

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY



**Jaderná energetika v učivu fyziky na středních
školách**

Bakalářská práce

Autor: Karolína Slánská

Studijní program: B1701 Fyzika

Studijní obor: Fyzika – Matematika

Forma studia: Prezenční

Vedoucí práce: doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.

Termín odevzdání práce: duben 2011

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením doc. RNDr. Romana Kubínka, CSc. a že jsem veškerou použitou literaturu uvedla v seznamu literatury.

V Olomouci

.....

podpis

Ráda bych poděkovala především doc. RNDr. Romanu Kubínkovi, CSc. za cenné rady, trpělivost, ochotu a čas, který mi věnoval při tvorbě bakalářské práce, rovněž také RNDr. Janě Kašparové z Gymnázia Valašské Klobouky za poskytnutí prostoru při realizaci dotazníkového výzkumu.

BIBLIOGRAFICKÁ IDENTIFIKACE

Autor: Karolína Slánská

Název práce: Jaderná energetika v učivu fyziky na středních školách

Typ práce: Bakalářská práce

Pracoviště: Katedra experimentální fyziky

Vedoucí práce: doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.

Rok obhajoby práce: 2011

Abstrakt:

Jaderná energetika má v současnosti mezi jednotlivými typy elektráren výsadní postavení. Již malé množství uranu je zdrojem obrovské energie, tato výroba je ekologická, neznečišťuje životní prostředí jako třeba v případě elektrárny tepelné. Avšak určité procento obyvatelstva stále proti energii z jádra vystupuje, především kvůli jaderným haváriím v Černobyli a aktuálně v japonské Fukušimě. Cílem této práce je shrnout poznatky o jaderné energetice – proces štěpení jádra, štěpná řetězová reakce, schéma jaderné elektrárny, proces výroby elektřiny, zpracování radioaktivních odpadů. Tyto poznatky by pak měly posloužit učitelům středních škol jako informační zdroj. Na jeho základě a díky získanému přehledu v této problematice si studenti mohou vytvořit vlastní názor na jadernou energii a nepodléhat tak všeobecným předsudkům.

Klíčová slova: jaderná elektrárna, jaderný reaktor, štěpná řetězová reakce, radioaktivita, poločas rozpadu, izotop, vyhořelé palivo

Počet stran: 46

Počet příloh: 2

Jazyk: český

BIBLIOGRAPHICAL IDENTIFICATION

Author: Karolína Slánská

Title: Nuclear energy in secondary school education

Type of thesis: Bachelor thesis

Department: Department of Experimental Physics

Supervisor: doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.

The year of presentation: 2011

Abstract:

Nuclear energy has privileged position in energy industry. Even small quantities of uranium are source of huge energy. Nuclear power plants are quite ecological for instance in comparison with fossil fuel power plants. But there is still considerable amount of people fighting against nuclear energy arguing by nuclear disasters in Chernobyl and Fukushima. Objective of this theses is to summarize basic nuclear energy knowledge; especially process of nuclear fission, fission chain reaction, diagram of nuclear power plants, production process of electricity and processing of nuclear waste. All these informations would be useful for secondary school teachers. Students are supposed to make their own informed opinion on nuclear energy on the basis of this theses.

Keywords: nuclear power plant, nuclear reactor, fission chain reaction, radioactivity, half-life, isotope, spent fuel

Number of pages: 46

Number of appendices: 2

Language: Czech

OBSAH

1. ÚVOD	7
2. PŘEHLED STŘEDOŠKOLSKÉHO UČIVA JADERNÉ FYZIKY	8
2.1 Jádro atomu	8
2.2 Radioaktivita	9
2.3 Radioaktivní přeměny	11
2.4 Poločas přeměny	11
2.5 Řady radioaktivních přeměn	12
2.6 Umělá radioaktivita	13
3. PRŮZKUM ZNALOSTÍ V OBLASTI „ATOMOVÁ A JADERNÁ FYZIKA“ – JADERNÁ ENERGETIKA	14
4. VÝVOJ JADERNÉ ENERGETIKY	22
5. JADERNÁ ELEKTRÁRNA	23
5.1 Jaderný reaktor	23
5.1.1 Jaderné palivo	23
5.1.2 Moderátory	24
5.1.3. Chladiiva	24
5.1.4 Absorbátor	25
5.1.5 Typy jaderných reaktorů	25
5.2 Primární okruh	29
5.3 Sekundární okruh	30
5.4 Kontejnment	31
5.5 Radioaktivní odpady	32
5.6 Vyhořelé jaderné palivo	33
6. JADERNÁ HAVÁRIE JAPONSKÉ ELEKTRÁRNY FUKUŠIMA 1 V BŘEZNU 2011 .	35
7. DOMÁCÍ POKUSY Z JADERNÉ FYZIKY	38
7.1 Čočkový poločas rozpadu	38
7.2 Model štěpné řetězové reakce	39
7.3 Štěpení atomu ve sklenici vody	40
8. ZÁVĚR	42
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A OSTATNÍCH ZDROJŮ	43
SEZNAM PŘÍLOH	46

1. ÚVOD

Při výuce fyziky na našich středních školách je velký důraz kladen především na mechaniku, molekulovou fyziku a termodynamiku, optiku. Bohužel jaderná fyzika je až žalostně zanedbávaná, o čemž svědčí i obsah učebnic pro střední školy. V něm figurují pojmy jako jádro atomu, izotop, poločas rozpadu, řady radioaktivních přeměn a jaderný reaktor jako jediný z komponent jaderné elektrárny. Právě tato malá informovanost často vede k dezorientaci v tomto oboru a následné averzi k jaderné energetice.

Právě zmíněné důvody vedly k volbě tématu bakalářské práce. Uran má v sobě obrovský potenciál, výroba energie tímto způsobem je šetrná k životnímu prostředí. Avšak svět vidí především jaderné havárie a jejich dopad na přírodu a lidské zdraví. To je samozřejmě oprávněné, ale je zapotřebí vysvětlit důvody příčiny havárií a uvést na pravou míru, co všechno chrání lidstvo a svět před radioaktivním zářením a nepropadat vlivu médií, které často poskytují zkreslené informace.

Cílem této bakalářské práce je vytvořit materiál, který by mohl sloužit jako zdroj informací pro učitele středních škol a kapitola „Domácí pokusy z jaderné fyziky“ jako zpestření hodin jaderné fyziky vedoucí k větší názornosti a pochopení. Právě učitel může svojí iniciativou a nadšením vzbudit pozitivní názory u svých studentů. Tato práce by mu měla v jeho snažení pomoci, protože poskytuje shrnutí nejdůležitějších poznatků tohoto fyzikálního oboru, které je potřebné k pochopení toho, co se děje v intervalu od rozštěpení jádra až po zapnutí spotřebiče v domácnosti.

2. PŘEHLED STŘEDOŠKOLSKÉHO UČIVA JADERNÉ FYZIKY

Cílem této kapitoly je zpracovat přehled středoškolského učiva jaderné fyziky přednášeného na našich středních školách. Je základním minimem pro zvládnutí a pochopení tématu jaderná energetika. Dokumenty, které byly použity v této kapitole, jsou především učebnice pro střední školy.

2.1 Jádro atomu

Jádro atomu se skládá z protonu, kladně nabitě částice o hmotnosti $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ a neutronu, elektricky neutrální částice, jehož hmotnost je přibližně rovna hmotnosti protonu, tedy $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Počet protonů v jádře vyjadřuje protonové číslo Z , zároveň také určuje pořadí prvku v periodické soustavě prvků. Číslo N odpovídá počtu neutronů v jádře. Protony a neutrony můžeme souborně označit pojmem nukleony. Jejich celkový počet logicky odpovídá součtu $Z + N = A$. Číslo A se označuje jako nukleonové číslo a vyjadřuje celkovou hmotnost jádra. Pomocí čísel A a Z , které se považují za nejvýznamnější charakteristiky prvku, je možno libovolný prvek X zapsat následovně:



Takto se často označuje nejen jádro, ale také atom či látka složená ze stejných atomů, tzv. nuklid. Pro názornost a představu o pojmu nuklid je uvedena pod tímto textem tabulka s jednotlivými příklady:

Nuklid	Značka	Počet		
		protonů	nukleonů	neutronů
Vodík	${}^1_1\text{H}$	1	1	0
Uhlík	${}^{12}_6\text{C}$	6	12	6
Uran	${}^{238}_{92}\text{U}$	92	238	146

Tabulka 2.1 (převzato [11])

V přírodě může nastat situace, kdy atomy určitého prvku mají stejné protonové číslo, ale nukleonové číslo se liší. Potom hovoříme o tzv. izotopu. Z odlišnosti nukleonového čísla vyplývá různý počet neutronů a tím pádem také různá hmotnost izotopů. Často právě směsi izotopů vytvářejí přírodní prvky jako např. uran, prvek důležitý pro jadernou energetiku [11].

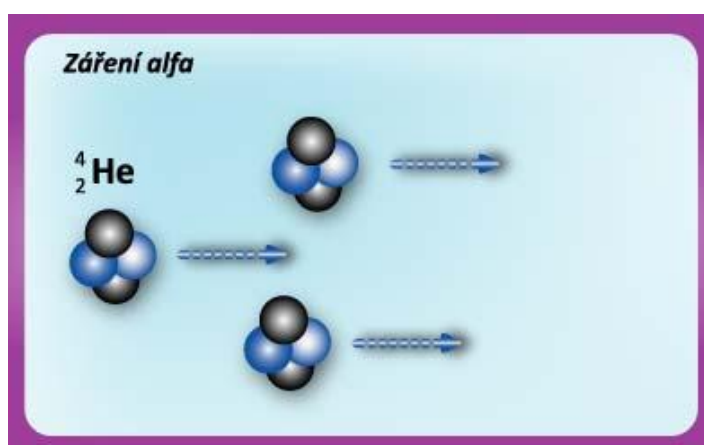
„Přírodní uran je směs izotopů ${}^{235}_{92}\text{U}$ a ${}^{238}_{92}\text{U}$. Převažuje izotop ${}^{238}_{92}\text{U}$, kterého je 99,3%, avšak jako jaderné palivo slouží pouze izotop ${}^{235}_{92}\text{U}$, jehož je v přírodním uranu jen 0,7%. Je tedy nutné uran „obohatit“, tzn. zvýšit v něm obsah ${}^{235}_{92}\text{U}$.“ [11, str. 256]

2.2 Radioaktivita

Důležitým jménem, které souvisí s radioaktivitou, je jméno francouzského fyzika H. Becquerela, kterého zaujalo, že soli uranu produkují záření vlastnostmi podobné rentgenovému záření. Dalšími významnými osobnostmi, které přispěli k poznávání radioaktivity, jsou manželé P. Curie a M. Curie-Sklodovská. Svou prací se jim podařilo izolovat ze smolince (uranové rudy) prvek, který pojmenovali radium a který vykazoval značné známky vyzařování [11].

„Vyzařování radia je projevem přirozené radioaktivity. Při ní se nestabilní jádro atomu mění a tento děj je spojen s vyzařováním jaderného záření.“ [11, str. 258] Objevem radia samozřejmě bádání nepřestalo, v následujících letech byly objeveny další prvky vykazující přirozenou radioaktivitu. V současnosti je jich asi 50 a označují se pojmem radionuklidy. Existují 3 druhy jaderného záření a to záření α , β a γ . Jejich rozdílné vlastnosti se projevují např. při odklonu záření v magnetickém poli [11].

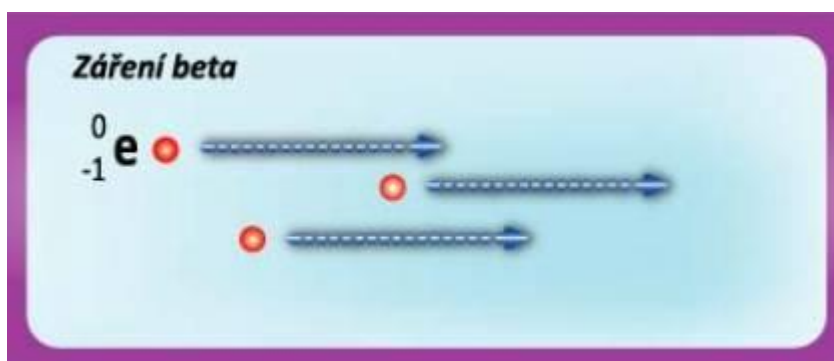
- „Záření α tvoří jádra hélia, které mají velkou rychlost, a tedy i značnou energii. V magnetickém poli se záření α odchyluje na opačnou stranu než záření β a o větší hmotnosti svědčí menší zakřivení trajektorie“ [11, str. 258],



Obr.2.1 Záření α (převzato [12])

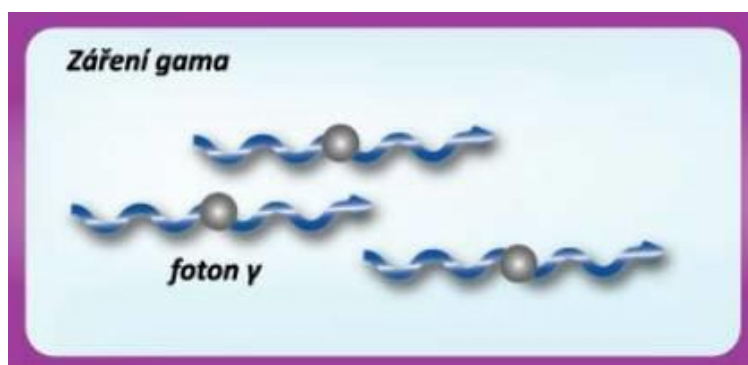
- „Záření β je proud elektronů vyletujících z jádra atomu. Částice záření β tedy mají záporný náboj a malou hmotnost. Proto se v magnetickém poli odchylují na opačnou

stranu a s větším zakřivením trajektorie. Elektrony v jádře vznikají jako výsledek děje, při němž se neutron mění na kladný proton a záporný elektron“ [11, str. 258],



Obr.2.2 Záření β (převzato [12])

- „Záření γ je elektromagnetické vlnění o velmi malé vlnové délce a magnetické pole na ně nepůsobí. Toto záření neexistuje samostatně a provází jaderné děje, při nichž vzniká záření α nebo β .“ [11, str. 258]



Obr.2.3 Záření γ (převzato [12])

Jaderné záření, které prochází látkou, může způsobovat ionizaci, případně měnit strukturu látek a to může být nebezpečné zvláště pro živé organismy. Aby se tomuto zabránilo, používají se látky, které mají schopnost jaderné záření pohlcovat. Co se týče záření α , může to být např. hliníková destička o tloušťce 0,02 mm, pro záření β pak destička ze stejného materiálu, avšak o větším tloušťce, tj. 3 mm. Zářetí γ však vyžaduje již větší tloušťku hliníkové destičky, asi 1 m [11]. V praxi by se však záření γ absorbovalo vrstvou olova

Zdroj jaderného záření charakterizuje fyzikální veličina zvaná aktivita. Její jednotkou je 1 Bq (becquerel) a vyjadřuje úbytek počtu dosud nepřeměněných jader (nebo je možné

také říci přírůstek produktů radioaktivní přeměny) za časovou jednotku. Je vyjádřena vztahem $A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$, kde t je čas a $N(t)$ počet nepřeměněných jader [12].

