

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Bezpečnost jaderných elektráren

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej NIKL**
Osobní číslo: **E11B0305P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Technická ekologie**
Název tématu: **Bezpečnost jaderných elektráren**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte druhy jaderných reaktorů a popište jejich principy.
2. Uveďte technologie používané pro bezpečnost JE.
3. Zhodnoťte a porovnejte tyto technologie.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. www.cez.cz
2. Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Marek Hořan
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013
Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na shrnutí technologií používaných pro bezpečnost jaderných elektráren, jako jsou aktivní a pasivní prvky ochrany, fyzické bariéry a princip ochrany do hloubky. Dále jsou v práci uvedeny nejpoužívanější typy jaderných reaktorů ve světě, jejich popis a zhodnocení jejich budoucího vývoje. Pozornost je věnována také organizacím dohlížejícím na dodržování jaderné bezpečnosti a mezinárodní stupnici INES, která slouží k vyhodnocení případné nehody či havárie. Závěrem tato práce pojednává o jaderných haváriích a jejich vlivu na vývoj jaderné bezpečnosti.

Klíčová slova

Jaderný reaktor, jaderná bezpečnost, aktivní zóna, primární okruh, jaderná energie, jaderná havárie, jaderná elektrárna, generace reaktorů, typy reaktorů, ochrana do hloubky

Abstract

This bachelor thesis is focused on summary of technologies used for safety of nuclear power plants, which means active and passive nuclear safety, physical barriers and principle of defence in depth. Furthermore in the thesis there are mentioned the most used types of nuclear reactors in the world, their description and evaluation of their future development. The attention is also given to observance of nuclear safety and the international scale INES, which serves to prospective accident or disaster. In conclusion deals this thesis about nuclear disasters and their influence of nuclear safety.

Key words

Nuclear reactor, nuclear safety, active zone, primary circuit, nuclear energy, nuclear accident, nuclear power plant, generation of reactors, types of reactors, defence in depth

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 6.6.2014

Ondřej Nikl

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Marku Hořanovi za ochotné převzetí vedení mé práce, cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále také děkuji své rodině a především přítelkyni za trpělivost a psychickou podporu při psaní této bakalářské práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1. ÚVOD	11
2. JADERNÁ ELEKTRÁRNA	13
2.1. REAKTOR	13
2.1.1. Pracovní režimy reaktoru	14
2.2. PRIMÁRNÍ OKRUH	14
2.3. SEKUNDÁRNÍ OKRUH	15
2.4. TERCÍÁRNÍ (CHLADÍČÍ) OKRUH	15
3. TYPY JADERNÝCH REAKTORŮ	16
3.1. DĚLENÍ REAKTORŮ	16
3.1.1. Dělení reaktorů podle energie neutronů	16
3.1.2. Dělení reaktorů podle použitých materiálů	16
3.1.3. Dělení podle konstrukčního uspořádání	17
3.2.4. Dělení podle účelu	18
3.2. TYPY REAKTORŮ	18
3.2.1. Tlakovodní reaktor PWR.....	19
3.2.2. Varný reaktor BWR.....	20
3.2.3. Těžkovodní reaktor PHWR (CANDU)	21
3.2.4. Plynem chlazený reaktor GCR (Magnox, AGR).....	22
3.2.5. Reaktor typu RBMK	24
3.2.6. Vysokoteplotní reaktor HTGR.....	25
3.2.7. Rychlý množivý reaktor FBR.....	27
3.3. BUDOUCNOST JADERNÝCH REAKTORŮ	29
3.3.1. Generace III (III+).....	30
3.3.2. Generace IV	31
4. BEZPEČNOSTNÍ PRVKY JADERNÝCH ELEKTRÁREN	34
4.1. OCHRANA DO HLOUBKY (DEFENCE IN DEPTH)	35
4.2. BEZPEČNOST JADERNÉHO REAKTORU	37
4.3. BEZPEČNOSTNÍ (FYZICKÉ) BARIÉRY	39
4.4. INHERENTNÍ BEZPEČNOST	41
4.5. NOUZOVÉ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE	42
5. ZHODNOCENÍ BEZPEČNOSTI JADERNÝCH ELEKTRÁREN	43
6. ZÁVĚR	46
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	48

Seznam symbolů a zkratek

SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
CP-1	Chicago Pile-1
EBR-1	Experimental breeder reactor
MOX	Mixed oxide fuel
PWR	Pressurized light-water moderated and cooled reactor
VVER	Vodo-vodjanoj energetičeskij reaktor
BWR	Boiling water reactor
PHWR	Pressurized heavy water reactor
CANDU	Canada deuterium uranium
GCR	Gas cooled graphite moderated reactor
AGR	Advanced gas cooled, graphite moderated reactor
Magnox	Magnesium oxide
RBMK	Reaktor bolšoj moščnosti kanalnyj
LWGR	Light-water cooled, graphite moderated reactor
HTGR	High temperature gas cooled reactor
FBR	Fast breeder reactor
EPR	European pressurized reactor
APWR	Advanced pressurized water reactor
MIR.1200	Modernised international reactor
ACR1000	Advanced CANDU reactor
ABWR	Advanced boiling water reactor
GIF	Generation IV international forum
GFR	Gas-cooled fast reactor
LFR	Lead-cooled fast reactor
MSR	Molten salt reactor
SFR	Sodium-cooled fast reactor
SCWR	Super critical water reactor
VHTR	Very high temperature reactor
LOCA	Loss of coolant accident
ECCS	Emergency core cooling system
IAEA	International atomic energy agency
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii

