magnetickém poli o určité magnetické indukci a následně je můžeme detekovat např. Geiger–Müllerovým počítačem (obr. 4). Záření α a záření β je tvořeno nabitými částicemi, na které v homogenním magnetickém poli působí magnetická síla. Záření γ je tvořeno energetickými fotony, částicemi bez hmotnosti a náboje. Magnetická síla na ně nepůsobí.⁸

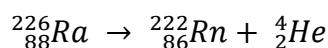
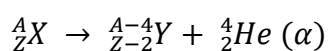


Obr. 4 - Chování radioaktivních záření v magnetickém poli⁸

3.2.1. Záření alfa

Záření α se vychyluje v magnetickém i elektrickém poli, je to svazek rychle letících jader atomů helia ${}^4_2\text{He}$. Jádru helia obsahuje dva protony a dva neutrony, je kladně nabitě. Kvůli svému náboji reagují částice α při interakci s hmotou – s elektronovými obaly atomů. Prvek, který vznikne vyzářením α částice, se v periodické tabulce prvků posune o dvě místa doleva.

Schematicky lze částice α vyjádřit například podle následujících rovnic:

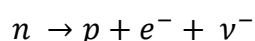


Atomy, se kterými částice α interagují, jsou excitovány nebo ionizovány. Před zářením α se lze chránit. Lze pohltit pouhým listem papíru a ve vzduchu se pohltí na dráze přibližně 4 cm. Alfa částice je nebezpečná při vdechnutí či požití, kdy může negativně působit uvnitř našeho organismu.⁹

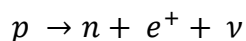
3.2.2. Záření beta

V elektrickém a magnetickém poli se β záření vychyluje, jedná se o nabitě částice. Existují dva druhy záření β .

Záření β^- je tvořeno rychle letícími elektrony. Elektrony vznikají v jádře rozpadem neutronu. Antineutrino se značí $\bar{\nu}^-$.

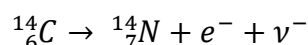
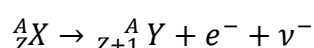


Záření β^{+} je tvořeno kladně nabitými pozitrony. Pozitron je kladně nabitý elektron, který vzniká rozpadem protonu. Neutrino se značí ν .



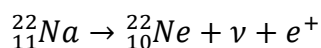
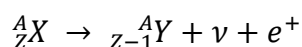
Schematicky je záření β možné vyjádřit takto:

1. Rozpad β^{-} z atomu vylétává společně s elektronem navíc ještě elektronové antineutrino.



Při vyzáření elektronu vzniká prvek v periodické tabulce posunutý o jedno místo doprava.

2. Rozpad β^{+} z atomu vylétává společně s pozitronem elektronové neutrino.



Při vyzáření elektronu vzniká prvek v periodické tabulce posunutý o jedno místo doleva.

Záření β je tvořeno nabitými částicemi a proto interaguje s atomovým obalem. Atomy, se kterými částice β interagují, jsou excitovány nebo ionizovány. Oproti záření α má záření β menší zpomalovací schopnost. Lze ho pohltit tenkým hliníkovým plechem. V suchém vzduchu je pro pohlcení nutná cca 2,5 m dráha.^{5,10}

3.2.3. Záření gama

Záření γ je elektromagnetické záření (proud fotonů) s vlnovými délkami kratšími než 300 pm. Jelikož fotony nemají elektrický náboj, záření γ se neodchyluje od svého původního směru v magnetickém ani elektrickém poli. To má za důsledek, že se volně šíří látkou a značně se rozptyluje. Částice γ silně ionizuje látku, se kterou interaguje, a uvolňuje z ní nabitě částice. Radionuklid vyzařující záření γ se nemění. Přechází pouze do stavu, ve kterém má nižší energii.

Záření γ je ze všech druhů radioaktivního záření nejpronikavější. Záření γ lze oslabit silnou vrstvou materiálu obsahující jádra těžkých prvků (olova), ale nelze je zcela pohltnout.¹¹

3.2.4. Neutronové záření

Neutronové záření má v současné době velký význam. Toto záření nevzniká u přírodních radionuklidů, ale lze jej vyvolat uměle v jaderných reaktorech nebo při jaderné explozi. Proudů rychle letících neutronů mají vysokou pronikavost, jelikož nenesou elektrický náboj a nemohou ztrácet energii přímou ionizací atomů. Reagují pouze s atomovými jádry, interakce s elektronovými obaly je minimální.

*S atomovým jádrem může neutron reagovat:*⁵

1. *pružnými srážkami* – neutron jádru předá část své kinetické energie, čímž se neutron zpomalí. Zpomalení bude tím větší, čím je hmotnost jader bližší hmotnosti neutronu. Pokud se srazí částice s velmi malou hmotností s částicí s velkou hmotností, k předání energie téměř nedochází.
2. *nepružnými srážkami* – při této srážce se mohou z jader uvolňovat i nabitě částice. Při této srážce se neutron s jádrem spojí. A jádro se může dostat do nestabilního stavu.

K ochraně před neutrony je třeba volit takový materiál, který obsahuje vodík a jádra lehkých prvků, protože takové materiály neutrony dobře pohlcojí. Příkladem vhodného materiálu může být voda, parafín nebo beton.

3.3. Kinetika radioaktivních přeměn

Pro každý radioaktivní nuklid je rychlost radioaktivní přeměny jiná. Veličiny popisující rychlost radioaktivní přeměny jsou pro jednotlivé radioaktivní nuklidy charakteristické.

3.3.1. Rychlost radioaktivní přeměny

U radioaktivních látek nás zajímá rychlost, jakou se radioaktivní atomy přeměňují. Každé jádro radioaktivního prvku má pro daný prvek charakteristickou pravděpodobnost rozpadu. Pokud vzorek obsahuje N nerozpadlých jader, rychlost rozpadu je dána rovnicí:⁴

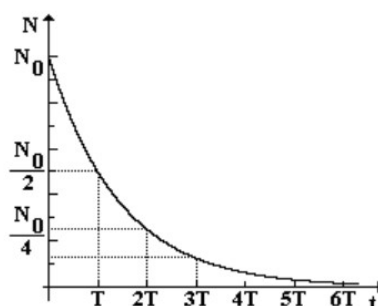
$$\frac{-dN}{dt} = kN$$

Konstanta úměrnosti k se nazývá rozpadová konstanta, je to pravděpodobnost rozpadu daného jádra za jednotku doby t . Řešením této rovnice dostaneme závislost N na t :

$$N = N_0 e^{-kt}$$

označení e je základ přirozených logaritmů a N_0 je označení pro počet nerozpadlých atomů v čase $t=0$.

Graf časové závislosti počtu nerozpadlých jader ve vzorku je na obrázku 5.



Obr. 5 - Graf časové závislosti počtu nerozpadlých jader ve vzorku¹²

Místo radioaktivní rozpadové konstanty k se používá poločas rozpadu $t_{\frac{1}{2}}$. Vztah mezi těmito veličinami je vyjádřen následujícím vzorcem:

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{k}$$

3.3.2. Základní zákon radioaktivních přeměn a přeměnová konstanta

Radioaktivní atomy postupně v čase ubývají a to způsobuje radioaktivní přeměna λ . Základní radioaktivní zákon říká, že za dostatečně krátký časový interval se přemění vždy stálá část z přítomného počtu N atomů radioaktivního nuklidu:⁵

$$\frac{dN/N}{dt} = \lambda$$

Označení pro přeměnovou (rozpadovou) konstantu λ jejíž rozměr je s^{-1} . Pro daný nuklid je přeměnová konstanta charakteristickou veličinou. V tabulce 2 jsou uvedeny přeměnové konstanty a poločasy některých radioaktivních nuklidů.

Tabulka 2 - **Konstanty a poločasy rozpadů vybraných nuklidů**⁵

Nuklid	Rozpadová konstanta λ	Poločas rozpadu $t_{\frac{1}{2}}$
²³⁸ U	$4,87 \cdot 10^{-18}$	$4,51 \cdot 10^9$ roků
¹⁴ C	$3,84 \cdot 10^{-12}$	5736 roků
¹³⁷ Cs	$7,23 \cdot 10^{-10}$	30 roků
¹³¹ I	$9,93 \cdot 10^{-7}$	8,1 dní
²¹¹ At	$2,67 \cdot 10^{-5}$	7,2 hod
²²³ Fr	$5,25 \cdot 10^{-4}$	22 min
²⁶² Db	0,0204	34 s
²⁶³ Sg	0,77	0,9 s

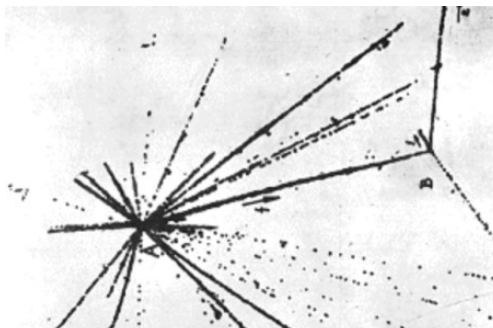
3.4. Měření radioaktivity

Atomy, elektrony, protony, neutrony nebo jakékoli jiné částice nedokážeme pozorovat ani sebedokonalejšími optickými mikroskopy. Přesto se na konci 19. století našel způsob, jak částice zaznamenávat a sledovat jejich dráhu, rychlost, energii a další vlastnosti. Důležitou roli v sledování mikrosvěta hraje ionizace. V dnešní době, už je několik přístrojů, kterými můžeme měřit počet, energii částice, intenzitu záření a proměřovat dráhy částic. Používají se různé typy detektorů, jejichž konstrukce je založená na různých fyzikálních jevech, jako je například ionizace plynu a působení na fotografickou emulzi. V takových případech se využívá interakce záření s vhodným prostředím. Takovým způsobem lze registrovat pouze nabitě částice. Abychom byli schopní detekovat neutrální částice, je potřeba nejprve získat částice nabitě, například jadernými reakcemi, které pak můžeme detekovat.¹³

3.4.1 Působení na fotografickou desku

Fotografická deska je citlivá emulze tvořená mikrokrystaly bromidu stříbrného rozptýleného v želatině. Ionizující částice aktivují bromid stříbrný a vytváří v emulzi „latentní“ obraz, který se po vyvolání zviditelní. Příkladem může být jaderná emulze, se kterou se v roce 1896 podařilo Henri Becquerelovi objevit radioaktivitu. Pozorování

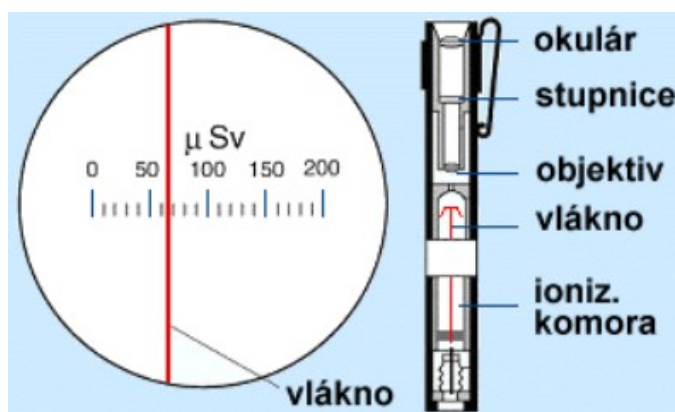
stopy částice na dlouhém úseku nám umožňuje velká tloušťka citlivé vrstvy. Ze stop můžeme určit, o jakou energii se jedná nebo můžeme studovat srážky a jaderné přeměny. Ukázkou stopy v jaderné emulzi je vyobrazeno na obr. 6.¹³