2.3 Radioaktivní přeměny

Pokud dojde k uvolnění částice záření z příslušného radionuklidu, dojde ke změně jádra tohoto radionuklidu a ten se potom mění v nuklid jiného prvku. Takový proces se označuje jako radioaktivní přeměna. Existuje několik typů radioaktivních přeměn:

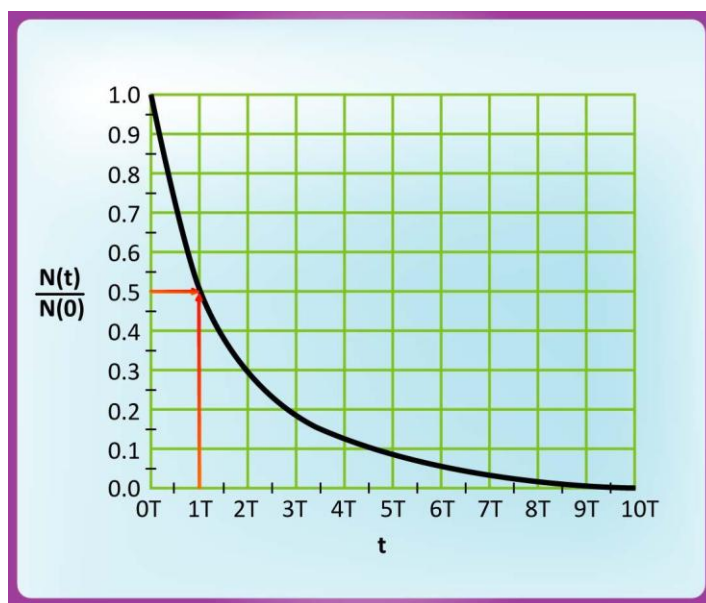
- Přeměna α – při tomto typu radioaktivní přeměny dochází k uvolňování záření α . Obecně ji můžeme zapsat rovnicí ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He}$. Lze si povšimnout, že při tomto typu přeměny původní nuklid ztrácí dva protony, tím se mění nukleonové číslo Z a na základě této skutečnosti také pořadí prvku v periodické soustavě prvků, bude o 2 jednotky menší. Konkrétní případy jader, které se mění přeměnou α je např. ${}^{238}_{92}\text{U}$ nebo ${}^{230}_{90}\text{Th}$,
- Přeměna β^- - v tomto případě dochází k emisi záření β^- . Vyjadřuje ji obecná rovnice ve tvaru ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e + \tilde{\nu}_e$, druhý člen pravé strany rovnice je elektron ${}^0_{-1}e$ a třetí člen téže strany rovnice je elektronové antineutrino (neutrální částice) $\tilde{\nu}_e$. Jelikož došlo k uvolnění jednoho elektronu, vzniklý nuklid má o jeden proton více a tím pádem dojde k jeho posunutí v periodické soustavě prvků o jedno místo vpravo,
- Přeměna β^+ - je charakterizována uvolněním záření β^+ a popisuje ji obecná rovnice ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_1e + \nu_e$, kde člen 0_1e je označen jako pozitron (antičástice elektronu) a ν_e jako elektronové neutrino (neutrální částice). Vzniklé jádro má o jeden proton méně než původní jádro a v periodické soustavě prvků se posune o jedno místo vlevo,
- Záchyt elektronu – jak již název napovídá, v tomto případě dochází k záchytu elektronu z elektronového obalu protonem v jádře [11, 12].

2.4 Poločas přeměny

Na obr. 2.4 lze pozorovat, že s přibývajícím časem se aktivita zářiče zmenšuje. „Pro tuto závislost platí, že za určitou dobu se aktivita zmenší vždy na polovinu hodnoty v počátečním okamžiku. Proto je důležitým údajem veličina poločas přeměny T , tedy doba, za

kteřou dojde k jaderné přeměně v polovině z počátečního počtu jader zářiče“ [11]. Tento poločas přeměny lze vypočítat na základě vztahu $\frac{n_0}{2} = n_0 \cdot e^{-\lambda T}$,

po logaritmování $\lambda T = \ln 2$, neboli $T = \frac{1}{\lambda} \ln 2$, kde λ je rozpadová konstanta, která vyjadřuje rychlost rozpadu radionuklidu. U různých radionuklidů se poločasy přeměny velmi liší např. poločas přeměny u $^{238}_{92}\text{U}$ je $4,5 \cdot 10^9$ let, u $^{212}_{84}\text{Po}$ 0,000 000 3 s, u $^{226}_{88}\text{Ra}$ 1620 let atd “ [12].



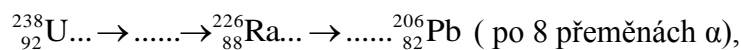
Obr2.4 Graf úbytku přeměňujících se radioaktivních jader (převzato [12])

2.5 Řady radioaktivních přeměn

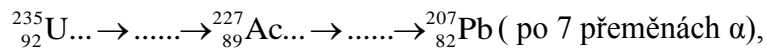
„Řada radioaktivních přeměn (též přeměnová řada) je řada radionuklidů, ve které každý radionuklid (člen řady) s výjimkou prvního vzniká radioaktivní přeměnou předešlého radionuklidu v řadě. Přeměnová řada končí vždy stabilním nuklidem, který se již dále nepřeměňuje.“[12] Existuje několik druhů řad radioaktivních přeměn, konkrétně čtyři, přičemž jejich název je dán prvním prvkem řady.

Přeměnové řady:

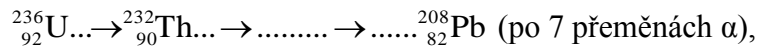
1) Uranová (urano-radiová)



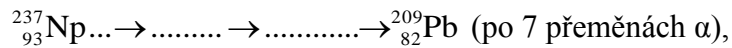
2) Aktiniová (urano-aktiniová)



3) Thoriová (urano-thoriová)



4) Neptuniová



↓



2.6 Umělá radioaktivita

Radionuklidy se vyskytují v přírodě, ale je možné je vytvořit i uměle. Tím se zabývala dcera manželů Curieových I. Joliot-Curieová společně s manželem F. Joliot-Curiem. Na hliník působili zářením α a po skončení pokusu se ukázalo, že hliník sám produkoval záření. V současnosti se umělé radionuklidy připravují nejčastěji ozařováním látek neutrony. Tento objev má velký význam, protože umělé radionuklidy dosáhly velkého využití v lékařství [11].

3. PRŮZKUM ZNALOSTÍ V OBLASTI „ATOMOVÁ A JADERNÁ FYZIKA“ – JADERNÁ ENERGETIKA

Cílem tohoto průzkumu je zjistit, na jaké úrovni se pohybují znalosti studentů středních škol o atomové a jaderné fyzice potřebné k pochopení výkladu o jaderných elektrárnách. Zároveň také odhaluje názory a mínění studentů o jednotlivých typech elektráren.

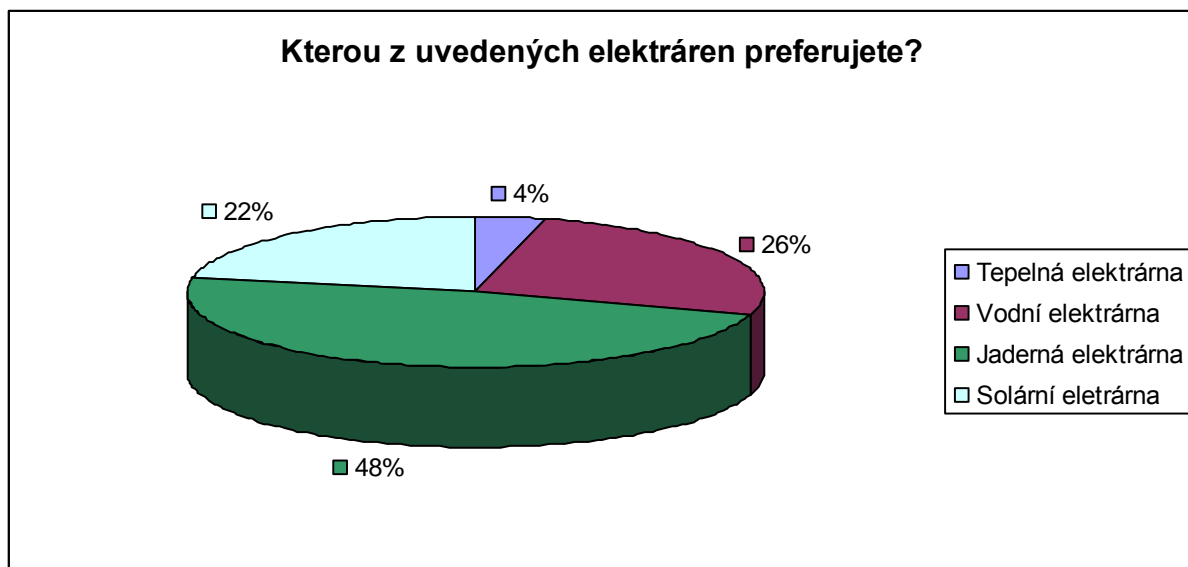
Dotazník byl zadán celkem 50 studentům Gymnázia ve Valašských Kloboukách, konkrétně 30-ti studentům 3. ročníku a 20-ti studentům 4. ročníku. Celkem se jednalo o 10 otázek (viz. Příloha 1), 8 bylo zadáno testově, otázka č. 1 dává na výběr z možností na základě preference studenta a také požaduje vysvětlení této preference. Otázka č. 10 žádá pozitivní a negativní názory na jadernou energetiku.

Otázka č. 1

Kterou z uvedených elektráren preferujete? Uveďte důvod:

- a) Tepelná elektrárna
- b) Vodní elektrárna
- c) Jaderná elektrárna
- d) Solární elektrárna

4% procenta dotazovaných uvedlo tepelnou elektrárnu. Jako důvody své volby uváděli, že vyrobí velké množství energie a že zde funguje parní turbína. Možnost b) volilo 26% respondentů z důvodu ekologie, šetření životního prostředí, bezpečnosti, nejmenšího dopadu na životní prostředí a absence odpadu. Jadernou elektrárnu si vybralo 48% studentů. Mezi jejich argumenty patřily efektivní výroba, nízké emise, velké množství vyrobené energie, nízká spotřeba nerostných surovin, účinnost, šetrnost. Možnost d) tj. solární elektrárnu, preferuje 22% dotázaných. Podle nich je totiž ekologická, bezpečná, využívá obnovitelné zdroje energie, neznečišťuje životní prostředí, sluneční energie je nevyčerpatelná.



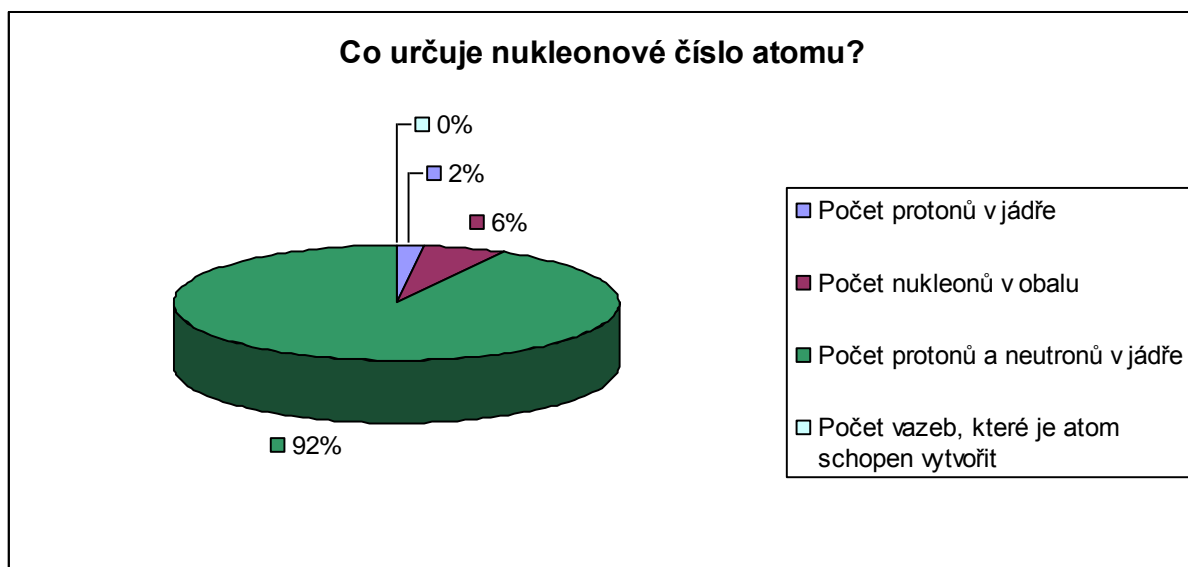
Graf 3.1: Odpověď na otázku: „Kterou z uvedených elektráren preferujete?“

Otázka č. 2

Co určuje nukleonové číslo atomu?