INES	International nuclear event scale
EAEC	European atomic energy community
IEA	International energy agency

1. Úvod

„Jaderné elektrárny s sebou jistě nosí riziko, ale riziko ještě nemusí být nebezpečné, když tomu riziku rozumíme a umíme s ním zacházet, v takovém případě jaderné elektrárny nepředstavují větší riziko než spousta jiných věcí, se kterými se v životě setkáváme“

Dana Drábová, předsedkyně SÚJB

Cesta k získávání elektřiny z jádra začala objevením radioaktivity¹ na přelomu 19. a 20. století a to v roce 1895 kdy německý fyzik Wilhelm Conrad Roentgen objevil tzv. paprsky X, tedy rentgenové záření. O rok později objevil pařížský profesor Henri Becquerel při svých pokusech určitou vlastnost některých chemických prvků, kterou později popsala vědkyně polského původu Marie Curie-Sklodovská se svým manželem Pierrem Curiem a tuto jejich vlastnost nazvala radioaktivita.

Kontrolovaná řetězová štěpná reakce proběhla poprvé 2. prosince 1942 pod chicagským univerzitním stadionem, kde původem italský fyzik Enrico Fermi postavil první jaderný reaktor na světě tzv. Chicagský Milíř 1 (Chicago Pile-1 nebo též CP-1). Celý pokus proběhl přesně podle předpokladů a reaktor při něm dosáhl výkonu 0,5 W. K získání elektřiny z jádra došlo poprvé v roce 1951 díky experimentálnímu reaktoru EBR-1 (Experimental Breeder Reactor) v Idahu v USA, reaktor měl výkon kolem 100 W. První jadernou elektrárnou připojenou k rozvodné síti byla elektrárna Obninsk v bývalém Sovětském svazu, která zahájila svůj provoz 27. června 1954 a jejíž výkon byl 5 MW.

V jaderné energii se skrývá obrovský potenciál, při spalování fosilních paliv dostáváme pouze 0,000 000 01 % klidové energie hmoty, avšak u jaderného štěpení to je až 0,1 %, z toho tedy vyplývá, že při štěpení můžeme z hmoty získat desetmilionkrát více energie než při spalování. Porovnat zdroje energie můžeme také podle jejich výhřevnosti (u jaderných paliv hovoříme o tzv. vyhoření), která udává, kolik tepelné energie se uvolní úplným spálením jedné jednotky. Jaderným štěpením paliva používaného v tlakovodních reaktorech získáváme energii cca $3,9 \cdot 10^6$ MJ/kg, což je o mnoho více než výhřevnost u fosilních paliv jako je černé (21,3 MJ/kg) či hnědé (11,4 MJ/kg) uhlí, spalovaných v tepelných elektrárnách. To znamená, že

¹ Samovolná přeměna atomových jader na jádra jiná

jedna palivová peletka² oxidu uraničitého (UO_2) vážící přibližně 4,8 g dokáže nahradit 880 kg černého uhlí. Výhoda jaderných elektráren spočívá také v tom, na rozdíl od tepelných elektráren nezatěžují životní prostředí vypouštěním škodlivých látek do ovzduší.

Z těchto výše zmíněných hledisek se jaderná energie jeví jako velmi výhodná, ale také je obestřena řadou obav a rizik, jednou z nevýhod je nakládání s vyhořelým palivem, kterého je sice relativně malé množství, ale je radioaktivní. Kvůli obrovské energii v jádru a radioaktivitě je zde také riziko havárií, hrozba teroristického zneužití jaderných materiálů a s tím spojené obavy veřejnosti. Proto je kladen důraz na vysokou úroveň bezpečnosti jaderných elektráren a stále se pracuje na jejím zlepšování.

Bezpečností jaderných elektráren se zabývá i tato bakalářská práce. V první části uvádím rozdělení a principy v dnešní době nejpoužívanějších jaderných reaktorů, dále se také zabírám předpokládaným budoucím vývojem reaktorů. V další části práce jsem se zaměřil na shrnutí a popis technologií využívaných pro zajištění jaderné bezpečnosti. Třetí část je věnována organizacím dohlížejícím na dodržování jaderné bezpečnosti a popisu klasifikace jaderných událostí. Závěrem jsem se zaměřil na jaderné havárie a poučením se z nich.