Obr. 6 - Stopa v jaderné emulzi¹³

3.4.2. Ionizace plynu

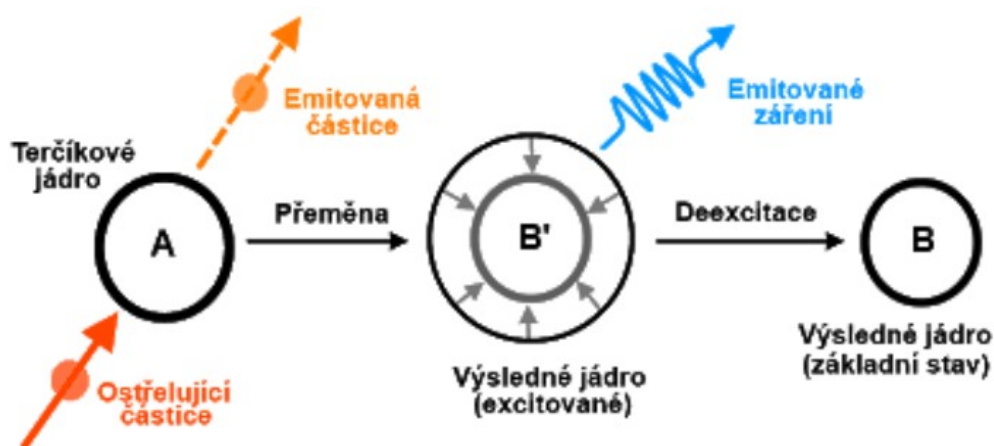
Při ionizaci plynu se při průchodu nabitě částice nebo záření plynem se vytváří určitý počet záporných a kladných iontů. Zjišťování energie a počtu vzniklých iontů je podstatou této detekční metody. Příkladem je proporcionální komora, kde je vysoké napětí připojeno na elektrodách ionizační komory. Vznikající ionty, ionizací plynové náplně se shromažďují na elektrodách a ve vnějším obvodu vznikají impulzy. Velikost je přímo úměrná energii záření. Takový typ detektorů slouží k měření počtu a energie těžkých i lehkých částic. Tužkový dozimetr je kombinací ionizační komory a elektrometru. Je to jednoduchý přístroj pro měření dávek záření, tento přístroj nosí pracovníci v náprsní kapse v oblečení. Vláknko je po nabití elektrostaticky odpuzováno. Při gama a beta záření dochází k vybíjení a vlákno je tak odpuzováno stále menší silou. Výchylka odpovídá absorbované dávce, na stupnici se odečítá malým zabudovaným mikroskopem (obr. 7).¹³



Obr. 7 - Soustava tužkového dozimetru¹³

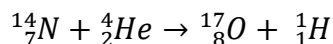
4. JADERNÉ REAKCE

K přeměně atomového jádra nemusí docházet pouze jeho samovolným rozpadem, nýbrž i jadernou reakcí. Jaderná reakce je jaderná přeměna, která je vyvolaná interakcí s jiným jádrem, nukleonem nebo fotonem. Jaderná přeměna, je proces, při kterém samovolně nebo vnějším zásahem dochází ke změně složení jádra. Mění se alespoň jedno z čísel A , Z nebo energetický stav. Interagující látky nazýváme terčové jádro a jaderný projektil (ostřelující částice), produkty jsou nejčastěji nové jádro a emitované částice.



Obr. 8 - Schéma jaderné reakce¹⁴

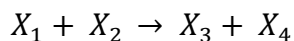
Jadernou reakci můžeme zapsat chemickou rovnicí a musí splňovat zákony zachování energie, hybnosti, nukleonového čísla a náboje. Historicky první jaderná přeměna byla provedena v roce 1919 E. Rutherfordem, který zjistil, že ozařováním dusíku částicemi alfa dojde k jaderné reakci, při níž vznikne jádro kyslíku a uvolní se protium.



Reakci můžeme zapsat i ve zkrácené formě ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p) {}^{17}_8\text{O}$, kde na prvním místě je symbol výchozího nuklidu, v závorce symbol částice použité k bombardování a za ní částice, která se při jaderné reakci uvolňuje. Za závorkou je symbol nově vzniklého nuklidu.⁴

4.1. Energetika jaderné reakce

Energetické zabarvení reakce se značí Q . Závísí na tom, zda produkty v reakci mají v součtu větší nebo menší klidovou hmotnost než interagující částice. Definováno je jako energie ekvivalentní rozdílu hmotností produktů a interagujících částic reakce. Jaderná reakce probíhá podle následujícího schéma:⁵



kde X_1, X_2 představují výchozí látky a X_3, X_4 produkty. Rozdíl hmotností Δm je dán vztahem:

$$\Delta m = m(X_3) + m(X_4) - [m(X_1) + m(X_2)]$$

a zabarvení chemické reakce Q je dáno vztahem:⁵

$$Q = -931,5 \Delta m$$

Pokud je $\Delta m < 0$ tak produkty reakce mají menší hmotnost než interagující částice a pokud $Q > 0$ tak dochází při jaderné reakci k uvolňování energie, jedná se o reakci exoergickou. Pokud $\Delta m > 0$ a $Q < 0$ jedná se o reakci endoergickou. Z praktického hlediska je pochopitelně zájem zejména o exoergické reakce. Reakce endoergická vyžaduje navíc ještě dodání energie, protože produkty, které při reakci vznikají, mají větší hmotnost než interagující částice.

4.2. Rychlost a výtěžek jaderné reakce

Rychlostí jaderné reakce se rozumí časová změna (přírůstek) počtu atomů vznikajícího nuklidu N^* . Rychlost jaderné reakce závisí na počtu atomů terčového nuklidu a na počtu projektilů dopadajících na plošnou jednotku terče (Φ). Tyto veličiny ovlivňují pravděpodobnost zásahu terčového jádra projektilem a tedy i pravděpodobnost vzniku nového nuklidu. Rychlost jaderné reakce lze zapsat podle následujícího vztahu:⁵

$$R = \frac{dN^*}{dt} = \sigma \Phi N$$

Veličina σ má rozměr plochy (m^2), nazývá se účinný průřez jaderné reakce. Závísí na energii projektilu a typu jaderné reakce a úzce souvisí i s výtěžkem reakce. Výtěžek jaderné reakce můžeme zapsat jako poměr počtu vznikajících atomů k počtu projektilů dopadajících na terč. Vyjádříme následujícím vztahem:⁵

$$B = \frac{dN^*}{dt} \cdot \frac{1}{\Phi S} = \frac{\sigma N}{S}$$

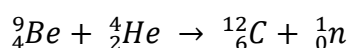
Veličina S je plocha terče. Pro konkrétní terčový nuklid a konstantní tok projektilů závisí výtěžek jaderné reakce především na účinném průřezu reakce, tedy na energii projektilu. Velké výtěžky jsou charakteristické pro exoergické reakce pomalých neutronů. Výtěžek jaderných reakcí se nevyjadřuje v procentech. Takový způsob by nebyl praktický, protože počet vzniklých atomů N^* je ve srovnání s počtem terčových atomů velmi malý. Vzniká-li jadernou reakcí radioaktivní nuklid, je praktickou měrou výtěžku jeho aktivita.

4.3. Rozdělení jaderných reakcí

Jaderné reakce můžeme dělit podle různých kritérií. Jaderné přeměny můžeme rozdělit na přeměny prosté (transmutace), jaderné štěpení (jaderná fisí) a termonukleární syntézu (jaderná fúze).

4.3.1. Transmutace

Při prostých přeměnách, uvolňuje bombardované jádro jednu nebo několik lehkých částic (protony, neutrony nebo elektrony), vznikají jádra nová s protonovým a nukleonovým číslem jen málo odlišným od původního jádra, tento druh reakce se nazývá transmutace. Příkladem této reakce je následující rovnice:

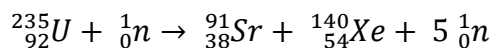


Při studiu transmutací se ukázalo, že ve spoustě případů je vzniklý nuklid nestálý. V přírodních prvcích se nevyskytuje a samovolně se rozpadá. Z přírodních zdrojů se pomocí záření α podařilo získat radioaktivní izotopy dusíku, fosforu, sodíku, draslíku a fosforu. Pomocí neutronového záření se podařilo připravit umělé radioizotopy téměř od všech prvků periodické soustavy.⁴

4.3.2. Štěpná reakce

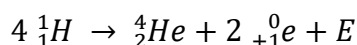
Další skupinou jaderných reakcí je štěpení jader. Jaderné reakce, při které je původní jádro zasažené částicí rozštěpeno na další dvě atomová jádra s protonovými čísly výrazně odlišnými od protonového čísla původního jádra. Při této jaderné reakci se navíc uvolňuje ještě několik dalších částic. Jaderné štěpení je dále detailně popsáno v kapitole 4.4.

Příkladem štěpné reakce může být následující rovnice: ⁴



4.3.3. Jaderná syntéza

Dalším typem je syntéza jader (jaderná fúze). Při této reakci dochází k syntéze atomových jader s nízkým protonovým číslem na atomová jádra s vyšším protonovým číslem. Tyto reakce se také nazývají termonukleární reakce, protože probíhají za vysokých teplot a tlaků. Řádově jsou tyto teploty v rozmezí od $10^6 - 10^9$ K. Tyto reakce probíhají například na Slunci nebo při atomových explozích. Příkladem takovéto reakce může být syntéza jader vodíku, vyjádřena následující rovnicí:

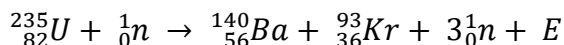


Reakce slučování jader vodíku probíhá v plazmě. ⁴

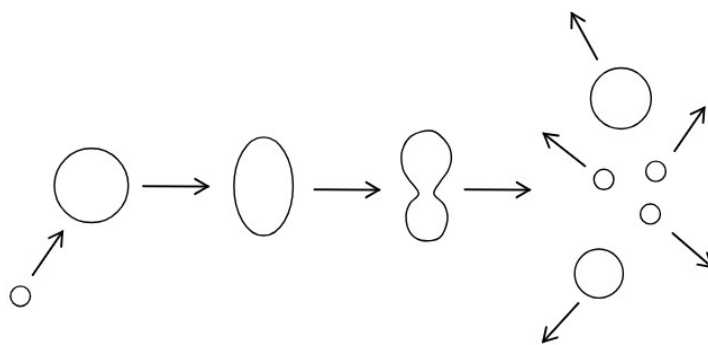
4.4. Štěpení jádra a využití jaderné energie

4.4.1. Historie štěpné reakce

Štěpení jader provázelo uvolnění velkého množství energie. O objev se zasloužili Hahn a Strassmann v roce 1939. Jako první jadernou reakci tohoto typu uskutečnili rozštěpením jádra uranu na dvě částice přibližně stejně těžké. Reakci lze popsat následujícím schématem:



Při štěpení jádra uranu se uvolní další neutrony a velké množství energie. Této reakce se využívá v jaderných elektrárnách při štěpení jader uranu neutrony. Vzniklé neutrony mohou vyvolat další štěpení, reakce začne probíhat rozvětveným řetězovým mechanismem, při kterém počet štěpení lavinově vzrůstá. Schéma reakce lze vidět na kapkovém modelu atomu (obr. 9). ⁴



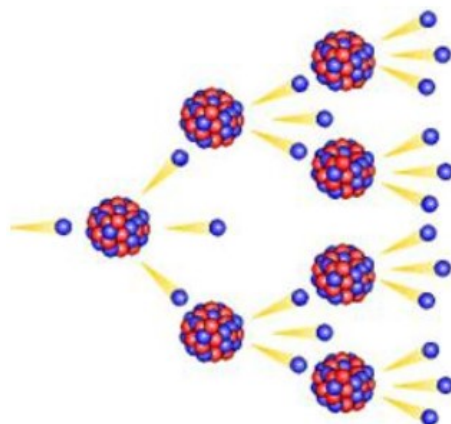
Obr. 9 Schéma mechanismu štěpení jádra¹⁵

4.4.2. Štěpná jaderná reakce

Průmyslové využití štěpení jádra je založeno na štěpné jaderné reakci. Tato reakce je vyvolaná jaderným projektilem. Mnoho jader můžeme štěpit různými projektily, mají-li dostatečnou energii. Z hlediska využití pro jadernou energetiku má význam pouze štěpení nuklidu ^{235}U a ^{239}Pu účinkem neutronů. Pravděpodobnost (účinný průřez) štěpné reakce závisí na energii neutronů. Štěpení neutrony je exoergická reakce, pro kterou je účinný průřez největší při malé energii neutronů. Prvním stádiem reakce je záchyt neutronu a vznik složeného jádra. Složené jádro je vždy vysoce excitované a často má více možností rozpadu. Složená jádra ^{236}U se z 85 % štěpí, z 15 % deexcitují emisí fotonu bez štěpení, tj. reakce probíhá $^{235}\text{U} (n,\gamma) ^{236}\text{U}$. Štěpení složeného jádra ^{236}U se může dít přibližně čtyřiceti pěti způsoby. Všechny nuklidy, které vzniknou, mají nadbytek neutronů a podléhají přeměně β^- . Nadbytek neutronů je poměrně značný, proto se každé primárně vzniklé jádro přeměňuje na stabilní izobar několika po sobě jdoucími přeměnami β^- . Primárně vzniklé nuklidy a jejich dceřiné nuklidy se souhrnně označují jako štěpné produkty.⁵

4.4.3. Řízená řetězová reakce a regulace výkonu reaktoru

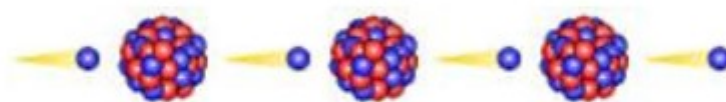
Při štěpení každého jádra ^{235}U a ^{239}Pu vzniká více neutronů, než se na štěpení reakce spotřebuje. Štěpná reakce se vlivem většího počtu vznikajících neutronů opakuje a dochází k lavinovému šíření. Reakce probíhající tímto způsobem se nazývá řetězová reakce. Průběh reakce je znázorněn na obrázku. 10.