- Počet protonů v jádře
- Počet nukleonů v obalu
- Počet protonů a neutronů v jádře
- Počet vazeb, které je atom schopen vytvořit

Správnou odpovědí je možnost c), to správně usoudilo 92% studentů. Možnost a) uvedla 2% studentů, možnost b) 6% a možnost d) nezatřhl nikdo.



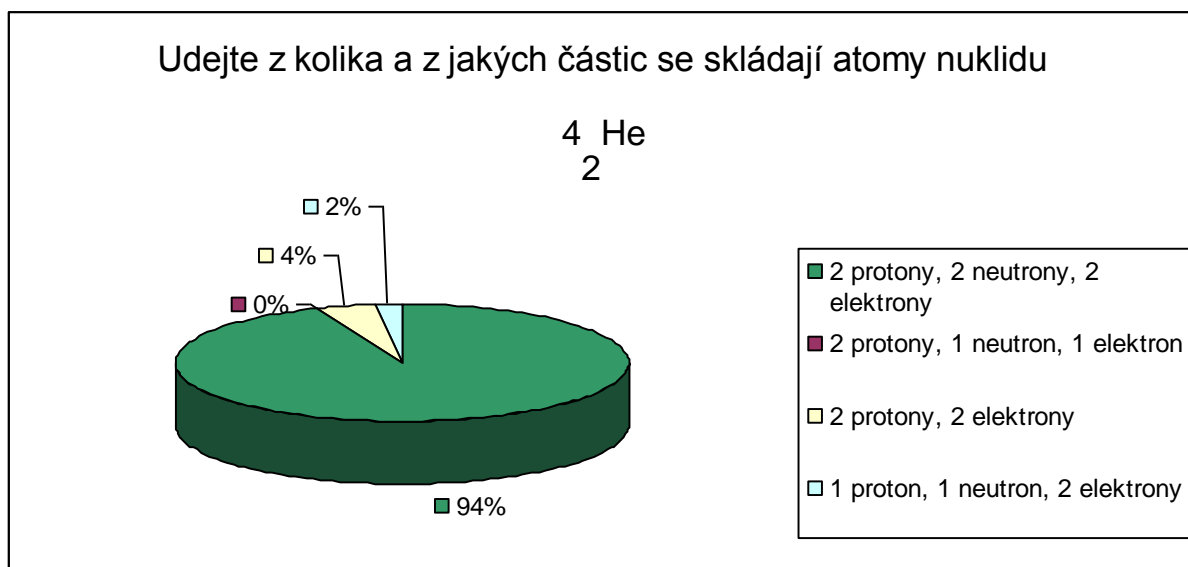
Graf 3.2: Odpověď na otázku: „Co určuje nukleonové číslo atomu?“

Otázka č. 3

Udejte z kolika a z jakých částic se skládají atomy nuklidu ${}^4_2\text{He}$.

- a) 2 protony, 2 neutrony, 2 elektrony
- b) 2 protony, 1 neutron, 1 elektron
- c) 2 protony, 2 elektrony
- d) 1 proton, 1 neutron, 2 elektrony

Správnou odpovědí je možnost a), to vědělo 94% studentů. Možnost b) zvolena vůbec nebyla, volba c) má 4%, možnost d) 2% z dotázaných.



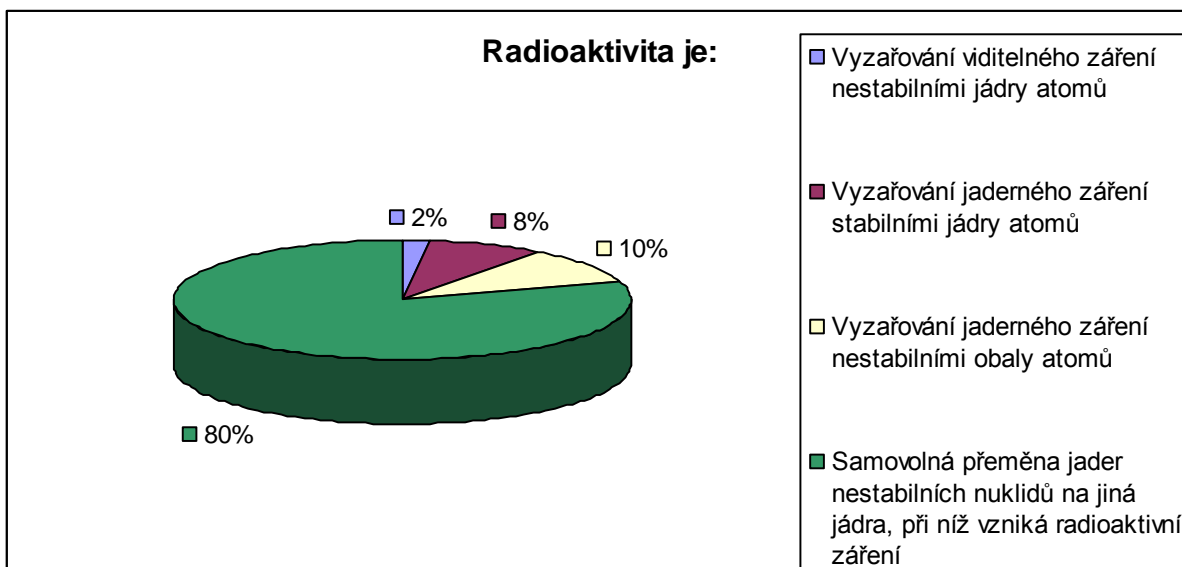
Graf 3.3: Odpověď na otázku: „Udejte z kolika a z jakých částic se skládají atomy nuklidu ${}^4_2\text{He}$ “

Otázka č. 4

Radioaktivita je:

- a) Vyzařování viditelného záření nestabilními jádry atomů
- b) Vyzařování jaderného záření stabilními jádry atomů
- c) Vyzařování jaderného záření nestabilními obaly atomů
- d) Samovolná přeměna jader nestabilních nuklidů na jiná jádra, při níž vzniká radioaktivní záření

Správnou odpověď, tj. možnost d) označilo 80% studentů. Pro možnost a) byla 2%, možnost b) 8% a možnost c) 10% respondentů.



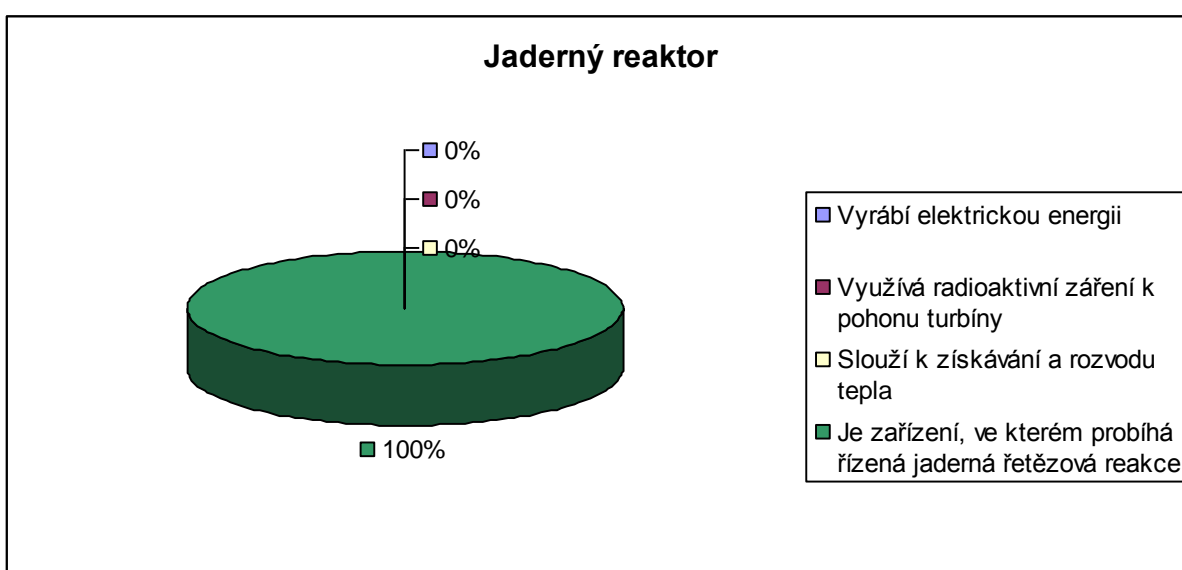
Graf 3.4: Odpověď na otázku: „Radioaktivita je...“

Otázka č. 5

Jaderný reaktor

- a) Vyrábí elektrickou energii
- b) Využívá radioaktivní záření k pohonu turbíny
- c) Slouží k získávání a rozvodu tepla
- d) Je zařízení, ve kterém probíhá řízená jaderná řetězová reakce

V této otázce všichni dotazovaní označili možnost d), která je správná, tudíž tato otázka byla zodpovězena na 100%.



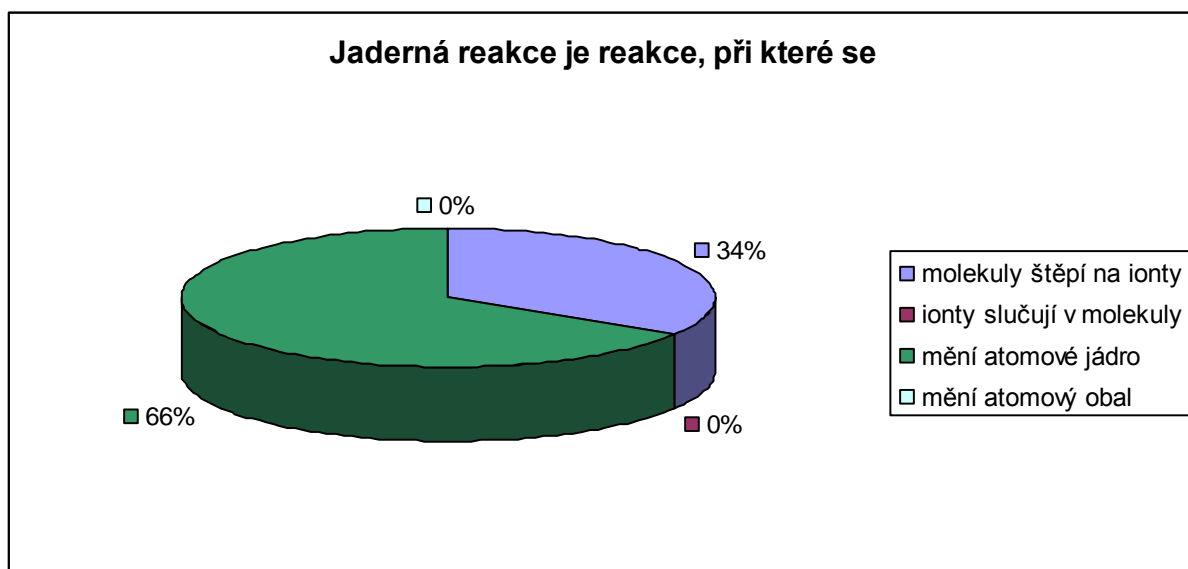
Graf 3.5: Odpověď na otázku: „Jaderný reaktor...“

Otázka č. 6

Jaderná reakce je reakce, při které se

- a) molekuly štěpí na ionty
- b) ionty slučují v molekuly
- c) mění atomové jádro
- d) mění atomový obal

Zde byly zvoleny pouze 2 odpovědi a to správná odpověď c) 66ti% studentů a možnost a), tu zvolilo 34% z celkového počtu studentů.