² Prášek oxidu uraničitého (UO_2) slisovaný při 1400 °C na keramický váleček

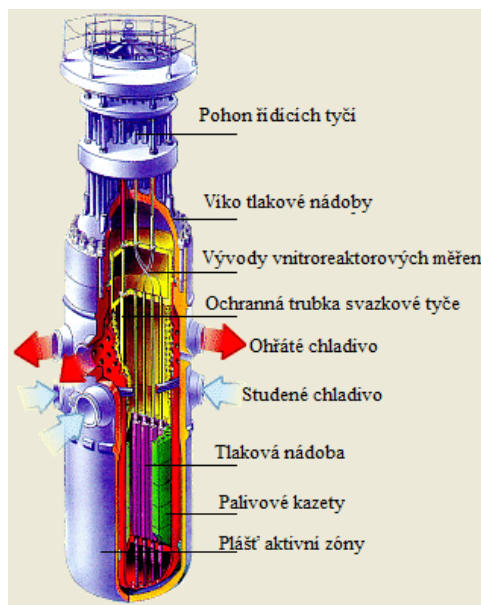
2. Jaderná elektrárna

Jaderná elektrárna funguje vlastně na stejném principu jako elektrárna tepelná, liší se pouze ve zdroji tepelné energie, která se v jaderné elektrárně nezískává spalováním fosilních paliv jako v tepelné elektrárně, ale jaderným štěpením.

2.1. Reaktor

Řízená štěpná reakce probíhá v jaderném reaktoru, jenž je srdcem celé elektrárny. Štěpením atomových jader paliva se uvolňuje tepelná energie, která je dále odváděna k energetickému využití. Samotný reaktor je tvořen ocelovou či železobetonovou reaktorovou nádobou nebo tlakovými kanály. Musí být naprojektován tak, aby byl schopen odolat vysokým teplotám, tlakům a neutronovým tokům.

Prostor uvnitř reaktorové nádoby, v němž dochází ke štěpné reakci a kde se nachází jaderné palivo a moderátor, se nazývá aktivní zóna.



Obr. 1 Obecný popis jaderného reaktoru [14]

2.1.1. Pracovní režimy reaktoru

Jaderný reaktor se může nacházet ve třech různých stavech:

1) Podkritický stav

Hustota látky absorbující neutrony je tak vysoká, že neutrony vznikající při štěpné reakci jsou plně pohlcovány a nemohou vyvolávat štěpení dalších jader. Tím dojde k zániku štěpné reakce. Tohoto stavu se v praxi využívá, chceme-li snížit výkon reaktoru, za pomoci regulačních či havarijních tyčí s obsahem tzv. absorbátoru (látky pohlcující neutrony).

2) Kritický stav

Při tomto stavu je hustota absorbátoru taková, že ze dvou až tří neutronů vzniklých při štěpení paliva vždy jeden vyvolá další štěpnou reakci. Řetězová reakce se tedy nerozrůstá, ani nezaniká, ale stále pokračuje. Tomuto stavu odpovídá běžný provoz elektrárny při stálém výkonu.

3) Nadkritický stav

Je-li hustota absorbátoru tak malá, že roste počet neutronů štěpících jádra v reaktoru, rozrůstá se i řetězová reakce. Takový stav je nutný pro zvýšení výkonu reaktoru. [1]

2.2. Primární okruh

Teplo vznikající v jaderném reaktoru cirkuluje pomocí chladícího média (chladiwa) v uzavřeném okruhu, který se nazývá primární okruh. Chladiwo se vede do parogenerátoru, kde předá tepelnou energii vodě sekundárního okruhu, která se ohřívá a mění v páru. Primární okruh a parogenerátor tvoří tzv. jadernou část elektrárny. Celý tento prostor je uzavřen v ochranné obálce tzv. kontejnment.

2.3. Sekundární okruh

Pára vznikající v parogenerátoru je sekundárním okruhem přiváděna na turbínu, kterou roztáčí. Poté je mechanická energie z turbíny v generátoru přeměněna na elektrickou. Sekundární okruh a další části již zastupují nejadernou část elektrárny.

Některé typy jaderných elektráren jsou pouze jednookruhové, k varu vody a vzniku páry u nich dochází přímo v aktivní zóně a poté co je pára vysušena (zbavena vodních kapiček), je odváděna rovnou na turbínu. Jejich výhodou je v jednodušší konstrukci a vyšší tepelné účinnosti, avšak nevýhodou je, že pára vedená na turbínu je radioaktivní.

2.4. Terciární (chladicí) okruh

Na výstupu turbíny je třeba páru ochladit a opět přeměnit na vodu (zkondenzovat), k tomu v elektrárně slouží kondenzátor, ve kterém proudí chladicí voda terciárního (chladicího) okruhu a odebírá teplo páře, která je poté, již zkapalněná, přiváděna zpět do parogenerátoru. Cirkulující voda může být chlazená přímo z řeky či moře nebo v chladicích věžích, kde se ochlazuje za pomoci vzduchu proudícího přes rozstříkované kapky vody. Z věží stoupá do ovzduší pouze čistá vodní pára.