Obr. 10 – Neřízená řetězová reakce¹⁶

Reakce znázorněná na obrázku. 10 je reakce, při které intenzita roste. Reakce probíhá v nadkritickém množství materiálu. Pokud se ponechají v soustavě všechny neutrony, jejich počet s časem velmi rychle roste a veškeré množství štěpitelného nuklidu se rozštěpí během zlomku vteřiny, kdy se uvolní i veškerá energie. Tato situace nastává v explozivních štěpných procesech. Této reakce bylo využito pro výrobu atomových bomb.

V jaderném reaktoru je nutné, aby řetězová reakce probíhala řízeně. Kontrolním mechanismem a uspořádáním reaktoru je ustanoven stav, že ze vznikajících neutronů lze k dalšímu štěpení využít právě jeden neutron. Proto se v každém časovém okamžiku v soustavě nachází vždy stejný počet neutronů a uvolňuje se stejné množství energie. Schéma reakce je na obrázku 11.



Obr. 11 - Průběh řízené řetězové reakce¹⁶

V reálném jaderném reaktoru je vždy k dispozici méně neutronů, než udává hodnota i (počet neutronů) neboli průměrný počet neutronů uvolněných při štěpení. Je to způsobeno třemi skutečnostmi, které společně rozhodují o tom, zda z i neutronů zbývá alespoň jeden pro další štěpení.⁵

1. Asi u 15 % jader ^{235}U nevede zachycení neutronu ke štěpení, nýbrž ke vzniku ^{236}U ; v případě ^{239}Pu vzniká z 30 % ^{240}Pu .
2. V reaktoru je kromě štěpitelného nuklidu i mnoho dalších komponent a materiálů, které také absorbují neutrony reakcemi (n,γ) . Toto se nazývá parazitní absorpce neutronů.
3. Určitý počet neutronů z reaktoru uniká.

Pro udržení řetězové reakce je důležitý multiplikační faktor k , který je definovaný jako průměrný počet neutronů existujících na konci každé generace, které připadají na jeden neutron generace předcházející. Nutnou podmínkou pro udržení řetězové reakce a průběhu, při kterém je počet štěpení za časovou jednotku stálý, je $k = 1$. Soustava splňující tuto podmínku se nazývá kritická a to je charakteristický stav pro normální provozní chod reaktoru. Pokud by nebyla splněna podmínka $k = 1$ a $k < 1$, tak by v každé následující generaci bylo méně neutronů, než v generaci předcházející. Soustava by se nazývala podkritická soustava. V soustavě, kde se počet štěpení za časovou jednotku postupně zmenšuje, se řetězová reakce nemůže udržet a nakonec se zastaví. V reaktoru se tento stav vyvolává pouze tehdy, pokud je potřeba zastavit chod reaktoru. Aby se docílilo zmíněného stavu, do reaktoru se zasunou tyče z materiálu, který absorbuje neutrony.

Pokud by $k > 1$, tak by se soustava nazývala nadkritická. Výkon reaktoru a počet štěpení za časovou jednotku by rostl velmi rychle. Tento stav je pro reaktor nebezpečný. Mohlo by to vést k poškození, popřípadě k trvalému zničení aktivní zóny reaktoru přehřátím. Podle následujícího vztahu lze odhadnout hodnotu k pro kritický stav:⁵

$$k = ip \frac{f_{235}}{f_{235} + z_{235} + \sum z_n}$$

Určitá kombinace paliva, dalších komponent reaktoru a energie neutronů umožňuje dosažení kritického stavu. Závisí na tom, do jaké míry všechny možné parazitní

absorpce neutronů a únik neutronů ze soustavy konkurují štěpné reakci. Z uvedené rovnice označuje i průměrný počet neutronů uvolněných při štěpení, p je pravděpodobnost, že nenastane únik neutronů, f_{235} značí počet štěpení jader ^{235}U , z_{235} označuje počet záchyťů (n, γ) na jádrech ^{235}U , $\sum z_n$ značí součet počtu záchyťů (n, γ) na ostatních nuklidech. Každá z veličin f_{235} , $\sum z_n$ a z_{235} se vyjadřuje jako součin zastoupeného konkrétního nuklidu a účinného průřezu příslušné jaderné reakce.

V jaderných reaktorech se jaderné palivo obklopí a proloží látkou, která neutrony zpomaluje. Tyto látky se nazývají moderátory, jejichž atomová jádra reakcemi (n, γ) absorbují neutrony a neutronovou bilanci zhoršují. Používá se těžká voda, grafit nebo obyčejná voda. U grafitu, kyslíku a deuteria je účinný průřez reakce malý, oproti tomu v obyčejné vodě je významnější. Grafit a těžká voda zhoršují neutronovou bilanci poměrně málo, obyčejná voda mnohem více. Z ekonomických důvodů se používá jako moderátor a chladiivo. Aby se řetězová reakce udržela v přírodním uranu, je nutné jako moderátor použít těžkou vodu, nebo grafit, obyčejnou vodu použít nelze. Moderování obyčejnou vodou vyžaduje použití jako paliva uranu, ve kterém je obsah štěpitelného izotopu ^{235}U zvýšen z přírodních 0,72 % na 3-4 % (tzv. slabě obohacený uran). Pokud by se zvýšil obsah ^{235}U až na 20 % a více, není potřeba neutrony zpomalovat.

Regulace jaderného reaktoru

Jaderný reaktor je za provozu dynamický systém, ve kterém se s časem neutronová bilance zhoršuje. Protože se průběžně zmenšuje obsah štěpného nuklidu v aktivní zóně a v palivu se současně hromadí štěpné produkty. Z nichž některé mají vysoké účinné průřezy pro absorpci neutronů reakcí (n, γ) a výrazně zhoršují neutronovou bilanci. Tímto dochází k tzv. otravě reaktoru. Jako reaktorové jedy se označují nuklidy ^{135}Xe , ^{133}Xe , ^{149}Sm a ^{131}I . Tento problém se řeší tak, že se do reaktoru vloží více štěpného materiálu (paliva), než odpovídá hodnotě $k = 1$. Přebytek multiplikačního koeficientu, rozdíl $(k-1)$ a reaktivita ρ , která se vyjádří následujícím vztahem:⁵

$$\rho = (k - 1)/k$$

Před spuštěním má reaktor jistou zásobu reaktivity, kterou může během provozu postupně uvolňovat a kompenzovat tak zhoršující se neutronovou bilanci. Je to kvůli kompenzačním tyčím, které obsahují takové nuklidy, které mají vysoký účinný průřez

pro absorpci neutronů. Zpočátku jsou tyče do aktivní zóny zasunuty více, aby se eliminovala přebytečná reaktivita. V průběhu jak se v palivu hromadí jedy, tak se neutronová bilance zhoršuje a tyče se postupně vysunují. Řídicími tyčemi se nepřetržitě upravují okamžité změny ve výkonu reaktoru, které jsou způsobeny jinými faktory. Na jakoukoli změnu výkonu se reaguje řídicími tyčemi. Podle okamžité potřeby se mohou do aktivní zóny zasouvat, nebo se z aktivní zóny vysouvat. Díky tomu se udržuje stav, kdy $k = 1$, stav s nulovou reaktivitou. Tyto tyče bývají i součástí palivových článků. Pro regulaci výkonu je ještě důležitá časová změna, nazývaná kinetika reaktoru. Kinetika reaktoru určuje, jak rychle se s časem bude měnit počet neutronů v aktivní zóně a také výkon reaktoru. Čím více se bude reaktivita zvyšovat, tím rychleji na tuto změnu musí reagovat regulační mechanismy.¹⁶

4.4.4. Výroba uranu a jaderného paliva

Hlavním zdrojem uranu je minerál smolinec. Smolinec je minerál, který obsahuje směs oxidů a to oxidu uraničitého a oxidu uranového (U_3O_8). Těžená ruda se obohacuje flotací na flotační koncentráty nebo je možné uran z rud získávat podzemním louhováním kyselinami. Flotační koncentrát se vyluhuje kyselinou sírovou nebo dusičnou a tím se získá dusičnan nebo síran uranylu (UO_2SO_4). Roztok se dále extrahuje organickými rozpouštědly, ve kterých se dusičnan uranylu rozpustí a oddělí se od doprovodných prvků. Uranový koncentrát se po přečištění rozloží zahřáním na oxid uranový. Oxid uranový se zredukuje vodíkem na oxid uraničitý a ten se reakcí s fluorovodíkem převede na fluorid uraničitý. Redukcí hořčíkem se získává kovový uran. Pak záleží na tom, zdali má být konečným produktem palivo kovové (používá se přírodní – neobohacený uranu) nebo lidické palivo (obsahující obohacený uran izotopem ^{235}U).¹⁷

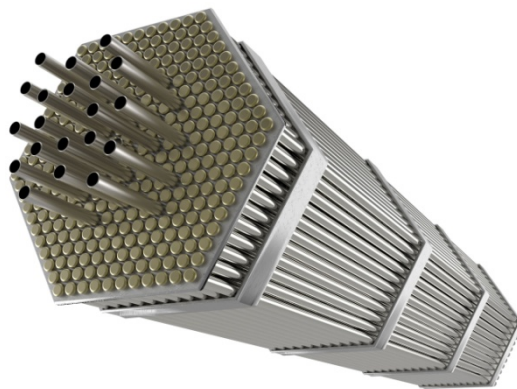
Jaderné palivo (tabletovaný oxid uraničitý) se vyrábí z obohaceného fluoridu uranového, který se převede na komplex uranu. Při teplotě 500 °C se sraženina pevného uranu rozloží na oxid uranový, který se reakcí s vodíkem zredukuje na oxid uraničitý. Žíháním při teplotě 1700 °C v inertní atmosféře se vylisují tvarovky. Pomocí strojního opracování se vyrobí tablety určených rozměrů, které slouží jako palivo v jaderných reaktorech.

Těžba může probíhat i jako vedlejší produkt těžby jiných rud. Nejvíce uranové rudy se těží v Kanadě, Austrálii a Kazachstánu. Mezi významné těžaře uranové rudy

patří také Namibie, Rusko, Niger a Uzbekistán. Například za rok 2012 se celkem vytěžilo 54 000 t uranu. Na trh se v poslední době uvolňují zásoby vysoce obohaceného uranu, které se nashromáždili při výrobě jaderných zbraní. Potvrzené hospodářsky využitelné zásoby uranu v současné době jsou okolo 10 milionů tun. Oproti ropě a plynu zásoby uranu nejsou ještě tak důkladně prozkoumány. Je možné, že se mohou hospodářsky těžitelné zásoby rozšířit i zlepšením metod na těžbu a úpravu uranu. Odhadované zásoby uranu, stačí na provozování jaderné energetiky ve stávajícím rozsahu v řádu dalších několika stovek let. Těžba uranové rudy probíhá i na území České republiky, poblíž Dolní Rožinky. V principu je možné zajistit uranu pro českou jadernou energetiku z vlastních zásob. Obohacování uranu bude nutné nadále provádět v zahraničí z toho důvodu, že Česká republika postrádá prostředky a technologie pro tento proces obohacování uranu.¹⁸

4.4.5. Uran jako palivo

V jaderných reaktorech se nejčastěji využívá uran. Přírodní uran obsahuje 0,7 % izotopu ^{235}U , který je štěpným materiálem a palivem. Zbytek je tvořen izotopem uranu ^{238}U . Pro využití se musí provádět obohacování uranu. Taková výroba vyžaduje velice náročnou technologii, kterou se zabývá pouze několik průmyslově vyspělých států. Oxid uraničitý nebo kovový uran, který bývá obvykle legovaný příměsí jiného kovu pro zlepšení mechanických vlastností, se používá k výrobě paliva z přírodního uranu. Keramické palivo je nejčastější forma oxidického paliva. Jsou to peletky o průměru 1 cm a výška tablety je 1-2 cm. Peletky jsou naskládány na sebe, jsou v hermeticky uzavřeném kovovém obalu ze slitiny zirkonia nebo nerezové oceli. Palivo v kompaktním stavu udržuje kovový obal paliva tzv. pokrytí. Brání jeho rozrušení vlivem proudění chladiva a záření, navíc zadržuje vysoce radioaktivní štěpné produkty v uzavřeném prostoru. Palivový element je palivo v kovovém pokrytí. Výšku aktivní zóny tvoří sloupce z peletek oxidického paliva nebo uranového prutu v palivovém elementu, jejich výška je 2-3 m. Větším počtem palivových elementů uchycených na obou koncích v nosných konstrukcích nazýváme palivový článek, také jinak palivovou kazetu (obr. 12).⁵