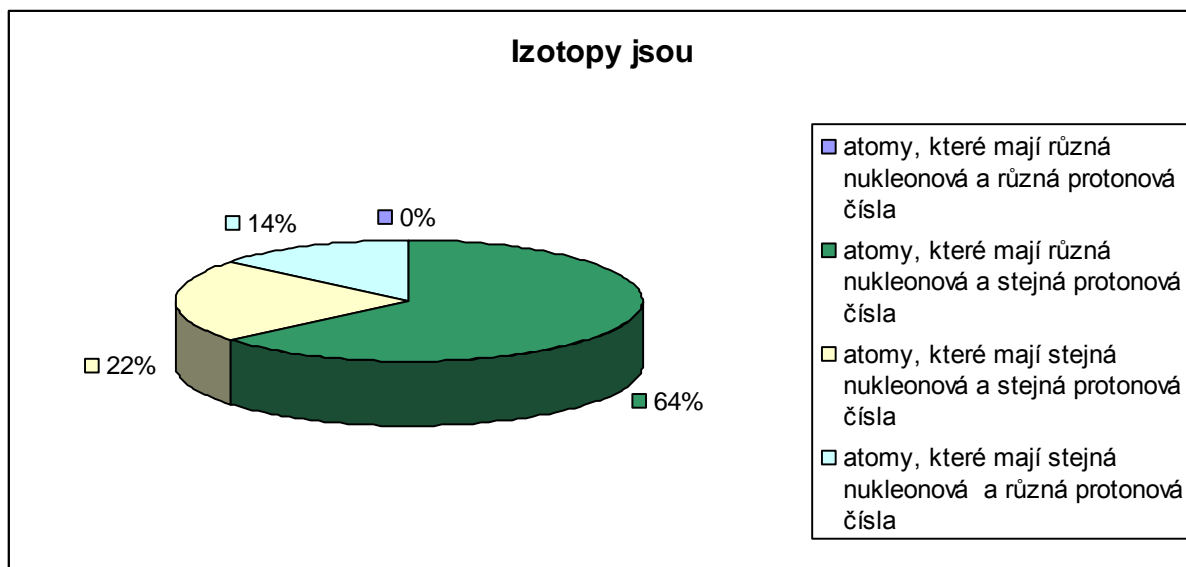
Graf 3.6: Odpověď na otázku: „Jaderná reakce je reakce, při které se...“

Otázka č. 7

Izotopy jsou:

- a) Atomy, které mají **různá** nukleonová a **různá** protonová čísla
- b) Atomy, které mají **různá** nukleonová a **stejná** protonová čísla
- c) Atomy, které mají **stejná** nukleonová a **stejná** protonová čísla
- d) Atomy, které mají **stejná** nukleonová a **různá** protonová čísla

64% respondentů odpovědělo správně možnost b), 22% možnost c), 14% možnost d), odpověď a) nikým vybrána nebyla.



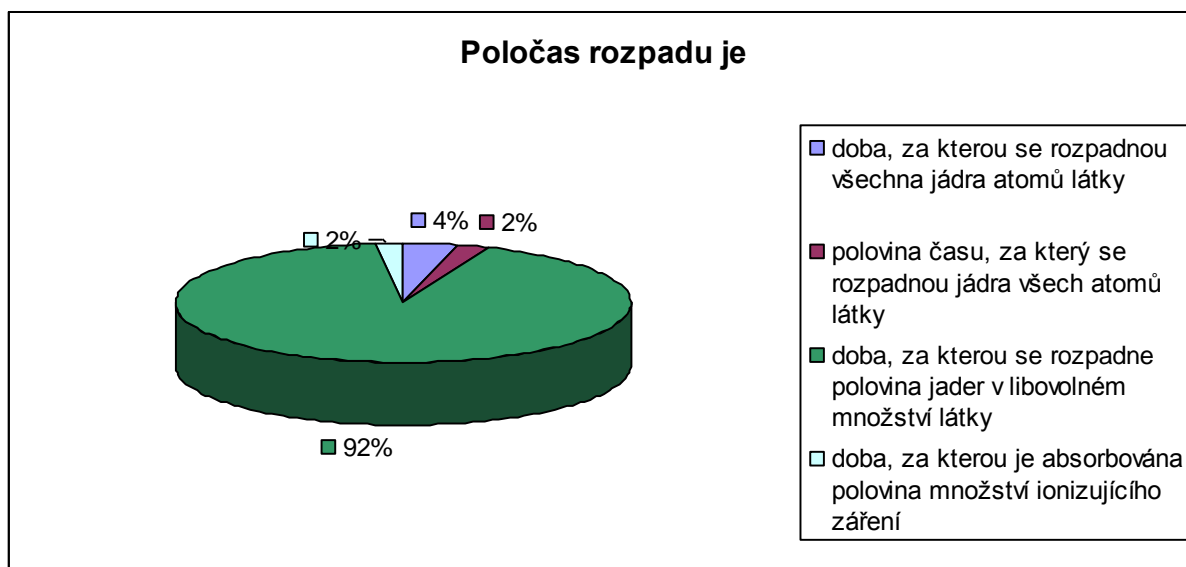
Graf 3.7: Odpověď na otázku: „Izotopy jsou...“

Otázka č. 8

Poločas rozpadu je:

- Doba, za kterou se rozpadnou všechna jádra atomů látky
- Polovina času, za který se rozpadnou jádra všech atomů látky
- Doba, za kterou se rozpadne polovina jader v libovolném množství látky
- Doba, za kterou je absorbována polovina množství ionizujícího záření

S možností c) bylo úspěšných 92% subjektů, možnost a) zvolilo 4%, možnost b) 2% a možnost d) jako v případě b) také 2%.



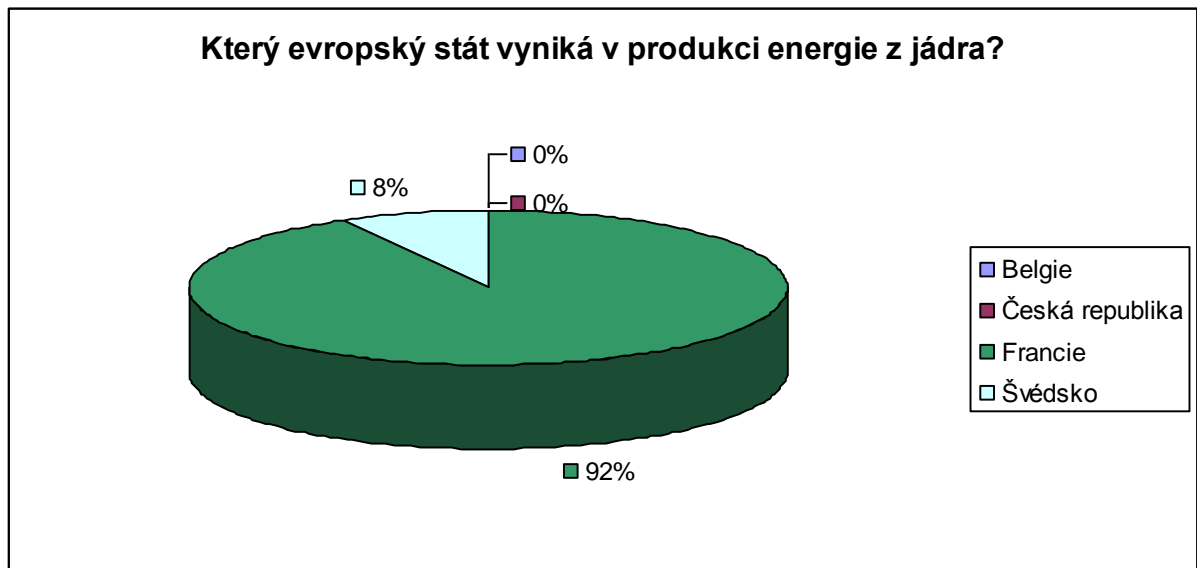
Graf 3.8: Odpověď na otázku: „Poločas rozpadu je...“

Otázka č. 9

Který evropský stát vyniká v produkci energie z jádra?

- a) Belgie
- b) Česká republika
- c) Francie
- d) Švédsko

V současnosti v této oblasti vyniká Francie, což si také myslelo 92% studentů, Švédsko uvedlo 8%, Českou republiku a Belgii neuvedl nikdo.



Graf 3.9: Odpověď na otázku: „Který evropský stát vyniká v produkci energie z jádra?“

Otázka č. 10

Jaké jsou podle Vás výhody a nevýhody jaderné energetiky?

Mezi nejčastěji uváděné odpovědi patří např.

Výhody

- Velké množství vyrobené energie
- Neznečišťuje životní prostředí
- Nevypouští škodlivé emise do ovzduší
- Levná, bezpečná, výkonná, efektivní
- Nespotřebovává tolik paliva jako např. tepelná elektrárna
- Čistá výroba energie

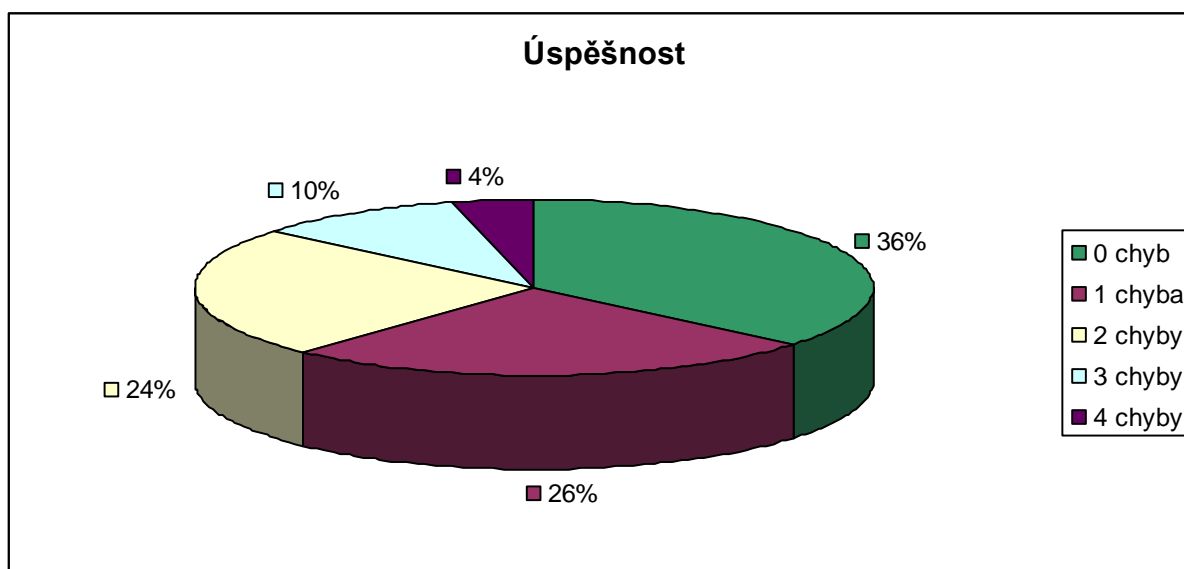
Nevýhody

- Jaderný odpad, jeho skladování, recyklace
- Spotřeba vody
- Výběr lokality pro stavbu jaderné elektrárny
- Hrozba havárie
- Nedostatek paliva
- Radioaktivní záření
- Finanční náročnost

Celková úspěšnost:

18 studentů (tj. 36%) odpovědělo naprosto bez chyby, 13 studentů (26%) mělo 1 chybu, 12 studentů (24%) 2 chyby, 5 studentů (10%) 3 chyby a 2 studenti (4%) 4 chyby.

Stoprocentně studenti odpověděli na otázku č. 5(Co je jaderný reaktor?), v ostatních otázkách se odpovědi již liší; nejvýraznější rozpory pozorují u otázek č. 4 (Co je Radioaktivita?), 6 (Jaderná reakce) a 7 (Co je to izotop?).



Graf 3.10: Celková úspěšnost

[25].

4. VÝVOJ JADERNÉ ENERGETIKY

V letech 1935-1937 nechal tým německých vědců, který tvořili Otto Hahn, Lise Meitnerová a Fritz Strassmann, dopadat svazek neutronů na atomy uranu. V prosinci roku 1939 zjistili, že atom uranu se vlivem tohoto „bombardování“ neutrony rozdělil na dva jiné atomy. Současně došlo k uvolnění velkého množství energie. Svůj objev označili pojmem jaderné štěpení. Později byla tato skutečnost prokázána dalšími vědci, kteří na problematice řízení jaderné reakce pracovali nezávisle na sobě na různých místech [1].

Další osobností, která nepochybně s historií jaderné energetiky souvisí, je italský fyzik Enrico Fermi. Tomu se společně se svým týmem povedlo vyvolat první řetězovou reakci s použitím moderátoru, a to při spuštění prvního jaderného reaktoru 2. prosince 1942 v podzemí stadionu chicagské univerzity. Reaktor nese jméno Chicago Pile-1 [1].

V roce 1951 byl v americkém Idahu spuštěn první reaktor, který sloužil pro výrobu elektřiny. Nešlo však o reaktor, který by produkoval proud do sítě, jednalo se o rozsvícení čtyř dvousetwattových žárovek. První jaderná elektrárna, sloužící k dodávce proudu do veřejné sítě byla spuštěna v ruském Obninsku v roce 1954 [2]. Od tohoto data je možné pozorovat postupný rozvoj jaderné energetiky a výstavbu jaderných elektráren i v ostatních státech.

1. československá jaderná elektrárna byla spuštěna v roce 1972 v Jaslovských Bohunicích na Slovensku. Reaktor byl „těžkovodní“, poté byla přijata změna koncepce a všechny další bloky postavené na území tehdejšího Československa, obsahovaly tlakovodní reaktory. V letech 1985-1987 byly zprovozněny čtyři bloky v Dukovanech a v letech 2000 a 2003 dva bloky v Temelíně. [2].

V roce 1979 došlo v americkém Three Mile Island k jaderné havárii, radioaktivita se však nedostala mimo území elektrárny. 26.4. 1986 potkal stejný osud i jadernou elektrárnu v sovětském Černobyli, v tomto případě se však radioaktivita rozšířila [3]. To vyvolalo u části obyvatel na světě obavy z nadměrného rizika jaderných elektráren. Přestože se v případě Černobyli jednalo o selhání lidského faktoru a následky byly opravdu tragické, je jaderná energetika stále perspektivním zdrojem energie.

V současnosti pracuje ve 30 státech světa asi 436 jaderných reaktorů. Podíl jaderné energie v celkové celosvětové spotřebě elektřiny tvoří asi 15% [4].