3. Typy jaderných reaktorů

3.1. Dělení reaktorů

Jaderné reaktory můžeme dělit mnoha způsoby, např. podle použitého chladiva, moderátoru nebo paliva, dále také podle konstrukčního uspořádání reaktoru. Reaktory můžeme dělit také podle způsobu využití. Také velmi důležitým kritériem pro určení typu reaktoru je neutronové spektrum.

3.1.1. Dělení reaktorů podle energie neutronů

Tepelné reaktory

Převážná část štěpení se uskutečňuje neutrony zpomalenými na úroveň rychlosti molekul okolí, tzv. tepelné neutrony, jejichž energie je cca $0,002 - 0,5 \text{ eV}^3$. Pro zpomalování neutronů v reaktoru se používá moderátor. Tyto typy reaktorů jsou v současné době nejrozšířenější.

Rychlé reaktory

Převážná část štěpení se uskutečňuje neutrony o vysoké energii (cca $500 \text{ keV} - 10 \text{ MeV}$). V tomto typu reaktoru se moderátor nepoužívá. I když se v současnosti rychlých reaktorů příliš nevyužívá, tak je jím v dlouhodobé perspektivě přisuzován velký význam.

Pomalými (tepelnými) neutrony štěpitelný uran U^{235} představuje pouze 0,7 % ze všech izotopů přírodního uranu. Rychlé reaktory umožňují využívat štěpitelné plutonium Pu^{239} vyrobené z uranu U^{238} (tvoří asi 99,7 % přírodního uranu) nebo uranu U^{233} , který vzniká stejným způsobem z thoria Th^{232} . Při použití tepelných reaktorů vystačí celosvětové zásoby uranu cca na sto let, avšak při použití rychlých reaktorů nám mohou zásoby paliva pokrývat až období v řádu tisíce let.

3.1.2. Dělení reaktorů podle použitých materiálů

Rozlišovat reaktory můžeme také podle použitého materiálu k odvodu tepla z reaktoru (chladivo), podle použitého moderátoru nebo podle typu štěpného materiálu (paliva).

³ 1eV je energie, kterou získá částice s elementárním nábojem při průchodu potenciálovým rozdílem 1V

Chladivo

Jako chladivo využíváme materiálů, jako jsou lehká voda (H_2O), těžká voda (D_2O), oxid uhličitý (CO_2), helium (He). V případě rychlých reaktorů se používají jako chladivo tekuté kovy, nejčastěji sodík (Na).

Moderátor

Moderátor se používá pouze u reaktorů tepelného typu. Nejčastěji užívané materiály jsou lehká voda (H_2O), těžká voda (D_2O), grafit (C).

Palivo

Jaderné reaktory můžeme podle paliva dělit jednak z fyzikálního pohledu podle prvků např. uran (U), plutonium (Pu) nebo thorium (Th), ale také podle dalších hledisek. Jedním z hledisek může být použití přírodního nebo obohaceného paliva (zvyšování podílu izotopu uranu U^{235}), které může být nízké (do 5 %), střední (5-20 %) nebo vysoké (nad 20 %). Dalším hlediskem je skupenství paliva, které může být pevné (mnohem častěji využívané) či kapalné. Posledním kritériem je chemická forma paliva, např. kovy, oxidy (převážná většina používaných paliv, nejčastěji oxid uraničitý (UO_2), MOX (směs oxidů uranu a plutonia), různé slitiny aj.

3.1.3. Dělení podle konstrukčního uspořádání

Dalším kritériem dělení reaktorů také může být konstrukční řešení reaktoru, např. uspořádání primárního okruhu.

Reaktor s tlakovou nádobou

Je vhodný tam, kde je objem moderátoru přibližně stejně velký jako objem používaného paliva. Reaktorová nádoba je vyrobena ze speciální nerezavějící oceli, váží několik set tun a dosahuje výšky až 23 metrů a průměru okolo 7 metrů.

Reaktor se železobetonovou nádobou

Používá se u reaktorů, kde jako moderátor slouží grafit. Z důvodu nutnosti velkých rozměrů reaktorových nádob pro vyšší výkony se reaktorové nádoby budují přímo na staveništi. Vnitřní rozměry takovýchto železobetonových nádob dosahují desítek metrů a jsou velmi odolné proti tlaku.

Reaktor s tlakovými trubkami

Používá se tam, kde je objem moderátoru mnohem větší než objem paliva. Bloky moderátoru obklopují trubky, ve kterých je umístěno palivo. Celý systém je uzavřen v betonové nádobě.

3.2.4. Dělení podle účelu

V neposlední řadě můžeme reaktory dělit také podle způsobu využití. A to na výzkumné (využívané pro jaderný i nejaderný výzkum), energetické (vznikající teplo je využíváno pro výrobu elektrické energie), jaderné pohony (slouží pro pohon velkých dopravních prostředků, např. ponorka), experimentální reaktory aj.