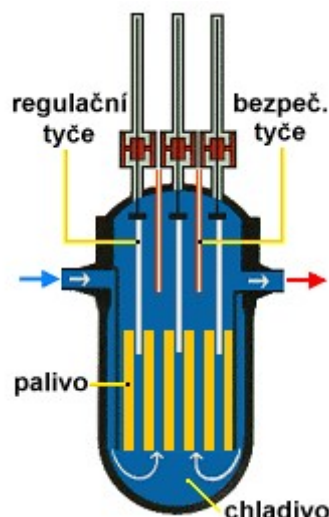


Obr. 12 - Palivová kazeta¹⁹

Palivové články se do reaktoru vkládají a vyjímají příslušným zaváděcím strojem. Palivových článků je v reaktoru umístěno několik set. Články mohou mít různé provedení. Důležité je, aby palivové články byly zkonstruovány tak, aby byla zajištěna spolehlivost jejich hermetičnosti v podmínkách vysoké intenzity gama a neutronového záření, vysoké teploty, korozního působení chladiva a dynamického namáhání. Palivové články v reaktoru nemohou zůstat do úplného spotřebování štěpného nuklidu. Určená doba, po kterou může setrvat palivový článek uvnitř reaktoru, závisí na výkonu reaktoru a konstrukci aktivní zóny. Vyhořelé palivo se v určitém časovém plánu částečně vyjímá a nahrazuje čerstvým palivem. Aby mohlo dojít k výměně paliva je za potřeby u některých reaktorů snížit výkon reaktoru nebo reaktor zcela odstavit. Například v jaderné elektrárně Dukovany se vyměňuje jednou za rok jedna třetina palivových článků.⁵

4.4.5. Jaderný reaktor

Jaderný reaktor je zařízení, ve kterém se spaluje jaderné palivo. Reaktor umožňuje řídit a udržovat nepřetržitou řetězovou reakci a neustále odvádět pryč vyvíjené teplo. Zóna v reaktoru, ve které probíhá štěpení a vzniká teplo, se nazývá aktivní zóna. V aktivní zóně je umístěné palivo, řídicí tyče, moderátor a proudící chladicí médium. Schéma jaderného reaktoru je na obrázku 13.



Obr. 13 - Jaderný reaktor²⁰

4.4.6. Části jaderného reaktoru

Moderátor

V reaktorech, ve kterých probíhá štěpení účinkem pomalých neutronů, se okamžité rychlé neutrony zpomalují grafitem, těžkou nebo lehkou vodou. A právě moderátor má způsobovat co největší ztráty energie neutronů při srážkách s jádru atomů a také co nejméně absorbovat neutrony. Voda v lehkovodních reaktorech slouží i jako chladicí médium.

Chladicí médium

Teplo uvolňující se z palivových článků, musí být z aktivní zóny reaktoru odváděno cirkulujícím chladivem. Chladicí médium musí splňovat následující podmínky: vysoké měrné teplo, dobrou tepelnou vodivost, radiačně a tepelně stálé, nesmí příliš absorbovat neutrony a způsobovat korozi povrchu palivových elementů. Obyčejnou vodou je chlazen nejvíce pomalých energetických reaktorů. Některé druhy reaktorů jsou chlazeny například heliem nebo těžkou vodou. Roztaveným sodíkem se chladí rychlé reaktory.

Řídící tyče

Řídící tyče nepřetržitě upravují okamžité změny výkonu reaktoru. Reagují na jakoukoliv změnu výkonu a podle potřeby se do reaktoru buď zasouvají, nebo vysouvají. Díky tomu je udržen stav kdy $k = 1$. Tyče mohou být součástí některých palivových článků.

Kompenzační tyče

Slouží k absorpci neutronů. Z počátku jsou tyče do aktivní zóny zasunuty více, aby došlo k eliminaci přebytečné reaktivity. Tak jak se v průběhu provozu v palivu hromadí jedy a zhoršuje se neutronová bilance, tak se tyče postupně vysunují.

Havarijní tyče

Havarijní tyče, které nejsou za normálního provozu v aktivní zóně zasunuty, slouží k tomu, aby v případě nutnosti rychle zastavili štěpnou reakci, kdyby výkon reaktoru přesáhl z nějakého důvodu povolenou hodnotu nebo v případě závažnější poruchy. V řídicích tyčích bývá účinnou složkou, která absorbuje neutrony, většinou bor ve formě oceli legované borem, řidčeji kadmium nebo hafnium ve formě slitin.

Reflektor

Reflektorem je obklopena aktivní zóna. Účelem reflektoru je snížit únik neutronů z reaktoru odrazem na atomových jádrech. Voda nebo grafit se používají v pomalých reaktorech. V rychlých reaktorech se používá sodík a železo. Ochuzený uran v některých reaktorech může také sloužit jako reflektor.

Tlaková nádoba

Palivo, moderátor, chladivo a řídicí tyče se nachází v některých reaktorech v tlakové nádobě. Je to válcová nádoba vyrobená z oceli u reaktorů chlazených a moderovaných vodou. Podle výkonu a typu reaktoru má hmotnost několik set tun, výšku až 23 m a průměr 7 m. Na provozní bezpečnost, konstrukci, montáž, výrobu a dopravu jsou kladené mimořádné požadavky. Jednotlivé požadavky jsou kladeny kvůli vysoké teplotě, tlaku a záření, které tlaková nádoba musí vydržet. Z předpjatého betonu jsou vyrobeny tlakové nádoby, které jsou chlazené plynem. V reaktoru, který nemá tlakovou nádobu, jsou palivové články umístěny v ocelových tlakových kanálech. Takové kanály jsou uloženy v moderátoru a každý z nich je chlazen samostatně průtokem chladiva.⁵

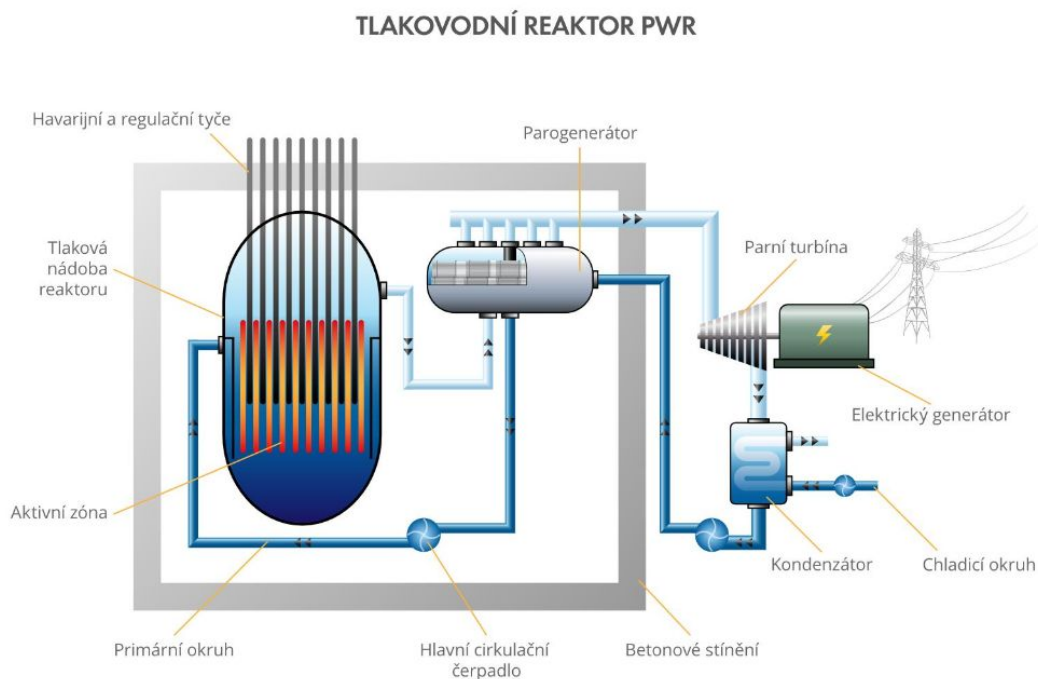
4.4.7. Typy reaktorů

Reaktory rozeznáváme podle účelu, ke kterému slouží. Reaktory školní, výzkumné, slouží k výzkumům v jaderné fyzice a technice a k aktivační analýze. Reaktory produkční slouží k výrobě radioaktivních izotopů plutonia a vyšších transuranů. Demonstrační reaktory jsou reaktory menších výkonů budovány pro ověření

určité koncepce energetických reaktorů. Energetické reaktory jsou nejvýznamnějším zdrojem tepla pro jaderné elektrárny případně pro jiné účely.

Tlakovodní reaktory (PWR)

Tlakovodní reaktory PWR (Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor) jsou nejrozšířenější. Tlakovodní reaktor PWR je znázorněn na obrázku. 14. Současně jsou moderovány a chlazeny obyčejnou vodou. Mírně obohacený uran (2–4%) je palivem ve formě UO_2 , případně směsi oxidu uraničitého a PuO_2 . V ocelové tlakové nádobě je umístěna aktivní zóna, která obsahuje několik set palivových článků. Do aktivní zóny se tyče zasunují shora. Voda, která prochází reaktorem, je pod vysokým tlakem, aby při teplotách okolo 300 °C byla kapalná. Pára vznikající v sekundárním okruhu elektrárny slouží pro pohon turbíny. VVER–440 je tlakovodní reaktor, který byl vyprojektován v bývalém Sovětském svazu, jehož elektrický výkon je 440 MW. Čtyřmi



Obr. 14- Tlakovodní reaktor PWR²¹

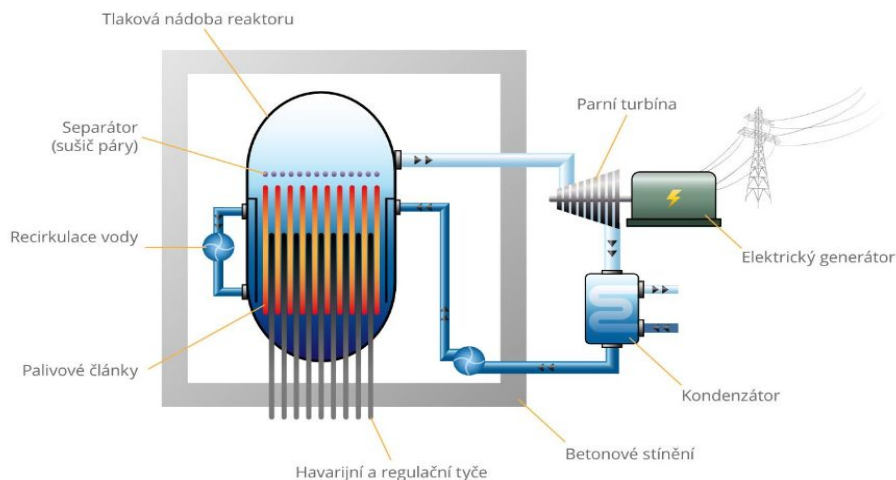
reaktory takového typu je osazena také česká jaderná elektrárna Dukovany. Reaktor obsahuje 42 tun uranu obohaceného na (2,5 – 3,5 %) ve formě tablet UO_2 o průměru 7,5 mm. Palivový element je dlouhý 2,42 m, jeho průměr je 9 mm a pokrytí o tloušťce 0,65 mm je ze slitiny zirkonu a niobu. Palivový článek tvoří kazeta obsahující 126 elementů. V reaktoru je celkem 349 palivových článků. Z nich je 37 kombinováno s řídicími tyčemi z bórové oceli a mohou se pohybovat ve svislém směru. Voda, která cirkuluje, je

pod tlakem 12,5 MPa. Na výstupu z reaktoru má teplotu 300 °C a na vstupu do reaktoru má teplotu 269 °C. Za hodinu reaktorem proteče 39 tun vody. Šest nezávislých chladících smyček zajišťuje průtok a každá z nich má své vlastní oběhové čerpadlo. Ke kompenzaci reaktivity slouží kyselina boritá, kterou voda obsahuje. V průběhu provozu reaktoru se její koncentrace postupně snižuje. Tlaková nádoba je z nerezové oceli, má hmotnost 210 tun, průměr 3,7 m, výšku 13,7 m a sílu stěny 140 mm. Tlaková nádoba je svařena z několika prstencových částí vykovanych z jednoho kusu. Hrdla, která jsou umístěné v horní části, které slouží pro vstup a výstup vody. K tělesu nádoby je šedesát šrouby přitažené víko nádoby. Těsnost spojení je zajištěna speciálním těsněním. Doba životnosti tlakové nádoby je 40 let. Válcová šachta, která je uvnitř nádoby zavěšena, nese konstrukci aktivní zóny. Slouží jako tepelné stínění tlakové nádoby. Na desce s otvory, která je umístěna v dolní části nádoby, je uchyceno 312 palivových článků. Proudící voda mířící směrem dolů prstencovou mezerou mezi tělesem nádoby a šachtou tlakové nádoby se u dna obvykle obrací a děrami v desce proudí směrem vzhůru kolem palivových článků. V jaderné elektrárně Temelín je tlakovodní reaktor VVER-100 reaktor třetí generace. Tlaková nádoba reaktoru váží 322 tun, je vysoká 10,9 m, vnitřní průměr má 4,5 m a 193 mm sílu stěny. Tlaková nádoba reaktoru byla vyrobená v podniku Škoda jaderné strojírenství. Palivových článků v aktivní zóně je 163, každý s 312 elementy a 61 řídicími tyčemi. Nyní používá Temelín palivo od ruské firmy TVEL. V chladícím okruhu je 337 m³ vody. Voda cirkuluje při tlaku 15,7 MPa. Za hodinu reaktorem proteče 84 800 m³ vody. Teplota vody na výstupu je 320 °C a na vstupu 290 °C.