5. JADERNÁ ELEKTRÁRNA



Obr.5.1 Schéma jaderné elektrárny (převzato z [10])

5.1 Jaderný reaktor

Lze konstatovat, že jaderný reaktor je „srdcem“ celé jaderné elektrárny. Je to zařízení, které uvolňuje tepelnou energii díky samovolně se udržující štěpné řetězové reakci. Oblast, kde zmíněná reakce probíhá, je označována jako **aktivní zóna**. Existuje velké množství možností využití jaderného reaktoru jako např. pro školní a chemické účely či při výzkumu a výrobě radioizotopů. V dalším textu se však budeme zabývat pouze reaktory, které slouží pro výrobu elektrické energie a tepla [6].

Aktivní zóna je tvořena několika základními částmi.

5.1.1 Jaderné palivo

Nejpodstatnější částí jaderného reaktoru jsou palivové články, obsahující jaderné palivo. V současnosti se v jaderné energetice používá jako palivo buď přírodní uran, složený prakticky ze dvou izotopů, z toho 99,3% tvoří U238, 0,7% U235 nebo uran mírně obohacený, tj. uran, který obsahuje větší množství U 235. V přírodě se uran nevyskytuje v čistém stavu, jeho existence je vázána na jiné prvky, např. kyslík. Je součástí mnoha nerostů, např.

smolince, carnotitu, autunitu, gumonitu, koffinitu, daviditu atd. V dnešních reaktorech je nejpoužívanějším palivem UO_2 . [5, 7].

Jaderné palivo používané u energetických reaktorů má tvar dlouhých tyčí, které jsou umístěny v trubce z povlakového materiálu. Takovouto strukturu označujeme pojmem palivový element. Větší počet palivových elementů pak nazýváme palivový článek, resp. palivová kazeta. Povlakový materiál, který obaluje jaderné palivo, vytváří bariéru mezi palivem a chladivem a tím zabraňuje tomu, aby radioaktivita a štěpné produkty pronikaly do chladiva a tím způsobily jeho kontaminaci. Nároky na materiál, z kterého je povlak vyroben, jsou velmi vysoké. Je totiž vystaven extrémním podmínkám, jako jsou např. vysoký tlak, jaderné záření, toky teploty apod. Proto musí splňovat následující požadavky:

- co nejmenší absorpce neutronů,
- vysoká tepelná vodivost,
- odolnost vůči radiaci, korozi, mechanickému poškození.

Mezi používané materiály patří např. slitiny hořčíku, zirkonu, nerezavějící oceli a grafit.

[6, 7]

5.1.2 Moderátory

Aby mohla probíhat štěpná řetězová reakce v přírodním uranu, je nezbytné, aby došlo ke zpomalení tzv. rychlých neutronů na tzv. pomalé neutrony. Při štěpné reakci dojde současně také k uvolnění dvou až tří neutronů. Dva z nich je nutné zpomalit použitím moderátoru, protože by mohlo dojít k neřízené štěpné řetězové reakci. V jaderných elektrárnách je uplatňována řízená štěpná řetězová reakce. Látky, které zpomalují neutrony, označujeme jako **moderátory** a reaktor obsahující moderátor jako **tepelný reaktor**. Princip zpomalování neutronů spočívá v tom, že dochází k pružným srážkám mezi neutrony a moderátorem a to vede ke ztrátě energie neutronů. Zároveň by však nemělo docházet k absorpci neutronů. Mezi nejpoužívanější materiály patří voda, těžká voda a grafit [7].

5.1.3. Chladiva

Při jaderném štěpení se uvolněná tepelná energie transformuje na elektrickou pomocí tepelného cyklu, což souvisí se zahříváním reaktoru, a proto je jeho nedílnou součástí chladicí médium, které obtéká jaderné palivo. Vhodné chladivo má malý účinný průřez pro absorpci tepelných neutronů a velkou měrnou tepelnou kapacitu. Absorpce neutronů nesmí být příliš velká. Mezi vhodná chladiva patří např. plyny, konkrétně oxid uhličitý a především helium, inertní plyn, který má výborné vlastnosti. Je téměř ideální, jeho nevýhodou je vysoká

cena. Z kapalin se používá lehká voda, již řidčeji těžká voda a také tekuté kovy, např. sodík, který se používá pro chlazení rychlých reaktorů [7].

5.1.4 Absorbátor

Význam absorbátorů spočívá v zachycování přebytečných neutronů, s jejichž pomocí dochází k regulaci výkonu reaktoru. Ten je totiž závislý na počtu štěpných reakcí. **Regulační tyče** jsou vyrobeny z vysoce absorpčních materiálů, jako je např. kadmium nebo bor. V případě potřeby jsou zasouvány do aktivní zóny reaktoru, např. při regulaci výkonu reaktoru. Pokud jsou v aktivní zóně reaktoru, výkon se snižuje, při jejich stoupání se výkon zvyšuje. Existují také tzv. **havarijní tyče**. Pokud zazní havarijní signál nebo dojde k poruše či jakékoli anomálii v provozu reaktoru, havarijní tyče vlastní vahou spadnou do aktivní zóny reaktoru a dochází k jeho odstavení [17, 18].

Aktivní zóna je chráněna před únikem neutronů tzv. **reflektorem**, který ji obklopuje. Vrací alespoň určité procento neutronů zpátky do aktivní zóny. Mezi jeho vlastnosti patří malá schopnost absorpce neutronů, dobře brzdí a rozptyluje. Často je tedy reflektor zhotoven ze stejného materiálu jako moderátor [7].

5.1.5 Typy jaderných reaktorů

Na první pohled se může zdát, že pokud zkombinujeme základní prvky aktivní zóny (moderátor, chladivo atd.), dospějeme k velkému počtu různých typů jaderných reaktorů. Skutečností ovšem je, že velká část je z fyzikálního hlediska nemožná.

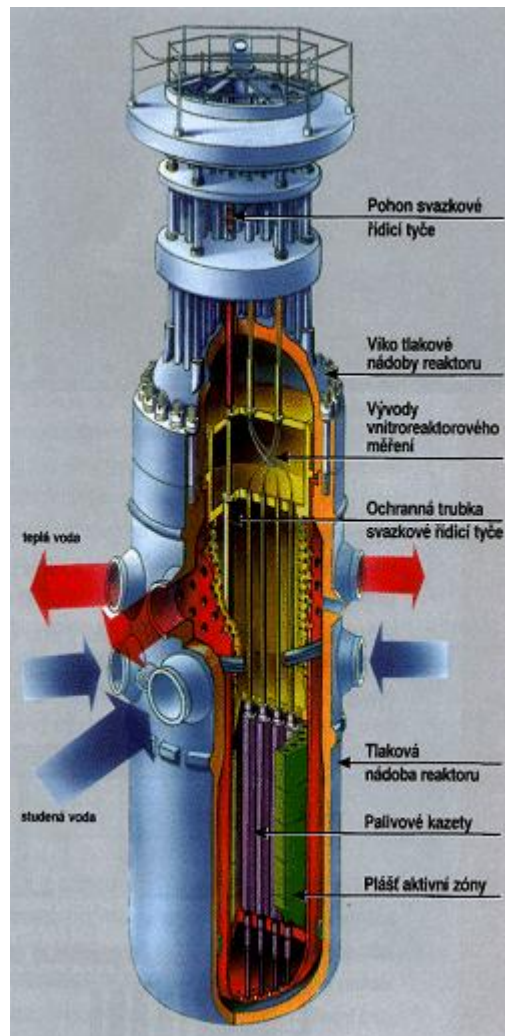
Podle provedení aktivní zóny reaktory rozdělujeme na:

- homogenní – tento typ se týká především pokusných reaktorů, v praxi se neaplikuje, je pro něj charakteristické, že palivo je rozpuštěné v moderátoru,
- heterogenní – palivo je obaleno povlakem a tím je odděleno od chladiva a moderátoru [5, 7].

Podle toho, zda se řetězové štěpení uskutečňuje rychlými nebo pomalými neutrony:

- tepelné reaktory – štěpení prostřednictvím pomalých neutronů,
- rychlé reaktory – toto štěpení probíhá v reaktoru bez moderátoru [5, 7].

Reaktory chlazené vodou



Obr.5.2 Řez lehkovodním jaderným reaktorem (převzato z [8])

Tlakovodní reaktor

Označujeme jej zkratkou **PWR** (**P**ressurized **l**ight-**W**ater cooled and moderated **R**eactor) či případně ruskou zkratkou **VVER** (**V**odo-**V**odjanyj **E**nergetičeskij **R**eaktor). „V současné době zaujímají reaktory typu PWR mezi jadernými reaktory výsadní postavení jak co do počtu provozovaných a objednaných jednotek, tak i z hlediska velikosti výkonu na jednotku.“ [5, str. 40] Uvedený typ reaktoru je umístěn také v našich jaderných elektrárnách – v Temelíně i Dukovanech. Jako palivo používá UO_2 . Palivo je hermeticky uzavřené v povlaku, který tvoří zirkoniová slitina. Asi 300 palivových proutků vytváří palivové články. Chladicí médium tvoří voda, jejíž fyzikální, chemické i tepelné vlastnosti jsou dobře známe.

Ve vodíku lehké vody se ovšem dobře absorbují neutrony, tím pádem vznikají vysoké požadavky na palivo [9].

Varný reaktor

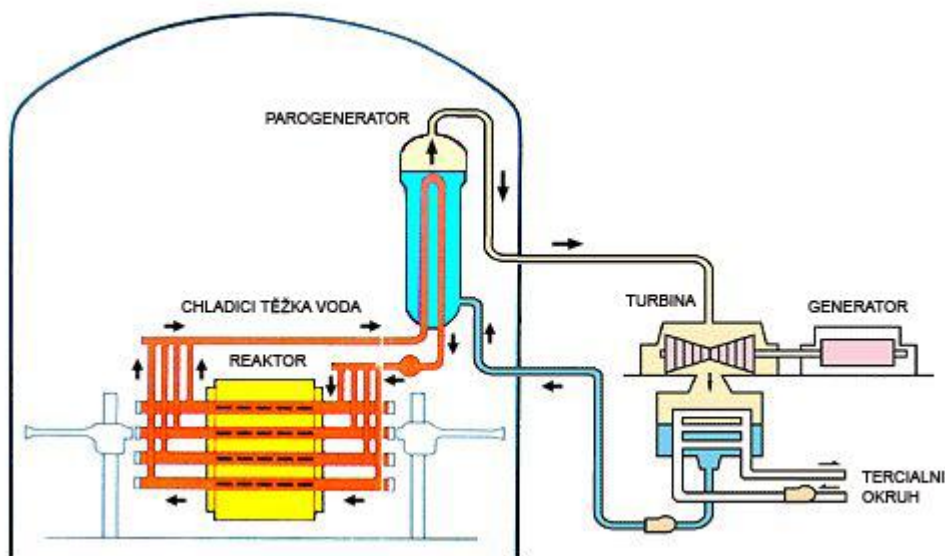
Je označován zkratkou BWR (Boiling Water Reactor). V současnosti je druhým nejrozšířenějším jaderným reaktorem na světě hned po reaktoru PWR. Je používán především v USA a západních zemích. Hlavním rozdílem mezi varným a tlakovodním reaktorem je skutečnost, že v aktivní zóně dochází k ohřevu vody až do varu, následně k odpařování vody a vzniklá pára vede z reaktoru přímo do turbíny, kterou pohání. Oproti tlakovodním reaktorům má však tento typ reaktoru nevýhodu. Je jí možnost, že parní turbína je radioaktivní, neboť vzniklá pára může nést stopy radioaktivity [5].

Grafitový vodou chlazený reaktor

Je označován zkratkou RBMK (Reaktor bolšoj moščnosti kanalnyj). V minulosti často používaný reaktor, byl součástí již první jaderné elektrárny. Také nechvalně proslulý díky černobylské havárii. Po této nešťastné události byla jeho výroba omezena. V současné době je jím vybaveno pouze malé procento elektráren. Palivové pruty jsou tvořeny palivem z UO_2 , povlak tvoří slitiny zirkonia a niobu. Aktivní zóna reaktoru obsahuje svislé tlakové kanálky, které jsou rovnoměrně umístěny v grafitovém bloku [19]. „Do každého tlakového kanálu je čerpadly hnána voda, která se v kanálech zahřívá až k bodu varu, takže z kanálu proudí směs vody a páry. Tato směs jde do tzv. separátorů, ve kterých se oddělí zbylá voda a nasycená pára je vedena na turbínu spojenou s generátorem elektrického proudu. Elektrárna je tedy jednookruhová - v turbínách proudí radioaktivní pára a je nutné je odstínit.“ [19]

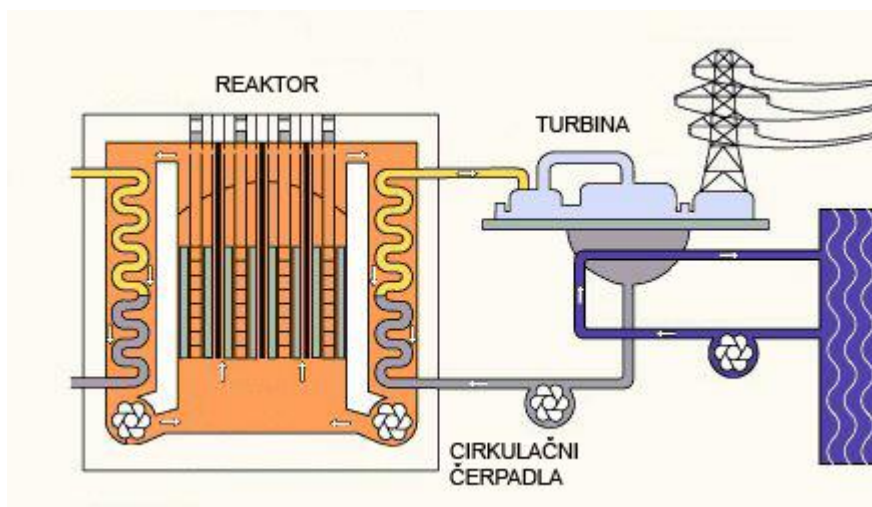
Těžkovodní reaktor

Jak už název napovídá, moderátorem je v tomto případě těžká voda (D_2O). „Základem konstrukce aktivní zóny je nádoba tvaru ležícího válce (tzv. Calandria), která má v sobě vodorovné průduchy pro umístění tlakových trubek ze zirkoniové slitiny. Do nádoby je napuštěn těžkovodní moderátor, který musí být chlazen speciálním okruhem, aby jeho teplota zůstala stále nízká (moderační schopnost se snižuje s teplotou). V tlakových trubkách jsou zasunuty palivové články a kolem nich proudí chladící těžká voda.“ [20] O konstrukci těchto reaktorů se snažila řada společností, nakonec se však nejvíce prosadil reaktor CANDU (CANada Deuterium Uranium).