Název reaktoru a zkratka				Palivo				Moderátor		Chladivo			
				Uran (U)			Pluto- nium (Pu)	Grafit (C)	Voda		Voda	Plyn	Sodík (Na)
				Příro- dní	Lehce oboh- acený (do 5 %)	Vysoce oboh- acený (nad 20 %)			Těžká voda (D ₂ O)	Lehká voda (H ₂ O)	Těžká voda (D ₂ O)	Lehká voda (D ₂ O)	
REAKTORY	Tepelné	Lehkovodní	Tlakovodní reaktor	PWR (VVER)									
			Varný reaktor	BWR									
		Chlazené plynem	Plynem chlazený reaktor	GCR									
			Pokročilý plynem chlazený reaktor	AGR									
			Vysokoteplotní reaktor	HTGR									
		Těžkovodní	Těžkovodní reaktor	PHWR (CANDU)									
	Ostatní	Reaktor typu	RBMK (LWGR)										
	Rychlé	Rychlý množivý reaktor	FBR					Nemá					

Obr. 2 Přehled nepoužívanějších typů reaktorů

3.2. Typy reaktorů

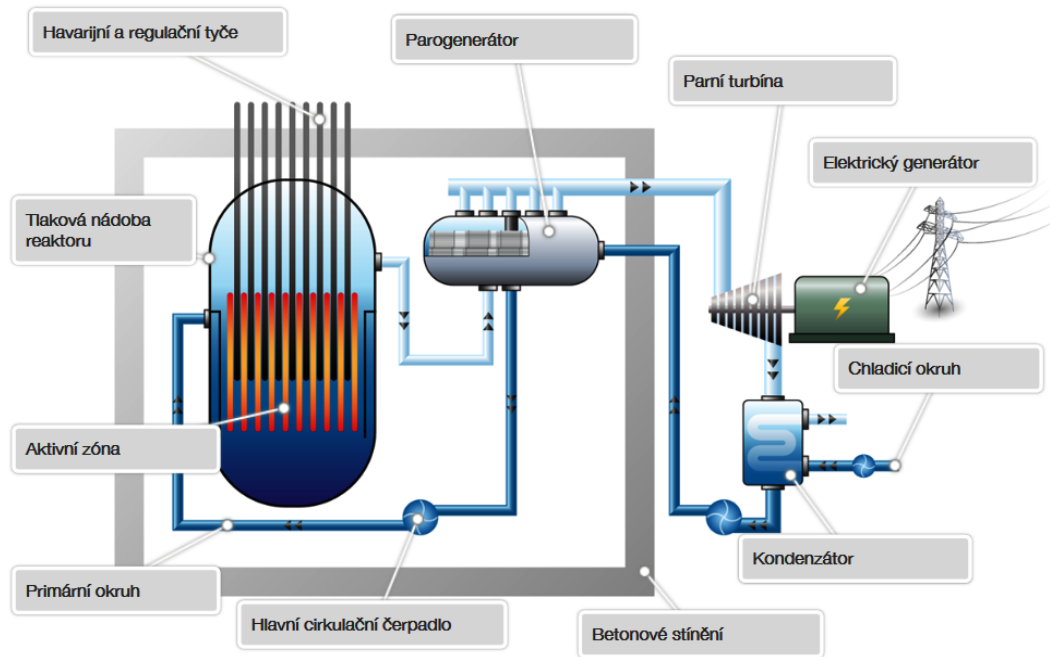
Počátkem roku 2013 bylo na světě provozováno cca 435 reaktorů s celkovým výkonem více než 374 GW, 67 reaktorů bylo ve výstavbě a dalších 164 je plánováno. Většina z již provozovaných reaktorů na světě pochází ze 70. let a jsou to tzv. reaktory druhé generace.

Mezi nepoužívanější jaderné reaktory patří:

3.2.1. Tlakovodní reaktor PWR

Ve světě je dnes nejrozšířenějším typem tlakovodní reaktor PWR (Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor) nebo jeho ruská verze VVER (Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor). V současné době je v provozu asi 273 reaktorů tohoto typu, což je asi 62 % všech reaktorů na světě. Tento reaktor byl původně vyvinut v USA, poté tuto koncepci převzalo i Rusko. Kvůli vysoké bezpečnosti jsou tyto reaktory používány také k pohonu jaderných ponorek nebo letadlových lodí. Tlaková nádoba reaktoru je vyrobena z oceli, která musí odolávat vysokým tlakům. Výměna palivových kazet probíhá jednou za 1-1,5 roku při odstaveném reaktoru a nahradí se asi 1/4 až 1/3 vyhořelých palivových kazet. Lehká voda (H_2O) proudí v primárním okruhu pod velkým tlakem, v parogenerátoru ohřívá vodu v sekundárním okruhu, ta se mění na páru a roztáčí turbínu. Elektrárna je tedy dvouokruhová.