Varné reaktory (BWR)

Varné reaktory BWR (Boiling Water Reactor) mají aktivní zónu a palivové články podobné reaktorům tlakovodním. Chlazené a moderované jsou obyčejnou vodou za normálního tlaku. Do spodní části tlakové nádoby vstupuje voda, postupující voda míří vzhůru do kanálků, v kterých jsou uloženy palivové články. Voda se v kanálech ohřívá a částečně se mění v páru. V tlakové nádobě nad aktivní zónou jsou separátory vlhkosti. Tam se pára z kanálků zbavuje vody. Z tohoto důvodu je tlaková nádoba u varných reaktorů mnohem vyšší než u tlakovodních reaktorů. Výška tlakové nádoby může být až 20 m. Varný reaktor BWR je znázorněn na obr. 15.

VARNÝ REAKTOR BWR

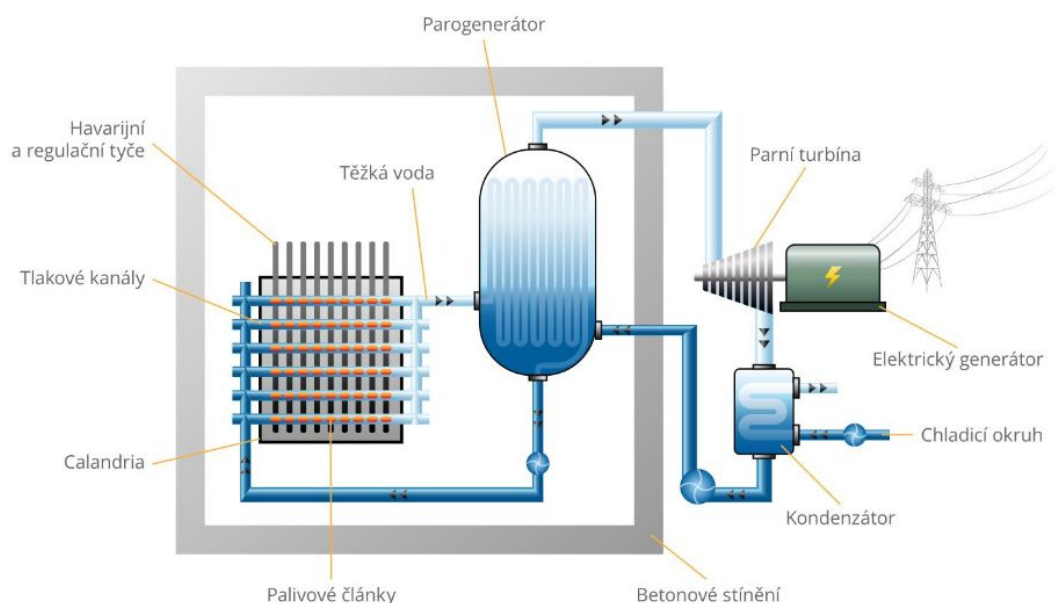


Obr. 15 - Varný reaktor BWR²¹

Těžkovodní reaktor (CANDU)

Těžkovodní reaktor je kanadský reaktor typu CANDU. Označení CANDU pochází z následujících slov Canada – Deuterium – Uranium. Jedná se o reaktor s tlakovými kanály a je moderován a chlazen těžkou vodou. Reaktor je tvořen z ocelové válcové nádoby, která má průměr 8 m a délku 8 m. Nádoba je naplněna moderátorem a těžkou vodou. V nádobě je zabudováno 390 tlakových kanálků, které jsou rovnoběžné s osou válce. V kanálcích jsou uloženy palivové články z UO_2 s přírodním izotopovým složením. V kanálech jsou články chlazeny tlakovou těžkou vodou. Každý kanál má svůj samostatný odvod a přívod těžké vody. Pro zasouvání řídicích tyčí jsou kanály instalovány kolmo na osu válcové nádoby. Těžkovodní reaktor CANDU je zobrazen na obr. 16.

TĚŽKOVODNÍ REAKTOR CANDU

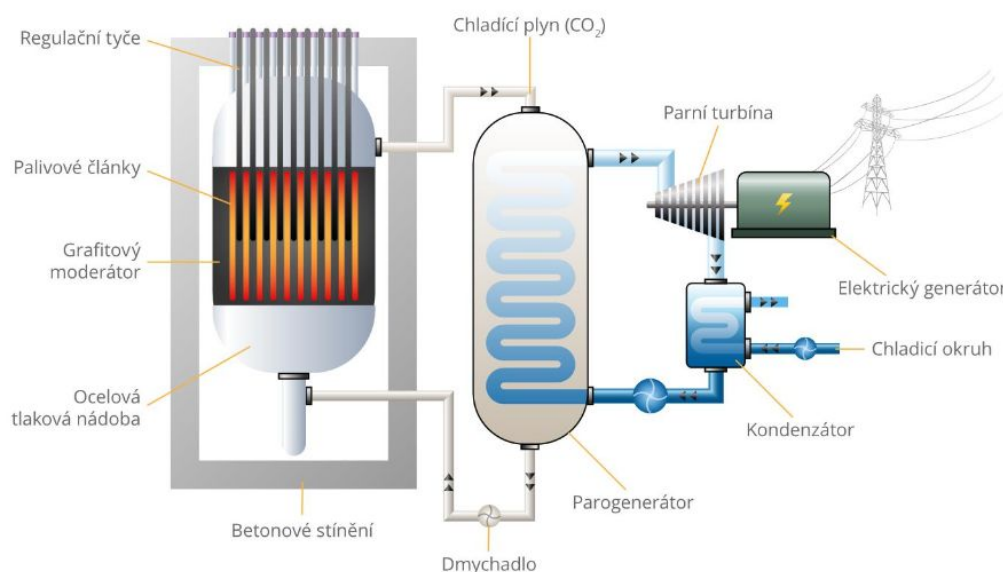


Obr. 16 - Těžkovodní reaktor CANDU²¹

Plynem chlazené grafitové reaktory (GCR MAGNOX)

Plynem chlazený reaktor GCR Magnox (Gas Cooled Graphite Moderated Reactor) byl provozován především ve Velké Británii. Používá se mírně obohacený uran ve formě tablet UO_2 . Palivové články jsou z předpjatého betonu a jsou vertikálně umístěny v kanálech v grafitové mříži. Helium, kterým je reaktor chlazen, proudí palivovými kanálky pod tlakem 3-5 MPa. Teplota palivových článků dosahuje až 750°C . Na výstupu z reaktoru je teplota helia $650 - 675^\circ\text{C}$. Jako palivo se v reaktorech používají oxidické mikrokuličky. Na výstupu z reaktoru je teplota tlakového helia až 850°C . Plynem chlazený reaktor MAGNOX GCR je znázorněn na obr. 17.

PLYNEM CHLAZENÝ REAKTOR MAGNOX GCR

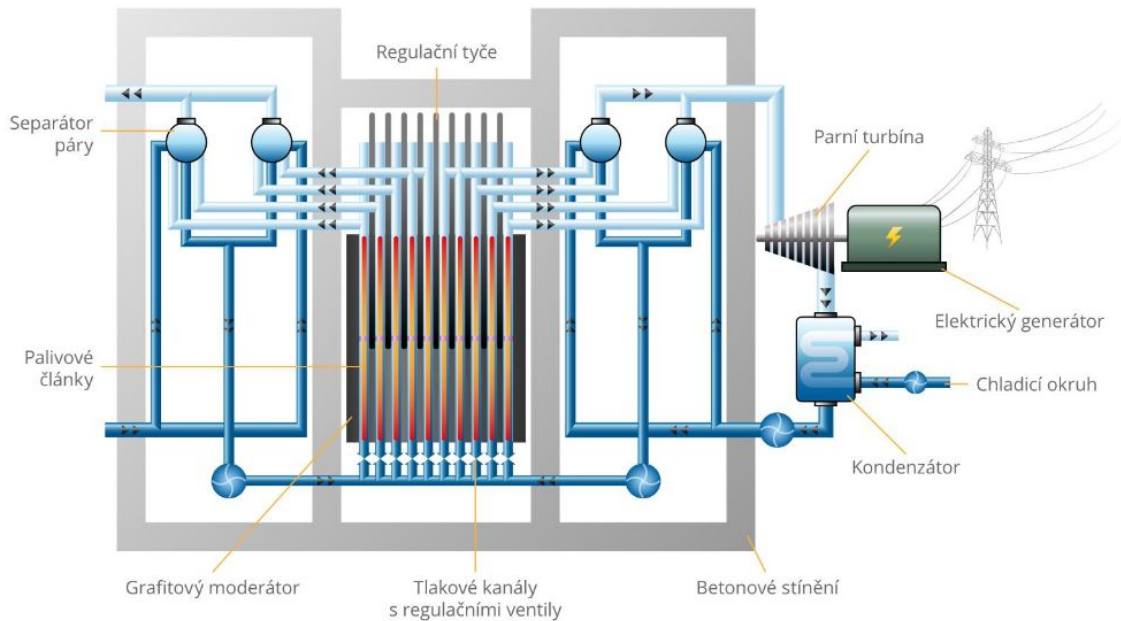


Obr. 17 - Plynem chlazený reaktor MAGNOX GCR²¹

Grafitový reaktor chlazený vodou (RMBK)

Reaktor typu RBMK (Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj) známá i pod zkratkou LWGR se stavěl pouze na území bývalého SSSR. Tento reaktor byl použit nechvalně známé Černobylské elektrárně. Reaktory tohoto typu se dnes už nepoužívají. Reaktor je tvořen grafitovými bloky, které jsou sestaveny do tvaru válce o hmotnosti několik set tun, výšce 8 m a průměru 14 m. Vše je uzavřeno v ocelovém plášti. Vertikální otvory pro ocelové tlakové varné kanály jsou umístěny v grafitových blocích. Jeden palivový článek je umístěn v každém kanálu. Aktivní zóna obsahuje 998 – 1693 palivových kanálků, 180 kanálů pro řídicí tyče, které procházejí ocelovým pláštěm, průměr aktivní zóny je 7,2 – 9,4 m a dosahuje výšky 6-7 m. Obohaceného uranu na 1,8 – 3 % je v palivových člancích 47 až 180 tun. Horká voda vstupuje do kanálů zespodu, při průchodu kolem palivového článku se částečně mění na páru. Regulaci reaktoru komplikuje kladný teplotní součinitel reaktivity. Kvůli tomu reaktor obsahuje více řídicích tyčí. Do aktivní zóny se tyče zasouvají zespodu. Reaktor typu RBMK je na obr. 18.