Obr. 5.3 Schéma těžkovodního reaktoru (převzato z [20])

Reaktory chlazené plynem



Obr.5.4 Schéma reaktoru chlazeného plynem (převzato z [21])

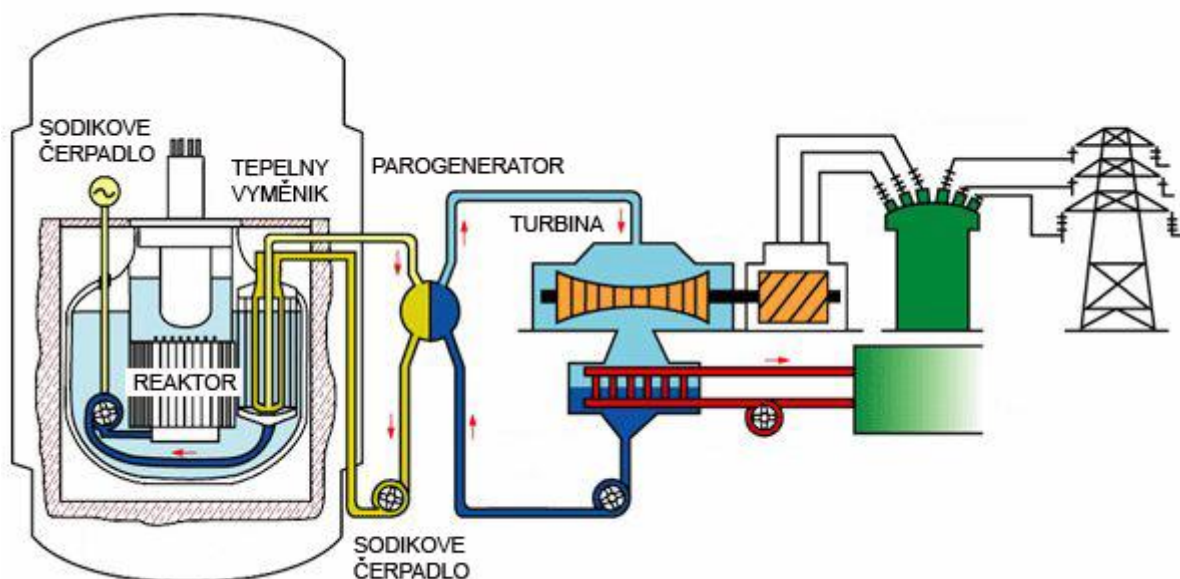
Největšího úspěchu doznal ve světě ze skupiny plynem chlazených reaktorů typ **Magnox** neboli **GCR** (Gas Cooled Reactor). Jako chladivo se používá oxid uhličitý. Označení Magnox má základ ve struktuře palivových článků. Je to totiž zkratka pro látku, která pokrývá kovový přírodní uran, tedy oxid hořčíku. Moderátorem je grafit, ve kterém jsou vytvořeny kanály, do těch jsou pak vkládány palivové články ve tvaru tyčí. Reaktor charakterizuje vysoká bezpečnost, aktivní zóna je před vnějškem chráněna ocelovou tlakovou

nádobou a betonovým stíněním. Přesto však další vlastnosti jako je nízký specifický výkon atd. vedly k jeho diskreditaci [5, 21].

Dalším typem plynem chlazených reaktorů je reaktor **AGR**. Je podobný reaktoru Magnox, také chlazený oxidem uhličitým, došlo však k drobným modifikacím palivového článků. Jako palivo se už nepoužívá přírodní kovový uran, ale obohacený uran z UO_2 a povlak netvoří oxid magnézia, ale nerezavějící ocel [21].

Rychlé množivé reaktory chlazené tekutými kovy

Vývojem těchto reaktorů se zabývala řada zemí, a tak vznikl ve Velké Británii reaktor PFR, v sovětském svazu BN-350 a BN-600, ve Francii Phénix a Super Phénix. Palivo tvoří směs oxidů PuO_2 a UO_2 , (oba silně obohacené) s povlakem z nerezavějící oceli. Jako chladivo se používá tekutý kov, nejčastěji sodík. Ten má řadu výhod, např. vysoký bod varu ($883\text{ }^\circ\text{C}$) při atmosférickém tlaku, takže rychlé reaktory mohou pracovat při nízkém tlaku. Jak už bylo řečeno, jedná se o rychlý reaktor, takže moderátor se zde nepoužívá [5, 6, 7].



Obr.5.5 Schéma rychlého reaktoru chlazeného tekutými kovy [22]

5.2 Primární okruh

V předchozí kapitole bylo podrobně popsáno, z jakých částí se skládá aktivní zóna, ale především jak funguje jaderný reaktor. Právě on je totiž základním prvkem tzv. **primárního okruhu**. Zjednodušeně můžeme říci, že princip primárního okruhu spočívá v přeměně vody v páru. V reaktoru probíhá řízená, štěpná řetězová reakce, při níž vzniká teplo. To ohřívá chladicí médium, které je následně v primárním okruhu odváděno do

parního generátoru a dále do sekundárního okruhu. Zároveň pak také zpětně dochází k transportu ochlazeného chladiva zpět do reaktoru. Voda obou okruhů se vzájemně nemísí. Hovoříme o tzv. horké a studené větvi primárního okruhu. Ve studené větvi je situováno tzv. **hlavní cirkulační čerpadlo**, které zajišťuje cirkulaci chladícího média v primárním okruhu. Parní generátor je tedy společným článkem primárního a sekundárního okruhu, protože vyrábí páru pro parní turbínu. Hodnotí se u něj parní výkon, tlak, čistota páry atd. U varných reaktorů bylo řečeno, že pára vzniká přímo v reaktoru, tím pádem v tomto případě ztrácí přítomnost parního generátoru svůj význam [7].

Prvkem primárního okruhu je též **kompenzátor objemu**. Jak už název napovídá, jeho funkce spočívá v regulaci tlaku a objemu chladiva. Jeho změny nastávají v důsledku změn teplot v reaktoru. Důležitou součástí je samozřejmě také potrubí, které slouží ke spojování jednotlivých komponent, slouží k dopravě pracovních tekutin apod. Nároky na jeho výrobu jsou velmi vysoké, neboť v důsledku špatné konstrukce dochází k časté poruchovosti. Potrubí musí být pevné, odolné vůči teplotám, tlaku atd. Samozřejmě záleží na umístění potrubí, na charakteru dopravované látky, na skutečnosti, jaký tlak bude na potrubí působit, případně dalších vlivech [5].

Podstatnou činností při chodu reaktoru je cirkulace chladiva, kterou zajišťují **hlavní oběhová čerpadla**. Musí být dimenzována na požadované hodnoty tlaku, teploty, množství chladiva a dopravované výšce. V případě, že v jaderném reaktoru dojde k úniku vody, např. v důsledku prasklého potrubí, aktivují se **hydroakumulátory**. Začnou pracovat, nastane-li v reaktoru pokles tlaku pod 5,9 MPa. Hydroakumulátory tvoří pasivní havarijní systém [6]. Důraz je logicky kladen také na čistotu chladiva.

5.3 Sekundární okruh

Mezi části vytvářející sekundární okruh můžeme zařadit také výše uvedené parní generátory, které tvoří rozhraní mezi primárním a sekundárním okruhem. Základním rozdílem mezi primárním a sekundárním okruhem je skutečnost, že v sekundárním okruhu nehrozí nebezpečí úniku radioaktivního záření či kontaminovaného paliva. Přichází sem pára, disponující pohybovou energií, kterou využívají parní turbíny spojené na společné hřídeli s generátorem, v němž dochází k přeměně na elektrickou energii.

Stejně jako v jiných typech elektráren, i zde hraje důležitou roli **parní turbína**. Právě k ní je přivedena pára, která ji svým působením roztáčí. Rotor parní turbíny je pevně spojený s elektrickým generátorem. Je to zařízení, ve kterém dochází k přeměně energií na

elektrickou energii. Je tvořen statorem a rotorem. Ve statoru jsou situovány cívky, ve kterých dochází k indukovaní elektrického napětí. Rotor vytváří točivé magnetické pole. Parní turbína je spojena s elektrickým generátorem, pohání ho a dochází ke vzniku elektrické energie.

Dominantou každé jaderné elektrárny jsou chladicí věže, se kterými si většina lidí jadernou elektrárnu spojuje. Uniká jimi pára, která vzniká v **chladícím okruhu**. Jeho nutnou částí je kondenzátor. „Na povrchu trubek pára kondenzuje, jejich vnitřkem protéká chladicí voda, která je po ohřátí v kondenzátoru vedena do chladících věží.“ [6, str. 45] Zde se voda vlivem proudění vzduchu ochlazuje. Různé elektrárny disponují různým počtem věží, jejich výška se pohybuje v rozmezí 120 až 200 metrů.



Obr.5.6 Chladicí věže (převzato z [23])

5.4 Kontejnment

Jaderná elektrárna má řadu bezpečnostních bariér, tou poslední je struktura zvaná kontejnment. „Železobetonová, 56 m vysoká, válcová stavba má stěny 1,2 m silné s ocelovou výstelkou. Kopule má tloušťku 1,1 m, průměr válce je 45 m. Celá konstrukce je předepjata ocelovými lany s tahem odpovídajícím váze tělesa o hmotnosti 1000 t.“ [6, str. 45] Tyto parametry platí konkrétně pro jadernou elektrárnu Temelín. Je to ochrana nejen vnější (to znamená, že má odolat zemětřesení, vichřici, pádu letadla, teroristickému útoku), ale také vnitřní. Je konstruována tak, aby vydržela silný vnitřní tlak, který má původ v havárii a nepropustila velké množství radioaktivity do okolního prostředí.

V době psaní této bakalářské práce však lidstvo získalo další, dosud neznámé, zkušenosti z tragédie v japonské jaderné elektrárně Fukušima. Zde se doslova přepisovaly dosavadní názory na jadernou bezpečnost v podmínkách obrovské tragédie, kterou bylo ničivé

zemětřesení a následná vlna tsunami, která zničila oblast, kde je jaderná elektrárna vybudována. Aktuální poznatky jsou uvedeny v samostatné kapitole.

5.5 Radioaktivní odpady

Problematika radioaktivního odpadu souvisí se samotným provozem jaderné elektrárny. „Radioaktivním odpadem rozumíme jakýkoliv materiál (který může, ale nemusí být doprovázen neradioaktivním materiálem), pro který se neplánuje další užití a jehož charakter a úroveň radioaktivity jsou takové, že z hlediska radiační bezpečnosti neumožňují jeho bezprostřední rozptýlení do životního prostředí.“ [7, str.176] Podle skupenství radioaktivní odpad dělíme na:

Kapalný – rozumí se jimi především chladicí tekutiny a náplně filtrů, které slouží k čištění aktivní kapaliny. Je třeba zohlednit to, že radioaktivní není jen samotná voda, ale také všechny částice, které jsou v ní obsaženy, tj. soli a korozní částice. Jejich zpracování začíná zahušťováním odparem, následně jsou smíchány buď s asfaltem (bitumenem) – bituminace nebo s cementem – cementace. Tato směs je vkládána do ocelových sudů [6, 7].

Plynný – je produkován hlavně při odvětrávání nádrží s aktivní vodou nebo pracovního prostředí. Zachycení plynného odpadu probíhá ve filtrech. Tím se sníží radioaktivita plynu pod mez, která je stanovena pro jeho bezpečné vypouštění do ovzduší [6].

Pevný – souvisí především s údržbou v jaderné elektrárně, tzn. při revizích, výměnách, opravách apod. Avšak patří sem také např. oděvy, pomůcky nebo nářadí. Podobně jako kapalné odpady jsou ukládány do speciálních sudů [6].

Hlavní zásadou při ukládání radioaktivního odpadu je jeho dostatečná izolace od okolního prostředí na tak dlouho, dokud neklesne množství radioaktivity v materiálu pod přijatelnou mez. Odpad je ukládán do speciálních míst, tzv. úložišť radioaktivního odpadu. Může se jednat o stavby pozemní či podzemní. Ochranu tvoří větší množství vrstev z vybraných materiálů, tj. bitumen, cement, ocel nebo jíl. Je samozřejmostí podobně jako u jaderného reaktoru, že i tato stavba musí odolat zemětřesení, povodním, útokům, pádu letadla apod. Úložiště jaderného odpadu pro Českou republiku se nachází v areálu Jaderné elektrárny Dukovany. Některé státy využívají k ukládání odpadu také hlubinné geologické formace nacházející se na jejich území, konkrétně ve Švédsku do skalního masivu či v Německu do opuštěných solných dolů [7].