<u>Jaderné palivo:</u>	uran obohacený na 3,5-5 % ve formě keramických peletek oxidu uraničitého (UO_2) vložených do palivových proutků, které jsou dále uspořádány do palivových souborů (kazet) dlouhých 3,5 metru
<u>Rozměry aktivní zóny:</u>	průměr i výška od 2,5 do 4 m
<u>Chladivo:</u>	lehká voda (H_2O)
<u>Moderátor:</u>	lehká voda (H_2O)
<u>Tlak v primárním okruhu:</u>	tlak vody 12-17 MPa
<u>Teplota na výstupu z reaktoru:</u>	teplota vody 300 °C



Obr. 3 Schéma reaktoru typu PWR [2]

3.2.2. Varný reaktor BWR

Druhý nejrozšířenější typ je varný reaktor BWR (Boiling Water Reactor). Na celém světě je v provozu 84 těchto typů reaktorů, což představuje 19 % z celkového počtu reaktorů. Aktivní zóna reaktoru je velmi podobná aktivní zóně tlakovodního reaktoru PWR. Podobné je též používané palivo. Palivo se mění při odstavení reaktoru jednou za rok, kdy se vymění asi 1/4 až 1/3 vyhořelých palivových tyčí. Reaktor je ocelová tlaková nádoba o výšce cca deseti metrů. Přímou v tlakové nádobě se voda ohřívá až k varu a v horní části reaktoru se hromadí pára, která se nejprve v separátoru zbaví vlhkosti a poté se přivede přímo k turbíně. Elektrárna je jednookruhová. Oproti reaktoru PWR je nevýhodou, že pára pohánějící turbínu je radioaktivní.

Jaderné palivo:

uran obohacený na 2,1-2,6 % ve formě keramických peletek oxidu uraničitého (UO_2) vložených do palivových proutků, které jsou dále uspořádány do palivových souborů (kazet) dlouhých 4 metry

Rozměry aktivní zóny:

výška 3,5 m a průměr 4,5 m (záleží na konkrétním typu)

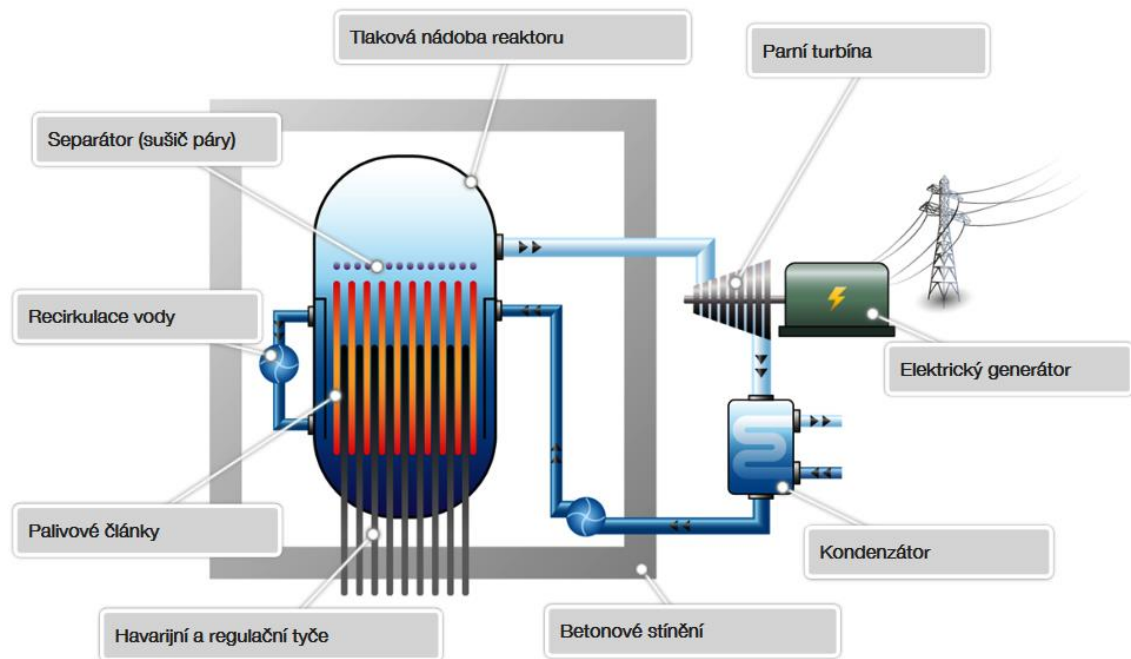
Chladivo:

lehká voda (H_2O)

Moderátor: lehká voda (H_2O)