REAKTOR TYPU RBMK

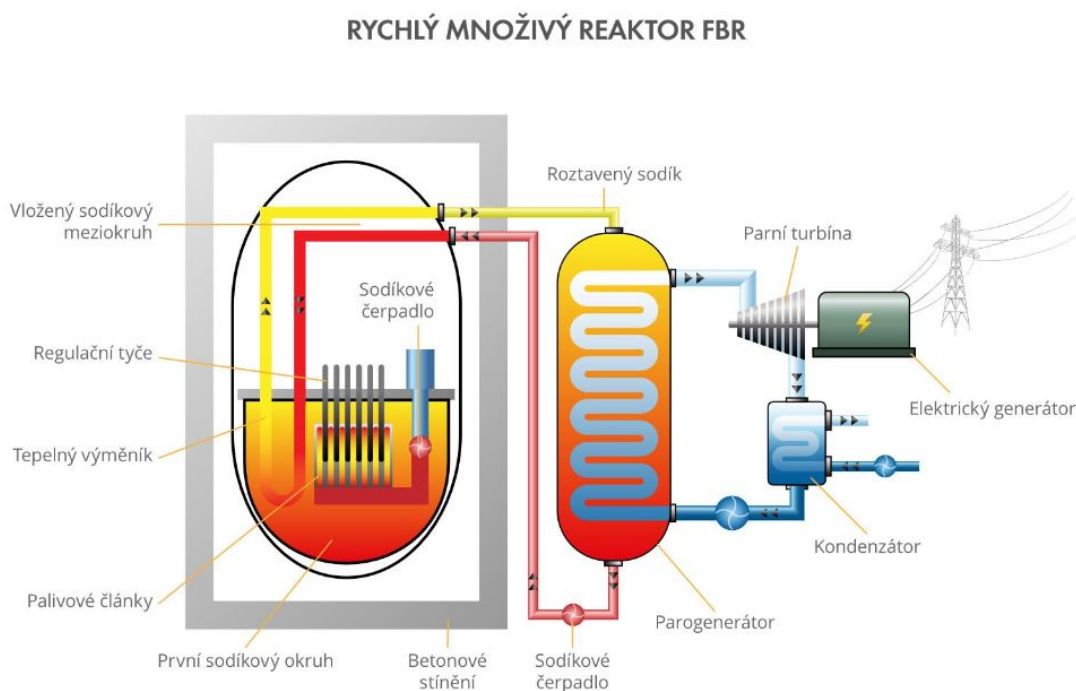


Obr. 18- Reaktor typu RBMK²¹

Rychlé reaktory (FBR)

FBR (Fast Breeder Reactor) je v Rusku (BN -600 v Bělojarsku), ve Francii a Velké Británii. Rychlé reaktory se používají k udržení řetězové štěpné reakce nezpomalených neutronů. Účinný průřez za takové situace ^{235}U a ^{239}Pu je pro štěpnou reakci menší než při štěpení pomalými neutrony, proto palivo musí obsahovat více štěpného nuklidu. Uran se používá obohacený na 20 – 50 % ^{235}U nebo palivo obsahem odpovídající ^{239}Pu . Moderátor aktivní zóna neobsahuje. Kvůli vysokému obohacení, dochází k mnohem intenzivnějšímu uvolňování tepla v aktivní zóně oproti pomalým reaktorům. Rychlé reaktory se chladí cirkulujícím sodíkem, jelikož voda ani helium nejsou schopné odvádět tak velké množství uvolňujícího tepla. Voda není vhodná i z důvodu, že zpomaluje neutrony a její teplota varu je nízká. Role zpozděných neutronů v regulaci reaktoru je mnohem významnější než u reaktorů pomalých. Rychlé neutrony mají velmi krátkou dobu života, jejich nadkritický stav s okamžitými neutrony by nebyl zvládnutelný ani nejmodernějšími regulačními prostředky. Francouzské reaktory Phénix

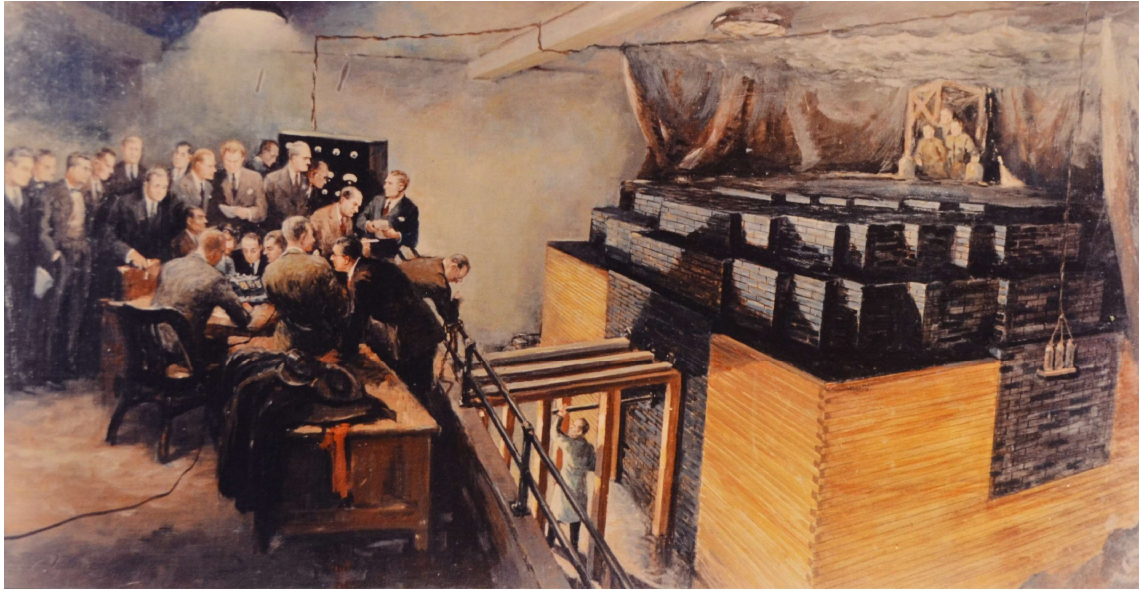
a Superphénix jsou nejpokročilejší rychlé reaktory. Rychlý množivý reaktor FBR je znázorněn na obr. 19.²¹



Obr. 19 - Rychlý množivý reaktor FBR²¹

4.4.8. První jaderný reaktor

První jaderný reaktor byl na principu plynem chlazeného grafitového reaktoru. Byl postaven pod vedením italského fyzika Enrico Fermiho v roce 1942 v racketsoftovém kurtu pod stavbou tribun fotbalového stadionu Chicagské univerzity v rámci projektu Manhattan. Název tohoto reaktoru byl Chicago Pile – 1. Stavby se účastnil neproškolený personál. Za účelem zvýšení kondice velkou část manuální a transportní činnosti provedli hráči místního univerzitního týmu. Celý průběh experimentu je zaznamenaný pouze na kresbách, protože nesměl být přítomen fotograf. Několik grafitových cihel tvořilo aktivní zónu reaktoru. Lisované koule oxidu uranu měly vytvořit krychlovou mřížku, vždy ob jednu vrstvu s grafitem uprostřed reaktoru. Konečná výška mřížky dosahovala necelých šesti metrů. Kadmiové tyče sloužily k řízení štěpné řetězové reakce. Reaktor nebyl opatřen chlazením ani ochranným pláštěm proti radiaci. První jaderný reaktor znázorněný na obr. 20 ilustroval Gary Sheahan v roce 1957.²²



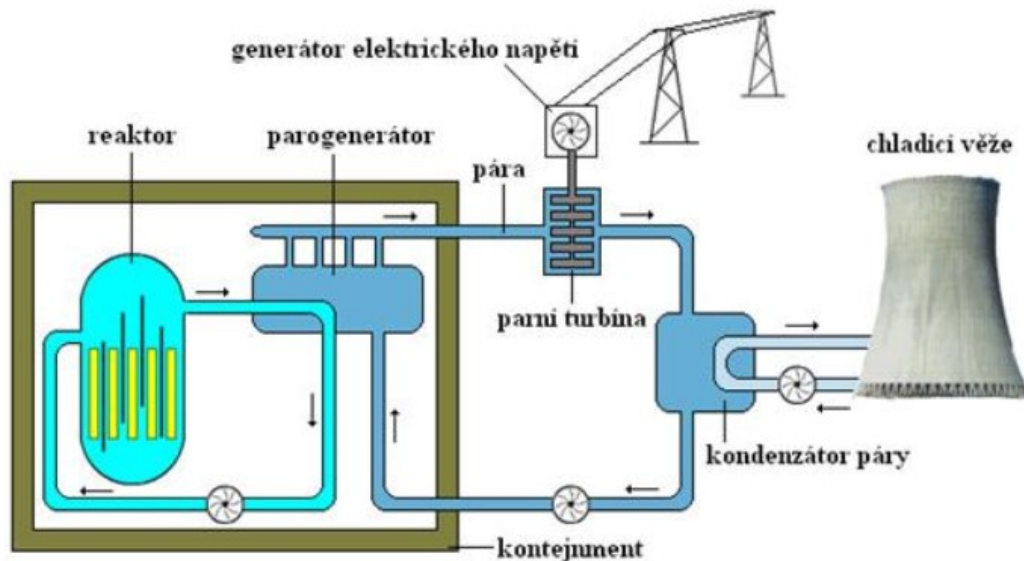
Obr. 20 - Ilustrace prvního jaderného reaktoru²³

4.4.9. Jaderná elektrárna

V jaderné elektrárně vzniká teplo štěpnou reakcí uranu v jaderném reaktoru. Vznikající teplo se odvádí z reaktoru a využívá se k výrobě páry, která pohání turbínu. Jaderné elektrárny s tlakovodními a plynem chlazenými reaktory jsou tzv. dvouokruhové, mají dva oběhové okruhy primární a sekundární. Primární okruh je tvořen z reaktoru a parogenerátoru (výměníku). Parogenerátor využívá z jaderného reaktoru teplo, které je dopraveno vodou, k vytvoření páry v sekundárním okruhu. Primární okruh je stavebně izolován od ostatních částí jaderné elektrárny v budově kontejnmentu. Kontejnment je stavěn tak, aby odolal zemětřesení nebo dokonce i pádu meteoritu. Primárním okruhem neustále cirkuluje chladivo, které se v aktivní zóně ohřívá a ve výměníku vodu uvádí do varu v sekundárním okruhu. Pára po průchodu turbínou kondenzuje v kondenzátoru, voda se vrací do sekundární části tepelného výměníku. Vodou z řeky, moře nebo umělé vodní nádrže se chladí kondenzátor páry. Sekundární okruh slouží k transportu páry a k přeměně její vnitřní energie na točivý pohyb turbíny. Tvoří ho sekundární část parogenerátoru, turbína, generátor, kondenzátor a čerpadla. Terciárním okruhem (tj. chladicí okruh) proudí voda, která páře odebírá teplo v kondenzátoru. Voda ohřátá v kondenzátoru se ochlazuje proudícím vzduchem v chladicích věžích. Do ovzduší z věže stoupá pouze čistá vodní pára. Schéma jaderné elektrárny je na obr. 21.

V jednookruhové elektrárně slouží chladicí médium reaktoru současně i jako pracovní médium pro pohon turbíny. Je to typické pro elektrárny s varnými reaktory. Pára vzniká

při varu chladiva přímo v aktivní zóně, odkud se vede do turbíny. Jednookruhová elektrárna nemá výměník tepla.²⁴



Obr. 21 - Schéma jaderné elektrárny²⁴

4.4.10. Výhody a nevýhody využití jádra

Jaderná energetika má své výhody i nevýhody. Jednou z výhod je minimální produkce emisí a naprostá kontrola produkovaného odpadu. Další výhodou jsou nízké cenové náklady produkce elektrické energie, nízké palivové náklady, oproti uhelným elektrárnám nízká spotřeba paliva a nízká variabilita cen produkované energie. Velmi malý objem paliva a možnost dlouhodobého skladování paliva na velmi dlouhou dobu provozu je další výhodou. Dále pak dlouhá životnost, vysoký jednotkový výkon a spolehlivý a předvídatelný provoz.

Oproti tomu nevýhody využití jaderných zdrojů jsou vysoké prvotní investiční náklady a finanční náročnost na výstavbu. Dlouhá doba výstavby a náročné technologie při provozu i výstavbě je další nevýhoda využití jaderných zdrojů. Další nutností a zároveň nevýhodou je nutnost přizpůsobit infrastrukturu tak, aby odpovídala velikosti jaderných zdrojů a to síť, záložní zdroje a způsob ukončení palivového cyklu. Jednou z dalších nevýhod jsou vysoké nároky na jadernou bezpečnost a specifické umístění stavby s mimořádně vysokou kontrolou kvality.¹⁸

4.4.11. Jaderné havárie

Jedna z největších havárií se odehrála 26. 4. 1986 v Černobylské jaderné elektrárně na Ukrajině. Elektrárna byla vybavena vodou chlazenými reaktory typu RBMK o tepelném výkonu 3 200 MW. V honbě za lepším výkonem elektrárny, inženýři vypojili několik bezpečnostních systémů. Štěpná reakce v jaderném palivu se nekontrolovatelně rozběhla a způsobila obrovské mohutné výbuchy. Několik desítek pracovníků obsluhy a hasičů bylo ozářeno. Dodnes je místo výbuchu zabezpečeno betonovým sarkofágem, který byl postaven, aby se zabránilo úniku radioaktivity. Životnost sarkofágu je předpověděna na následujících 100 let. Na obr.22 je vidět, jak Černobyl vypadá dnes.²⁵



Obr. 22 - Černobylské místo výbuchu v sarkofágu²⁶

Další jaderná havárie se stala po zemětřesení v japonské elektrárně Fukušima 1 11. března v roce 2011. V době havárie bylo v elektrárně instalováno 6 varných reaktorů (blok 1 – BWR-3, bloky 1-5 – BWR-4, blok 6 – BWR-5). V provozu byly reaktory 1-3, reaktory 4-6 se nacházely v plánované odstávce. Při prvních náznacích zemětřesení došlo k zastavení štěpných reakcí v reaktorech 1-3, avšak následkem silného zemětřesení došlo k přerušení dodávky elektrického proudu do elektrárny. Záložní dieselové generátory, čerpadla na vodu, elektrické vedení uvnitř elektrárny a zdroje stejnosměrného napájení byly následně zničeny vlnou tsunami. Reaktory tak zůstaly bez možnosti odvodu zbytkového tepla. Pára vznikající v reaktorech reagovala za vysokých teplot se zirkoniovým obalem palivových prutů za vzniku oxidu zirkoničitého a vodíku. Ten unikl z tlakových nádob reaktorů a hromadil se v budovách bloků. Po překročení výbušné koncentrace došlo k výbuchu v bloku 1. Výbuch narušil i těsnost bloku 2, díky čemuž v něm nedocházelo k hromadění vodíku.