Obr.5.7 Mezisklad použitého jaderného paliva v JE Dukovany (převzato z [10])

Při přepravě vyhořelého paliva musí být dodrženy přísné bezpečnostní předpisy. Palivo je uloženo v ocelových kontejnerech. Tento materiál je vystaven náročným zkouškám, jako je např. pád z výšky na betonový podklad či ocelový trn, je ponořen do vody v hloubce 15 m na 8 hodin a musí odolat žáru 800°C. Byly prováděny také pokusy, které souvisí s případnou havárií při přepravě vyhořelého paliva, např. automobil přepravující kontejnery záměrně narazil ve velké rychlosti do betonové stěny nebo naopak do tohoto automobilu narazila rychle jedoucí lokomotiva. [10].



Obr.5.8 Kontejnery Castor v dukovanském skladu Dukovany(převzato z [10])

6. JADERNÁ HAVÁRIE JAPONSKÉ ELEKTRÁRNY FUKUŠIMA 1 V BŘEZNU 2011

11. března letošního roku zasáhlo Japonsko silné zemětřesení o síle 8,9 stupně Richterovy škály, které následně vyvolalo přílivovou vlnu vysokou až deset metrů. Japonsko leží na tzv. ohnivém kruhu, místě střetu litosférických desek, konkrétně Pacifické a Asijské. V důsledku jejich tření může docházet k zemětřesení či aktivní činnosti sopek. Tím pádem není zemětřesení v Japonsku nic neobvyklého, avšak to letošní bylo svojí silou a následky výjimečné. O život přišly tisíce obyvatel, mnoho je jich stále pohřešováno. Hmotné ztráty jsou obrovské [13].

Nejdiskutovanějším následkem zemětřesení a následného tsunami je havárie jaderné elektrárny Fukušima 1. Již při prvních otřesech byla jaderná elektrárna podle předpisů odstavena pomocí řídicích tyčí, které byly zasunuty do reaktoru a zastavily tak probíhající štěpnou řetězovou reakci. Došlo však ke zkolabování externích zdrojů napájení, které zajišťují fungování bezpečnostních systémů, proto byly nastartovány diesel generátory. Bylo totiž třeba zajistit fungování chladicích systémů, které odvádějí zbytkové teplo z reaktoru. Tato možnost ovšem posloužila jen jako krátkodobé řešení, neboť dodávka paliva pro generátor byla poškozena. Následně došlo ke stavu ztráty vnitřních zdrojů napájení vlastní potřeby (společně se ztrátou napájení vnějšími zdroji se tento stav označuje jako tzv. complete blackout) [14].

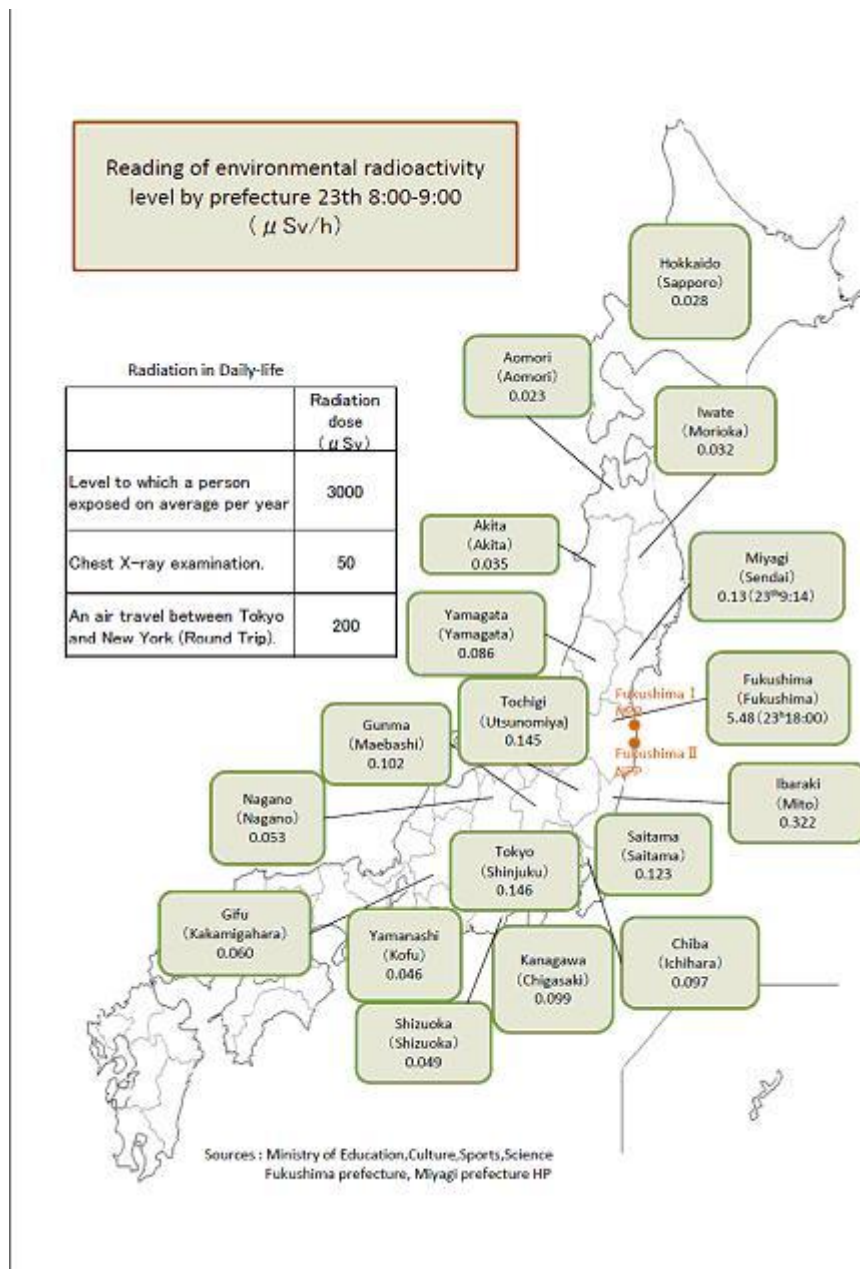
Chlazení nefungovalo, tím pádem brzy došlo k vyvaření chladicí kapaliny z aktivní zóny. Díky tomu bylo poškozeno zirkoniové pokrytí paliva, proběhla jeho oxidace a to vedlo k produkci vodíku. Obnažení paliva vedlo k prvnímu úniku štěpných produktů, jednalo se o malé procento jódu a cesia. Tlak v kontejnmentu začal stoupat v důsledku úniku vodíku a v důsledku zahřátí vody v jímce pro potlačení tlaku v kontejnmentu. Proto se přistoupilo k odpuštění těchto plynů z kontejnmentu do reaktorové budovy, která kontejnment obklopuje. Právě kontejnment zabraňuje úniku velkého množství radioaktivity do prostředí. Vodík se však smíchal se vzduchem a způsobil explozi, která poškodila stěny a strop reaktorové haly, naštěstí kontejnment a tlaková nádoba reaktoru destrukci nepodlehly. Tyto skutečnosti doložily velkou teplotu paliva, která by mohla způsobit jeho roztavení. K tomuto tématu se vyjádřila dne 16.3.2011 předsedkyně Státního úřadu pro jadernou bezpečnost Dana Drábová v online rozhovoru na serveru idnes.cz. „Pokud by skutečně došlo ke kompletnímu roztavení, nemusí to ještě znamenat nic příliš významného pro okolí. Bude hodně záležet na nepoškozenosti kontejnmentu reaktoru či na jeho schopnosti snižovat velký únik. (I netěsný kontejnment má tuto schopnost, záleží však na rozsahu jeho poškození).“ [15] Vyvstala

otázka, jak nyní reaktor chladit. Japonci přistoupili ke způsobu chlazení mořskou vodou. Voda se musí neustále doplňovat, protože dochází k jejímu odpařování [14, 15].

Problém také vznikl u skladovacích bazénů jaderného paliva, které jsou naplněny vodou. Došlo ke ztrátám vody, tím pádem vyhořelé palivo nebylo dostatečně chlazené, mohlo dojít k jeho zahřívání a následnému úniku radioaktivních látek do atmosféry.

Nejzávažnější otázkou v této situaci je samozřejmě množství uniklé radiace. Obrázek 6.1 popisuje množství radiace v jednotlivých japonských prefekturách. Obyvatelům je doporučeno omezit veškeré aktivity venku, pokud je jejich přítomnost venku nevyhnutelná, používat alespoň roušky, aby nedošlo k vdechování zvířeného prachu. Podle testů pitná voda neobsahuje množství jódu překračující povolené limity, i tak je v případě kojenců doporučeno použití balené vody. Co se týče potravin, tak zvýšené množství jódu se vyskytuje především v zelenině a v mléce [24].

Tyto informace se však týkaly japonských obyvatel či návštěvníků Japonska, kteří tam v současnosti pobývají. Na otázku, zda se radiace musí obávat Evropa či konkrétně Česká republika, odpovídá opět Dana Drábová: „Za deset dní až měsíc od úniku u nás můžeme naměřit nějaká stopová množství, zatím to vypadá, že radioaktivní částice (rozhodně ne mrak) k nám doputují od západu, vítr zatím celkem stabilně ve Fukušimě fouká nad Pacifik, což je aspoň malé usnadnění těžké situace v okolí. Tímto směrem je to k nám dál, cca 15 000 km. Měřicí stanice na západním pobřeží USA už nějaké minimální množství radiace zachytily. Jak dlouho bude radiace z Fukušimy u nás měřitelná, se těžko odhaduje, možná den, možná pár dní, možná k nám doputuje víckrát, jak budou nad námi různě cestovat vzdušné masy. V žádném případě nemůže být nebezpečná, pro nikoho. Bude to jen zajímavé pro odborníky“ [15]. Tuto prognózu potvrzuje i aktuální zpráva Státního úřadu pro jadernou bezpečnost zveřejněná na jeho internetových stránkách: „Byla detekována stopová množství radionuklidů jódu ($I\ 131$) a césií ($Cs\ 134$, $Cs\ 137$) řádově v mikro Bq (1Bq je jednotkou aktivity radionuklidů) v kubickém metru vzduchu. Ze systému rychlé výměny informací mezi členskými zeměmi EU víme, že podobné hodnoty byly naměřeny ve Švédsku, Finsku, Polsku a Bulharsku. SÚJB opakovaně ujišťuje občany, že naměřené hodnoty nemají a nebudou mít jakýkoliv význam z hlediska vlivu na zdraví osob. Pro srovnání lze uvést, že v době po Černobylské havárii byly tyto hodnoty měřené na území ČR zhruba desettisíckrát vyšší a ani tyto hodnoty nevedly k přímému ohrožení zdraví. Nadále nedoporučujeme užít stabilní jód, není pro to žádný důvod.“ [24, 15]



Obr.6.1 Dávkový příkon v jednotlivých japonských prefekturách k uvedenému datu a času (převzato z [24])

Nejaktuálnější informace Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (k datu 18.4.2011) tvrdí, že v současnosti je situace kolem jaderné elektrárny poměrně stabilní, nedochází k žádným velkým únikům radiace do ovzduší, neustále je monitorováno okolí elektrárny. Stále platí doporučení o co nejmenším pohybu obyvatel venku, používání roušek [24].

7. DOMÁCÍ POKUSY Z JADERNÉ FYZIKY

„Domácí pokusy z jaderné fyziky“, které zpracovala Ing. Marie Dufková a které v roce 2004 vydalo Odd. komunikace ČEZ, a.s., jsou návrhem, jak oživit hodiny při výkladu jaderné fyziky a následně přiblížit tuto problematiku studentům. Měly by také posloužit k lepší představě, co dané fyzikální termíny vyjadřují a jak vybrané reakce probíhají.

7.1 Čočkový poločas rozpadu

Tento experiment je demonstrací poločasu rozpadu radioaktivních prvků a studenti si tak mohou s jednoduchými pomůckami sami odvodit graf úbytku přeměňujících se radioaktivních jader.

K tomuto pokusu je zapotřebí čočka, asi 200 kusů, jednu stranu studenti obarví, druhou ponechají přírodní. Po zaschnutí barvy ji vloží do větší ploché krabice a zatřepou s ní. V tomto okamžiku získali první poločas rozpadu. Z krabice odstraní všechna zrnka čočky, která leží obarvenou stranou nahoru a jejich počet si zapíší do tabulky. Přiklopí víko a zatřepou znovu – druhý poločas rozpadu. Znovu vyberou obarvenou čočku, údaj si poznačí a tento proces opakují tak dlouho, dokud v krabici ještě nějaká zrnka jsou. Na základě údajů z tabulky sestrojí graf, který se podobá skutečnému grafu poločasu rozpadu [16].



Obr7.1 První poločas rozpadu



Graf 7.1 Čočkový poločas rozpadu

Poločas rozpadu	Počet zrněk
1.	208
2.	101
3.	50
4.	30
5.	10
6.	7
7	5
8.	1
9.	1
10.	1

Tabulka 7.1 Počet poločasů rozpadu a počet zrněk

7.2 Model štěpné řetězové reakce

V jaderném reaktoru se pracuje s atomem uranu 235. Pokud má neutron správnou energii a vlétne do tohoto atomu, jádro se rozštěpí a uvolní se další 2 případně 3 neutrony. Ty vlétnou do jiného jádra atomu uranu 235, opět se uvolní neutrony a reakce se pořád opakuje. Tento proces se označuje jako tzv. řízená řetězová štěpná reakce.