Tlak v primárním okruhu: tlak vody 7 MPa

Teplota na výstupu z reaktoru: teplota vody 280 °C

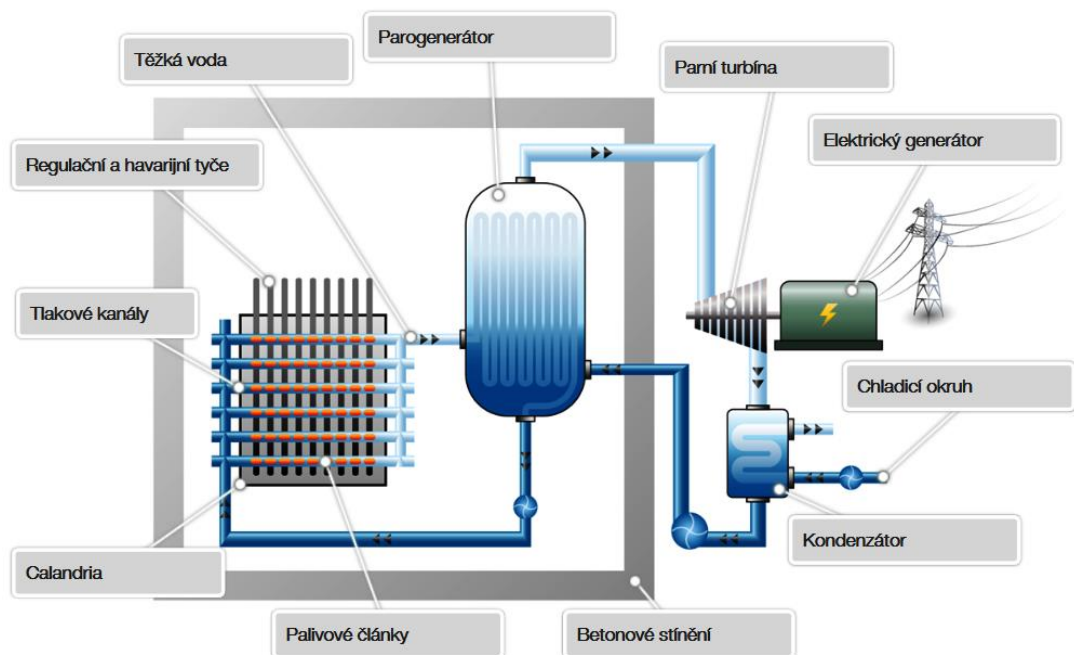


Obr. 4 Schéma reaktoru typu BWR [2]

3.2.3. Těžkovodní reaktor PHWR (CANDU)

Na světě je v provozu 48 těžkovodních reaktorů PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor), z toho 31 je jich typu CANDU (CANada Deuterium Uranium), jenž byl vyvinut v Kanadě a poté se rozšířil i do dalších částí světa jako je např. Indie, Argentina, Korea, Rumunsko nebo Čína. Aktivní zóna je v ocelové nádobě tvaru ležícího válce (tzv. caladria), ve kterém jsou vodorovné průduchy pro tlakové trubky, ve kterých je umístěno palivo a protéká jimi chladivo. Těžká voda (D_2O) má výborné moderační vlastnosti a její velkou výhodou oproti běžné vodě je že téměř nepohlcuje neutrony a proto je možné využít přírodní neobohacený uran. Moderátor musí být chlazen, protože jeho moderační schopnost se snižuje se zvyšující se teplotou. Výměna paliva probíhá za běhu reaktoru. Těžká voda z prvního chladicího okruhu odvádí teplo do parogenerátoru, kde se na sekundární straně trubek generuje pára, která pohání turbínu. Elektrárny využívající reaktory CANDU jsou dvouokruhové.

<u>Jaderné palivo:</u>	přírodní uran ve formě válečků oxidu uraničitého (UO_2) vložených do krátkých trubek, které jsou dále uspořádány do malých palivových souborů (kazet) s průměrem 10 cm a délkou 0,5 m
<u>Rozměry aktivní zóny:</u>	výška 5,9 m a průměr 7 m
<u>Chladivo:</u>	těžká voda (D_2O)
<u>Moderátor:</u>	těžká voda (D_2O)
<u>Tlak v primárním okruhu:</u>	tlak těžké vody 9,3 MPa
<u>Teplota na výstupu z reaktoru:</u>	teplota těžké vody 300 °C