Blok 3 vybuchl o něco později. Také v bloku 4 došlo k výbuchu vodíku, jenž se do něj dostal z bloku 3 díky společnému větracímu systému. Následkem tavení paliva v reaktorech a výbuchů vodíků se poškodili aktivní zóny reaktorů v blocích 1, 2 a 3 (blok 4 byl díky odstávce bez paliva) a došlo k úniku radioaktivních látek do ovzduší. Než se 22. března podařilo obnovit přívod elektrické energie, reaktory musely být chlazeny vstříkáváním vody do tlakových nádob reaktorů za pomoci hasičských cisteren. V prosinci 2011 se podařilo ochladit všechny reaktory pod 100 °C a podařilo se úplně zastavit únik radioaktivních látek do ovzduší. V jedné z jímek zachycující vysoce radioaktivní vodu z bloku 2 došlo k úniku do Tichého oceánu, jež se však podařilo zastavit. Zároveň bylo do oceánu řízeně vypuštěno 11 500 tun mírně radioaktivní vody, aby se uvolnily prostory pro skladování vysoce radioaktivní vody. Do dnešní doby dochází k únikům radioaktivních látek do spodních vod.²⁷

4. 5. Termonukleární reakce a využití termonukleární energie

Naší Zemi zahřívá Slunce po miliardy let od jejího vzniku až po současnost. Kdyby naše planeta neměla stálý přítok tepla z této hvězdy, tak by se planeta Země proměnila v ledovou kouli bez života. Energii, kterou Slunce získává, je ze slučování jader vodíku na helium a jiné těžší prvky. Tento proces se nazývá termojaderná fúze. Je to jaderné reakce, při které dochází k syntéze lehkých jader v jádra těžší. V současné době se vědci zabývají myšlenkou, jak uskutečnit řízené termojaderné slučování v našich podmínkách. Ve své podstatě je termojaderná fúze prázákadem většiny obnovitelných zdrojů energie na zeměkouli. Při jaderné fúzi je účinnost využití paliva 10 000 000x větší než u všech chemických reakcí včetně hoření. Při elektrickém výkon 1 GW bychom potřebovali spálit ročně 2,5 miliónu t uhlí, solární panely o ploše 20km² či 2000 stometrových sloupů větrných elektráren. Oproti tomu vodíku bychom spotřebovali pouze 500 kg pro fúzní elektrárnu.²⁸

4.5.1 Fúzní palivo

Jako palivo pro fúzní reaktor v dlouhodobém výhledu by mohlo sloužit deuterium, což je izotop vodíku ${}^2_1\text{H}$. Deuterium oproti izotopu vodíku ${}^1_1\text{H}$ má navíc ještě jeden neutron v jádře. Deuterium se může nacházet v libovolné sloučenině, která obsahuje vodík. Taková sloučenina může být i obyčejná voda. Z jednoho litru vody bychom mohli vyprodukovat energii ekvivalentní 300 litrům benzínu. Energetickou potřebu České republiky by mohlo deuterium z Máchova jezera krýt po dobu zhruba

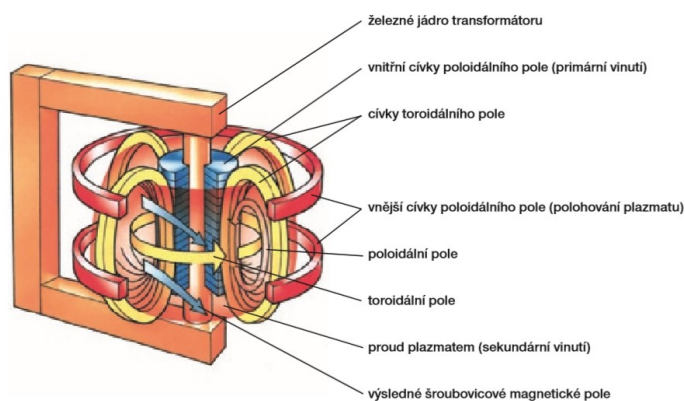
100 let. Pro fúzní elektrárnu by lidstvu vystačily celosvětové zásoby paliva ne desítky miliónů let. Fúze by se tak mohla stát budoucím globálním zdrojem energie. S využitím izotopu vodíku tritia jako druhé části paliva se počítá pro první generace fúzních elektráren. Tritium by se vyrábělo z lithia přímo ve fúzním reaktoru, kde by se slučovalo na stabilní vzácný plyn helium. V podstatě by termojaderný reaktor během provozní doby nevyžadoval žádný transport radioaktivního paliva dovnitř ani vně. Fúzní reaktor bude vnitřně principiálně bezpečný proti štěpnému reaktoru.²⁸

4.5.2. Princip tokamaku

Jedním z nejslibnějších typů zařízení pro uskutečnění řízené termojaderné fúze a v budoucnu i stavby fúzní elektrárny je Tokamak (zkratka ruských slov TOroidalnaja KAmera i MAgnitnyje Katuški – toroidální komora magnetické cívky). Tokamak se zrodil v bývalém Sovětském svazu díky týmu slavného fyzika Andreje Sacharova. Tokamak si lze představit jako prstencovou dutou komoru naplněnou horkým vodíkovým plynem, obklopenou magnetickými cívkami a transformátorovým jádrem. Rozlišují se dva význačné směry -toroidální a poloidální a význačné poloměry – hlavní a vedlejší. Pokud se vydáme podél prstence, můžeme sledovat toroidální směr. Kdybychom kroužili kolem komory, v rovině kolmé na toroidální směr, byl by to směr poloidální. Tokamak je termojaderné zařízení, ve kterém se magneticky udržují částice paliva. Magnetickými cívkami je vytvářena toroidální složka magnetického pole o síle 1-10 Tesla. Oproti tomu poloidální složka je 100x menší a je indukovaná elektrickým proudem, který prochází vodíkovým plazmatem uvnitř komory. Společně tak tyto složky vytvářejí střížné pole. Částice, které jsou elektricky nabitě, vytvoří za vysokých teplot více než 99 % plazmatu. Poloha horkého plazmatu uprostřed komory je kontrolována pomocí stabilizačních poloidálních cívek natažených podél prstence. Schéma Tokamaku je na obr. 23. Aby se jádra vodíku začala slučovat na helium je za potřebí vysoké termojaderné teploty 10^6 °C, které se musí dosáhnout bezkontaktním ohřevem z toho důvodu, že veškeré látky jsou při teplotách okolo deseti tisíc stupňů plynné. Je to doprovázeno uvolněním velkého množství energie. Princip transformátoru využívají Tokamaky, komora s plynem tvoří jediný závit jeho sekundárního vinutí. Teploty miliónů stupňů se dosáhne během jedné milisekundy, zprvu se jen slabě ionizovaný vodíkový plyn změní v plně ionizované plazma tvořené směsí elektronů a atomových jader. Elektrický odpor plazmatu klesá se vzrůstající teplotou a tak induktivní ohřev začíná být neúčinný. Další metodou ohřevu je metoda založená na

absorpci elektromagnetického vlnění v ohřivaném médiu. Také se využívá metoda, kdy se vstřikuje malé množství neutrálních atomů vodíku s energií rovnou až stonásobku teploty plazmatu, které svoji energii předají srážkami okolnímu plazmatu. Při dosažení termojaderných teplot se začnou vodíková jádra slučovat a část uvolňované energie fúzními reakcemi plazma ohřívá (samoohřev), podobně jako plazma ohřívaly vstříkované částice v případě předchozím. Předpokládá se, že budoucí elektrárny budou používat vnější ohřev jako prostředek zvyšující bezpečnost řízení.

JET (Joint European Torus) je současný největší tokamak světa, který se blíží stavu vyrovnaní produkované fúzní energie a energie spotřebované na ohřev, kdy $Q \approx 0,65$ a Q je termojaderný výkon/vnější příkon plazmatu. Doplnování vodíkového paliva do horkého plazmatu není vůbec snadné. Od stěn přicházejí neutrální atomy, které jsou díky vysokým teplotám v tokamaku velmi rychle ionizovány a v dalším pronikání ke středu komory brání silné magnetické pole. Vstřelené zmrazené vodíkové tabletky do komory rychlostí deset kilometrů za sekundu mohou před svým odpařením dosáhnout nejteplejších oblastí plazmatu. V současné době probíhají ještě experimenty s nadzvukovým napouštěním vodíkového plynu. Úskalí všech termojaderných zařízení jsou druhy nestabilit, které v plazmatu vedou k jeho turbulenci. Někdy až řádově zvyšující se únik částic a energie na stěny komory, čímž se nejen znesnadňuje udržení termojaderných podmínek v centru, ale také se tepelně zatěžuje stěna komory. V posledních letech je jednou z nejdůležitějších částí termojaderného výzkumu právě optimalizace materiálů pro první stěnu (wolfram, uhlík, beryllium) a jejího chlazení spolu s výběrem režimu výbojů, ve kterých je maximálně potlačena turbulence plazmatu.²⁸



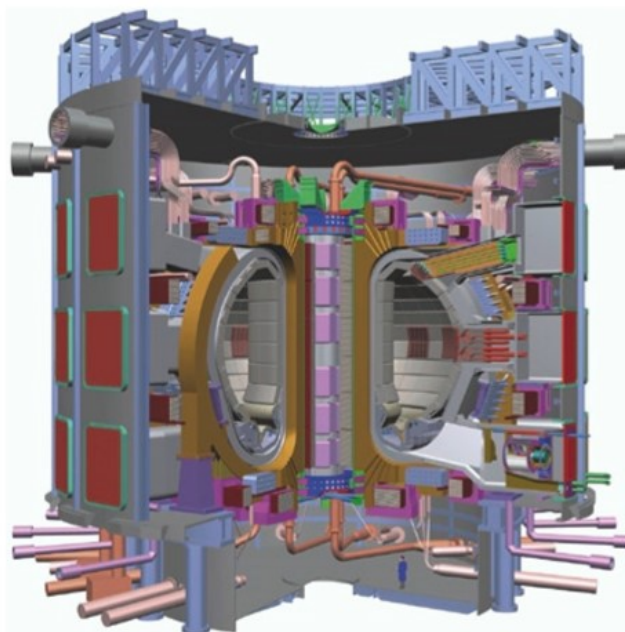
Obr. 23- Schéma Tokamaku²⁸

4.5.3. ITER

ITER je zkratka slov International Thermonuclear Experimental Reactor – Mezinárodní termonukleární experimentální reaktor. Dne 28. června 2005 bylo rozhodnuto o umístění Tokamaku na jih Francie do výzkumného střediska Cadarache. Na tomto projektu spolupracují společně s Evropskou unií navíc ještě státy Japonsko, Čína, USA, Rusko, Jižní Korea a Indie. ITER by měl být uveden do provozu v roce 2020. Vyprodukovat by měl více energie, než je potřeba na spotřebu zažehnutí termojaderné fúze. Schéma ITER je vyobrazeno na obr. 24. Celkový průměr prstence (toroidu) je přibližně 20 m a výšku má 15 m. Tokamak obsahuje soustavu obřích tekutým heliem chlazených supravodivých elektromagnetů. Jedna cívka toroidálního pole o rozměrech 14x9 m má hmotnost 290 tun, celá soustava obsahuje celkem osmnáct cívek. Soustava ještě obsahuje 6 cívek koloidálního pole, jeden centrální solenoid, který má průměr 4 m výšku 12 m a váží 840 tun. Pro hlavní supravodivé cívky se používá NbSn materiál a pro pomocné cívky se z finančních důvodů používá NbTi.

Divertor, ve kterém probíhá termonukleární reakce, je zařízení na dně prstence a je jeho podstatnou součástí. Slouží k odčerpávání nabitých částic, které vznikají při reakci. Jedná se zejména o helium a nečistoty způsobené interakcí částic plazmatu se stěnami reaktoru.