Tuto situaci je možno věrně ilustrovat pomocí hracího domina. Studenti jej rozestaví podle obrázku, šouchnou do první kostičky a na videu lze vidět, co se bude dít. Hovoří se o tzv. experimentální neřízené řetězové reakci.

Pokud by chtěli případ řízené řetězové reakce, stačí, když před jednu z kostiček umístí pravítko a budou jej pevně držet. Pokus zopakují dle předchozího návodu. Část kostiček zůstala stát, podařilo se jim tedy reakci řídit [16]. Videonahrávka řízené i neřízené řetězové reakce je dostupná v přílohách této práce.

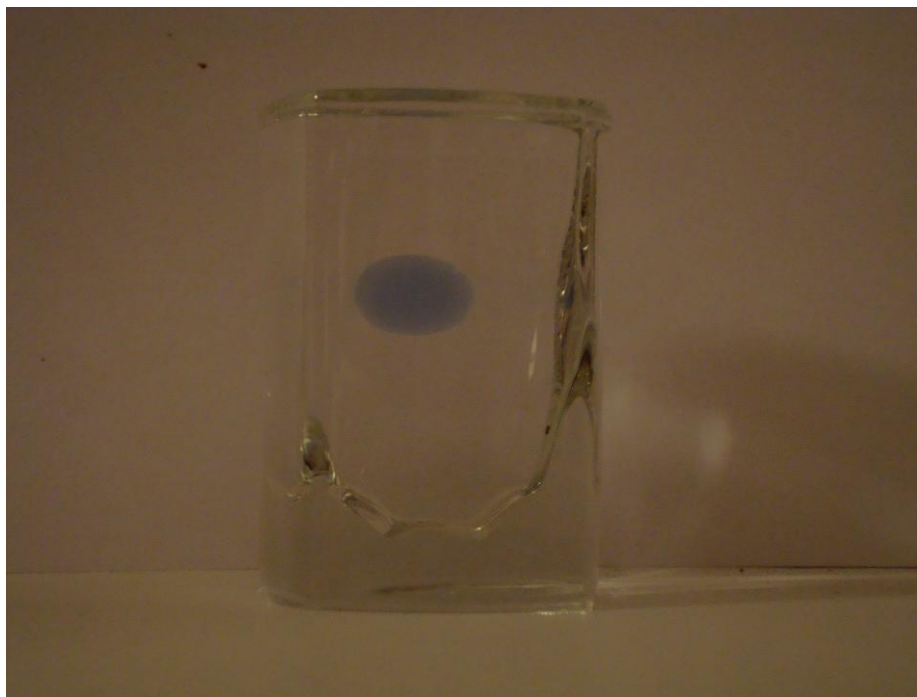


Obr 7.2 Schéma rozestavení domina

7.3 Štěpení atomu ve sklenici vody

„Kapkový model atomu představuje jádro atomu jako kapku kapaliny a vypočítává jeho chování na základě podobných rovnic, které platí pro povrchové napětí kapalin.“ [16] V přírodě se každá soustava snaží dosáhnout stavu s co nejmenší energií, v případě kapky vody je to kulička o co nejhladší a minimální ploše.

K tomuto pokusu budou studenti potřebovat čirý alkohol, např. líh, kterým naplní sklenici asi do poloviny a potom přidají čistou vodu tak, aby byla sklenice plná asi do 2/3. Do čajové lžičky nalijí olej, přiblíží ji těsně nad hladinu směsi a naráz ji vyklopí. V kapalině vznikne dokonale kulatá kulička – experimentální atom. Pokud se vznáší u hladiny, je třeba přilít alkohol, pokud u dna, tak vodu. Další krok spočívá v rozštěpení atomu – pomocí kulatého nože. Nejdříve se kulička jen natahuje, ale po překročení tzv. kritické deformace se rozdělí na 2 dokonale kulaté kapky [16].



Obr 7.3 Kapka ve směsi alkoholu a vody



Obr 7.4 Rozštěpená kapka ve směsi alkoholu a vody

8. ZÁVĚR

Tato práce se zabývá problematikou jaderné fyziky a jaderné energetiky. Měla by sloužit k jejich popularizaci, upřesnění informací, odstranění mýtů, strachu z nebezpečí a k nalezení pozitivního pohledu na obrovský potenciál, který v sobě jaderná energie skýtá.

Tento proces poznání by měl být aplikován už na základních a středních školách, proto je důležité, aby jaderná fyzika nebyla ve výuce opomíjena. Učitel je z tohoto důvodu důležitým prvkem procesu. Právě on má moc nadchnout studenty a ovlivnit jejich názory. Jasným příkladem je Gymnázium ve Valašských Kloboukách, škola, na které probíhal dotazníkový průzkum uvedený v této práci. Úspěšnost byla poměrně vysoká, studenti ve většině preferují jadernou energetiku před ostatními typy elektráren. Každoročně se podnikají exkurze do jaderné elektrárny v Dukovanech, učivo jaderné fyziky je doplněno o rozšiřující informace. K tomuto ovlivnění došlo při studiu na zmíněném gymnáziu také v mém případě. Proto byla volba tématu bakalářské práce jasná.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A OSTATNÍCH ZDROJŮ

[1] *Jaderná energie* [online]. 2008 [cit. 2011-02-22]. Historie objevu jaderné energie. Dostupné z WWW: <<http://history.webgarden.cz/historie-objevu-jaderne-energie>>.)

[2] *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. 2011 [cit. 2011-02-22]. Historie a předchůdci SÚJB. Dostupné z WWW: <http://www.sujb.cz/?c_id=839>.

[3] BARAN, Václav. *Jaderná energetika a další problémy moderní civilizace*. 1. Praha : Academia, 2002. 159 s. ISBN 80-200-1048-3.

[4] *Ústav jaderného výzkumu Řez a.s.* [online]. 2009 [cit. 2011-02-22]. Historie jaderné energie. Dostupné z WWW: <<http://www.ujv.cz/web/ujv/historie-jaderne-energie>>.

[5] DUBŠEK, František. *Jaderná energetika*. 1. Brno : PC-DIR spol. s r.o. - Nakladatelství, Brno, 1994. 209 s. ISBN 80-214-0538-4.

[6] KLOBOUČEK, Jan. *Jaderná energetika*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2005. 71 s. ISBN 80-7083-948-1.

[7] KLIK, František; DALIBA, Jaroslav. *Jaderná energetika*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2002. 189 s. ISBN 80-01-02550-0.

[8] *Ústav jaderného výzkumu Řež a.s.* [online]. 2009 [cit. 2011-02-23]. Miniencyklopedie jaderné energetiky. Dostupné z WWW: <<http://www.ujv.cz/web/ujv//miniencyklopedie-jaderne-energetiky>>.

[9] *Pro Atom web* [online]. 2009 [cit. 2011-02-23]. Jaderné elektrárny. Dostupné z WWW: <<http://proatom.luksoft.cz/jaderneelektrarny/index.php?akce=reaktor&idtypbloku=7>>.

[10] VANĚK, Václav. *Bez jádra to nepůjde* [online]. [s.l.] : ČEZ, a.s, 2008 [cit. 2011-04-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/vyzkum-a-vzdelavani/pro-studenty/materialy-ke-studiu/tiskoviny/20.html>>.

[11] LEPIL, Oldřich; BEDNAŘÍK, Milan; HÝBLOVÁ, Radmila. *Fyzika pro střední školy*. Praha : Prometheus, spol. s r. o., 2005. 311 s. ISBN 80-7196-185-X.

[12] JANEČEK, Ivan; KALUS, René; HRIVŇÁK, Daniel. *Kvantová, atomová a jaderná fyzika : Multimediální učební text Katedry fyziky Přírodovědecké fakulty Ostravské Univerzity* [online]. 2004-2006 [cit. 2011-03-15]. Dostupné z WWW: <<http://artemis.osu.cz/mmfiz/>>.

[13] *Česká tisková kancelář* [online]. 2011 [cit. 2011-03-25]. Všeobecné zpravodajství. Dostupné z WWW: <http://www.ctk.cz/sluzby/slovni_zpravodajstvi/vseobecne/index_view.php?id=607975>.

[14] *Česká nukleární společnost* [online]. 2011 [cit. 2011-03-25]. American Nuclear Society Memorandum. Dostupné z WWW: <<http://www.csvts.cz/cns/news11/110312a.htm>>.

[15] *Idnes.cz* [online]. c1999-2011 [cit. 2011-04-26]. Šéfka Státního úřadu pro jadernou bezpečnost Dana Drábová. Dostupné z WWW: <<http://zpravy.idnes.cz/odpovedi.asp?t=DRABOVA3>>.

[16] DUFKOVÁ, Marie. *Domácí pokusy z jaderné fyziky* [online]. [s.l.] : Odd. komunikace Čez, a.s., 2004 [cit. 2011-04-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/vyzkum-a-vzdelavani/pro-studenty/materialy-ke-studiu/tiskoviny/9.html>>.

[17] *Jaderná energie* [online]. 2008 [cit. 2011-04-26]. Regulační tyče. Dostupné z WWW: <<http://history.webgarden.cz/regulacni-tyce>>.

[18] *Jaderná energie* [online]. 2008 [cit. 2011-04-26]. Havarijní tyče. Dostupné z WWW: <<http://history.webgarden.cz/havarijni-tyce>>.

[19] *Pro Atom web* [online]. 2009 [cit. 2011-04-26]. Jaderné elektrárny. Dostupné z WWW: <<http://proatom.luksoft.cz/jaderneelektrarny/index.php?akce=reaktor&idtypbloku=15>>.

[20] *Pro Atom web* [online]. 2009 [cit. 2011-04-26]. Jaderné elektrárny. Dostupné z WWW: <<http://proatom.luksoft.cz/jaderneelektrarny/index.php?akce=reaktor&idtypbloku=19>>.

[21] *Pro Atom web* [online]. 2009 [cit. 2011-04-26]. Jaderné elektrárny. Dostupné z WWW: <<http://proatom.luksoft.cz/jaderneelektrarny/index.php?akce=reaktor&idtypbloku=9>>.

[22] *Pro Atom web* [online]. 2009 [cit. 2011-04-26]. Jaderné elektrárny. Dostupné z WWW: <<http://proatom.luksoft.cz/jaderneelektrarny/index.php?akce=reaktor&idtypbloku=11>>.

[23] *Pro Atom web* [online]. 2009 [cit. 2011-04-26]. Jaderné elektrárny. Dostupné z WWW: <<http://proatom.luksoft.cz/jaderneelektrarny/index.php?akce=o&x=jaderneelektrarny/40/1&p opis=Dukovany>>.

[24] *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. 2011 [cit. 2011-04-26]. Aktuálně - Přehled dosavadního vývoje jaderné havárie v Japonsku:. Dostupné z WWW: <http://www.sujb.cz/?c_id=1079>.

[25] *Testy z fyziky* [online]. 2011 [cit. 2011-04-26]. Jaderná fyzika. Dostupné z WWW: <<http://veronika.sovova.sweb.cz/testy/fyzika/JF.htm>>.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1.....	46
Příloha 2.....	přiložené CD

Příloha 1:

Průzkum znalostí v oblasti „Atomová a jaderná fyzika“- jaderná energetika

1) Kterou z uvedených elektráren preferujete? Uveďte důvod:

- a) Tepelná elektrárna
- b) Vodní elektrárna
- c) Jaderná elektrárna
- d) Solární elektrárna

2) Co určuje nukleonové číslo atomu?

- a) Počet protonů v jádře
- b) Počet nukleonů v obalu
- c) Počet protonů a neutronů v jádře
- d) Počet vazeb, které je atom schopen vytvořit

3) Udejte z kolika a z jakých částic se skládají atomy nuklidu ${}^4_2\text{He}$

- a) 2 protony, 2 neutrony, 2 elektrony
- b) 2 protony, 1 neutron, 1 elektron
- c) 2 protony, 2 elektrony
- d) 1 proton, 1 neutron, 2 elektrony

4) Radioaktivita je:

- a) Vyzařování viditelného záření nestabilními jádry atomů
- b) Vyzařování jaderného záření stabilními jádry atomů
- c) Vyzařování jaderného záření nestabilními obaly atomů
- d) Samovolná přeměna jader nestabilních nuklidů na jiná jádra při níž vzniká radioaktivní záření

5) Jaderný reaktor

- a) Vyrábí elektrickou energii
- b) Využívá radioaktivní záření k pohonu turbíny
- c) Slouží k získávání a rozvodu tepla
- d) Je zařízení, ve kterém probíhá řízená jaderná řetězová reakce

6) Jaderná reakce je reakce, při které se

- a) molekuly štěpí na ionty
- b) ionty slučují v molekuly
- c) mění atomové jádro
- d) mění atomový obal

7) Izotopy jsou:

- a) Atomy, které mají **různá** nukleonová a **různá** protonová čísla
- b) Atomy, které mají **různá** nukleonová a **stejná** protonová čísla
- c) Atomy, které mají **stejná** nukleonová a **stejná** protonová čísla
- d) Atomy, které mají **stejná** nukleonová a **různá** protonová čísla

8) Poločas rozpadu je:

- a) Doba, za kterou se rozpadnou všechna jádra atomů látky
- b) Polovina času, za který se rozpadnou jádra všech atomů látky
- c) Doba, za kterou se rozpadne polovina jader v libovolném množství látky
- d) Doba, za kterou je absorbována polovina množství ionizujícího záření

9) Který evropský stát vyniká v produkci energie z jádra?

- a) Belgie
- b) Česká republika
- c) Francie
- d) Švédsko

10) Jaké jsou podle Vás výhody a nevýhody jaderné energetiky?