Dlouhodobě využitelným zdrojem energie s dostačujícím výkonem pro uspokojení současných i budoucích energetických potřeb lidstva je právě slučování jader lehkých kovů s jádru prvků těžších. Energeticky nejvýhodnější je reakce deuteria s tritiem, paliva je na Zemi dostatek. Z lithia se dá relativně snadno získat tritium, lithia je v zemské kůře tolik, že by vydrželo minimálně několik tisíc let. Pokud by se v budoucnu podařila zvládnout reakce deuteria s deuteriem, zásoby by byly zajištěny na několik miliard let díky tomu, že se deuterium dá lehce získávat z mořské vody.²⁹

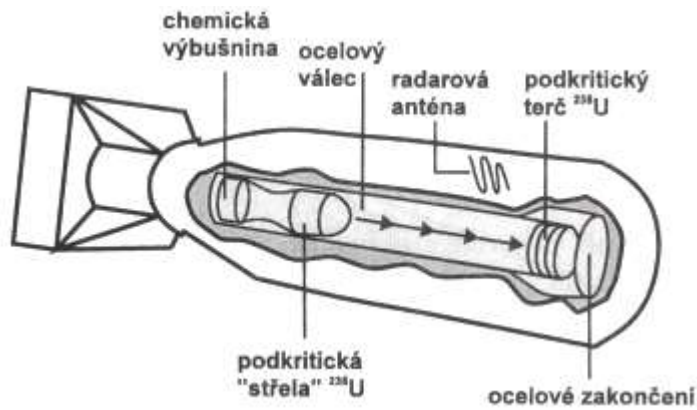


Obr. 24 - ITER ²⁹

4.6. Jaderné zbraně

4.6.1. Štěpné jaderné zbraně

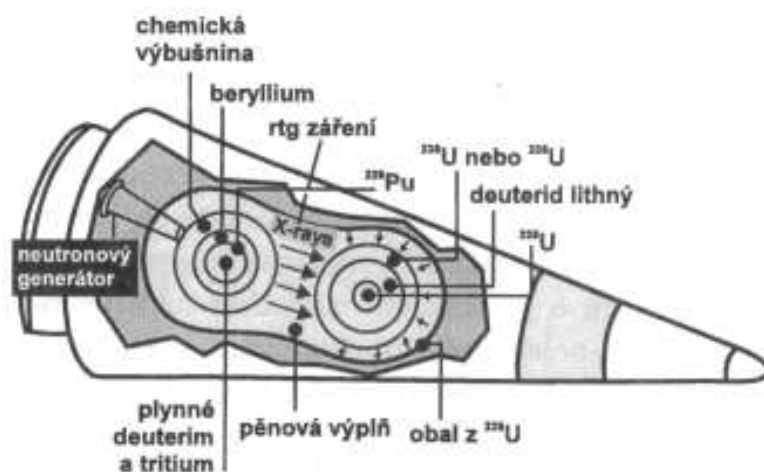
Štěpné jaderné zbraně (atomové bomby) využívají toho, že multiplikační faktor k štěpné soustavy není roven jedné, jako tomu je v jaderných elektrárnách. Jde o to, že neutronů přibývá, a tak roste množství uvolněné energie za časovou jednotku. Zbraně obsahovaly dvě oddělená podkritická množství ^{235}U a ^{239}Pu . Ve chvíli, kdy mělo dojít k explozi, došlo ke spojení obou částí nálože, a tak se vytvořilo nadkritické množství, ve kterém proběhlo štěpení. Veškeré energie nálože se tak uvolnila během zlomku vteřiny. Schéma štěpné jaderné bomby je na obr. 25 Ničivé účinky štěpných zbraní jsou způsobeny uvolňováním obrovského množství tepla a zářivé energie za velmi krátký čas. První atomové bomby byly svrženy 6. a 8. srpna 1945 na japonská města Hirošimu a Nagasaki. Obě města byla zničena, celý svět si uvědomil, dosud nepoznané riziko pro budoucnost, která by mohla vést ke genocidě lidstva.⁵



Obr. 25 - Schéma štěpné jaderné bomby⁵

4.6.2. Termonukleární zbraně

Přestože řízené uvolňování energie termonukleárních reakcí je stále ve stádiu vývoje a je okolo toho mnoho technických problémů, už počátkem padesátých let se podařilo uskutečnit termonukleární explozi. Bylo to v roce 1952, kdy byla přivedená k výbuchu rozsáhlá mnohatunová aparatura, která obsahovala velké množství kapalného tritia a deuteria, jejichž teplota byla $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato reakce deuteria a tritia ale nebyla použitelná z důvodů velké hmotnosti zařízení, nutnosti chlazení a radioaktivity tritia. Schéma termonukleární zbraně je na obr. 26.⁵



Obr. 26 - Hlavice termonukleární zbraně⁵

4.6.3. Zákaz používání jaderných zbraní

Vědomí obrovského ničivého potenciálu zásob jaderných zbraní vyústilo v mezinárodní dohodu vyjádřenou ve smlouvě o nešíření jaderných zbraní, kterou ratifikovalo více než sto států. Byla podepsána 1. července 1968 a v platnost vstoupila v roce 1970. Do současné doby byla podepsána 189 zeměmi. Podle této smlouvy se státy vlastníci zbraně zavázaly, že je neposkytnou jiným státům, státy které zbraně nevlastní se zavázaly k tomu, že o jejich získání nebudou usilovat a také všechny státy souhlasili s tím, že kontrolu plnění smlouvy bude provádět MAAE (Mezinárodní agentura pro atomovou energii).⁵

5. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo utřídit informace o atomu, o využití jaderných reakcí a jaderné energie.

V bakalářské práci je pojednáno o struktuře a vlastnostech atomového jádra, radioaktivitě, kde jsou popsány jednotlivé druhy záření. Podstatná část je věnována jaderným reakcím, detailně jsou popsány štěpné reakce, využití štěpné jaderné reakce v energetice a to především v jaderných elektrárnách. V kapitole o štěpení jádra a využití jaderné energie jsou rozepsány i jednotlivé druhy jaderných reaktorů. Předposlední kapitola je o termonukleární syntéze a využití termonukleární syntézy. Poslední kapitola se zabývá zneužitím jaderných reakcí ve zbrojním průmyslu.

Využití štěpné jaderné reakce je již na vysoké úrovni díky jejímu praktickému využití téměř po celém světě a tudíž i díky možnostem jejího výzkumu. Oproti tomu využití fúzních jaderných procesů je stále ve stádiu výzkumu a vývoje i přes to, že se tím vědci zabývají už od minulého století.

Při vážné havárii v jaderné elektrárně může dojít k úniku radiace, jež může vést ke katastrofě lokálního i globálního významu. Příkladem jsou havárie v jaderných elektrárnách Černobyl a Fukušima 1. Dalším problémem, který zůstává nedořešený, je způsob nakládání s vyhořelým jaderným palivem.

Je důležité, aby se vědci i nadále věnovali výzkumu využití energie z jaderného štěpení i jaderné fúze. K výzkumu i využití je potřeba přistupovat s určitým respektem a zužitkovat tak potenciál jádra atomu ve prospěch celého lidstva.

6. Seznam obrázků

Obr. 1 - Struktura atomu ¹	4
Obr. 2 – Symbol pro označení radioaktivního záření ⁷	9
Obr. 3 - Oblast stabilních nuklidů (řeka stability) ⁵	10
Obr. 4 - Chování radioaktivních záření v magnetickém poli ⁸	11
Obr. 5 - Graf časové závislosti počtu nerozpadlých jader ve vzorku ¹²	14
Obr. 6 - Stopa v jaderné emulzi ¹³	16
Obr. 7 - Soustava tužkového dozimetru ¹³	16
Obr. 8 - Schéma jaderné reakce ¹⁴	17
Obr. 9 Schéma mechanismu štěpení jádra ¹⁵	21
Obr. 10 – Neřízená řetězová reakce ¹⁶	22
Obr. 11 - Průběh řízené řetězové reakce ¹⁶	22
Obr. 12 - Palivová kazeta ¹⁹	27
Obr. 13 - Jaderný reaktor ²⁰	28
Obr. 14- Tlakovodní reaktor PWR ²¹	30
Obr. 15 - Varný reaktor BWR ²¹	32
Obr. 16 - Těžkovodní reaktor CANDU ²¹	33
Obr. 17 - Plynem chlazený reaktor MAGNOX GCR ²¹	34
Obr. 18- Reaktor typu RBMK ²¹	35
Obr. 19 - Rychlý množivý reaktor FBR ²¹	36
Obr. 20 - Ilustrace prvního jaderného reaktoru ²³	37
Obr. 21 - Schéma jaderné elektrárny ²⁴	38
Obr. 22 - Černobylské místo výbuchu v sarkofágu ²⁶	39
Obr. 23- Schéma Tokamaku ²⁸	42
Obr. 24 - ITER ²⁹	44
Obr. 25 - Schéma štěpné jaderné bomby ⁵	45
Obr. 26 - Hlavice termonukleární zbraně ⁵	45

7. Seznam tabulek

Tabulka 1 - Přehled vlastností základních mikročástic ²	4
Tabulka 2 - Konstanty a poločasy rozpadů vybraných nuklidů ⁵	15

8. SEZNAM LITERATURY

1. **CLOSE, Frank.** *Částicová fyzika: Průvodce pro každého.* 10. Praha: Dokořán, 2008. ISBN 978-80-7363-160-4.
2. **VACÍK, Jiří.** *Přehled středoškolské chemie.* 2. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1993. ISBN 80-04-26388-7.
3. **JANČÁŘ, Luděk.** *Periodická soustava prvků.* 1. Brno: Masarykova univerzita, 2013. ISBN 978-80-210-6621-2.
4. **VACÍK, Jiří.** *Obecná chemie.* 1. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1986. Kolumbus. ISBN 14-475-86.
5. **HÁLA, Jiří.** *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie.* 1. Brno: KONVOJ, 1998. ISBN 80-85615-56-8.
6. **MAJER, Vladimír.** *Základy jaderné chemie.* 2. Praha: SNTL, 1981. ISBN 04-618-81.
7. Značka Nebezpečné radioaktivní látky. Happy End [online] . [cit.2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.happyend.cz/znacka-nebezpecne-radioaktivni-latky/>
8. Radioaktivita. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/802-radioaktivita>
9. Záření alfa. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/803-zareni-alfa>
10. Záření beta. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/804-zareni-beta>
11. Záření gama. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/805-zareni-gama>
12. Aktivita zářiče. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/807-aktivita-zarice-a-rozpadovy-zakon>
13. Detektory. K vysokým energiím [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/urychl/k22.htm>
14. Jaderné reakce (syntéza a štěpení jader). Fyzika 007 [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/fyzika-mikrosveta/jaderne-reakce>

15. Jádru atomu, radioaktivita, jaderné reakce [online]. [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/js18/obecna_chemie/web/pages/5-jadro-atomu--radioaktivita--jaderne-reakce.html
16. Jaderné štěpení. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/818-jaderne-stepeni>
17. **NEISER, Jan.** Základy chemických výrob. 1. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1988. ISBN 14-495-88.
18. **DRÁBOVÁ, Dana a Václav PAČES.** Perspektivy české energetiky: Současnost a budoucnost. 1. Praha: Novela bohemia, 2014. ISBN 978-80-87683-26-2.
19. Jaderný energetický reaktor. Svět energie [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/jaderne-elektrarny/jaderny-energeticky-reaktor>
20. JADERNÝ REAKTOR. Miniencyklopedie jaderná energetika [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k35.htm>
21. Základní typy jaderných reaktorů. Skupina ČEZ [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elekriny/jaderna-energetika/nove-jaderne-zdroje/jaderna-energie/zakladni-typy-jadernych-reaktoru.html>
22. Chicago Pile-1. Wikipedie [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Chicago_Pile-1
23. Whatever happened to modern thought?. Toward a sensible organization [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://towardsensibleorganization.wordpress.com/2012/07/29/whatever-happened-to-modern-thought/>
24. Jaderná elektrárna. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/822-jaderna-elektrarna>
25. **DIENSTBIER, Zdeněk.** Hirošima a zrod atomového věku: cesta od atomových zbraní k nukleární medicíně a jaderným elektrárnám. 1. Praha: Mladá fronta, 2010. Kolumbus. ISBN 978-80-204-2224-8.
26. Chernobyl. Chernobyl [online]. [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <https://chernobyl.cz/>
27. Havárie elektrárny Fukušima I. Wikipedie [online]. [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Hav%C3%A1rie_elektr%C3%A1rny_Fuku%C5%A1ima_I

28. **ŘÍPA, Milan.** Řízená termojaderná syntéza: pro každého. 2. Praha, 2005. ISBN 80-902724-7-9.

29. ITER. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/826-iter>

9. RESUMÉ

This bachelor thesis deals with the use of the nuclear energy. There is a description of the structure of the atom, specifically of its nucleus. In the next section is described radioactivity, where each of the radiation types is described in detail. A large part of this thesis is devoted to nuclear reactions – fission and the fusion. Final part covers the use of the fission nuclear energy as well as the thermonuclear energy in the nuclear power plants and the nuclear weapons.

Key words – atom, radioactivity, nuclear reaction, nuclear fission, nuclear fusion, nuclear reactor, Tokamak.