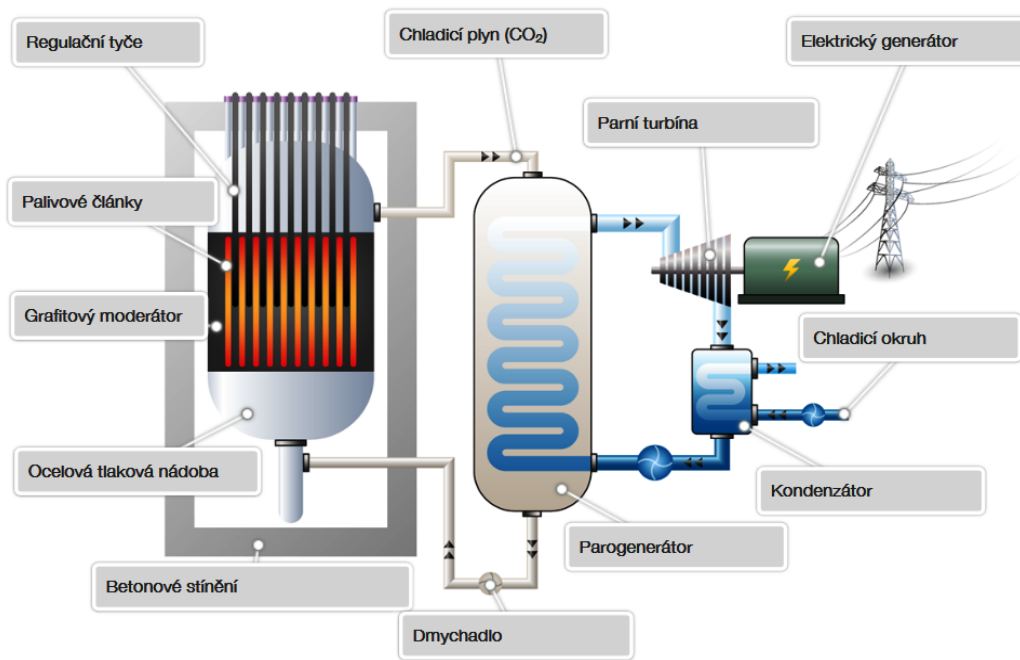
Obr. 5 Schéma reaktoru typu PHWR [2]

3.2.4. Plynem chlazený reaktor GCR (Magnox, AGR)

Plynem chlazený reaktor GCR (Gas Cooled graphite moderated Reactor) se dnes používá výhradně ve Velké Británii a Japonsku. Starší typ tohoto reaktoru Magnox (Magnesium oxide) pomalu dosluhuje (v provozu již pouze jeden blok v Severním Walesu) a nové bloky se již nestaví. Vylepšený typ Pokročilý plynem chlazený reaktor AGR (Advanced

Gas cooled, Graphite moderated Reactor), vyvinula stejně jako typ Magnox Velká Británie. Reaktorů typu AGR je v provozu 14. Aktivní zóna se skládá z grafitových bloků a je umístěna v kulové ocelové nádobě (v novějších typech se používá spíše železobeton), která je obklopena betonovým stíněním. Zde je několik tisíc kanálků a v každém z nich je několik palivových tyčí. Konstrukce reaktoru umožňuje výměnu paliva za provozu. Oxid uhličitý (CO_2) se po ohřátí vede do parogenerátoru, kde předá svoje teplo vodě sekundárního okruhu, která se po přeměně na páru odvádí na turbínu. Dmyhadla ženou ochlazený plyn zpět do reaktoru. Elektrárna je tedy dvouokruhová.

<u>Jaderné palivo:</u>	přírodní uran (v případě typu AGR je to uran obohacený na 2,3 %) ve formě peletek oxidu uraničitého (UO_2) vložených do palivových tyčí, které jsou pokryté slitinou hořčíku a hliníku
<u>Rozměry aktivní zóny:</u>	výška 8 m a průměr 14 m
<u>Chladivo:</u>	oxid uhličitý (CO_2)
<u>Moderátor:</u>	grafit (C)
<u>Tlak v primárním okruhu:</u>	tlak CO_2 2,75 MPa
<u>Teplota na výstupu z reaktoru:</u>	teplota CO_2 400 °C (v případě typu AGR až 650 °C)



Obr. 6 Schéma reaktoru typu GCR [2]

3.2.5. Reaktor typu RBMK

Již první jaderná elektrárna na světě v Obninsku využívala reaktor typu RBMK (Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj), známá je též zkratka LWGR (Light-Water cooled, Graphite moderated Reactor). Byl vyvinut a používán výhradně na území bývalého SSSR. Koncem roku 2012 bylo v provozu ještě 15 těchto reaktorů a další se již nestaví. Tento reaktor byl i v nechvalně proslulé elektrárně v Černobylu. Reaktor je umístěn v betonové konstrukci a neobklopuje ho žádná ocelová obálka. Aktivní zóna je složena z grafitových bloků, ve kterých je 1693 svislých kanálů, v nichž jsou vloženy palivové tyče. Palivo lze měnit za provozu reaktoru. Chladivo proudí zezdola nahoru kanály, přímo v nich dochází k varu a vzniká pára, která se po oddělení vlhkosti v separátorech odvádí na turbínu. Pára pohánějící turbínu je tedy radioaktivní. Elektrárny s tímto reaktorem jsou jednookruhové.

Jaderné palivo:

přírodní nebo lehce obohacený uran na 1,8 % ve formě válečků oxidu uranitého (UO_2) vložených do palivových proutků, které jsou dále uspořádány do palivových souborů dlouhých 7 metrů

Rozměry aktivní zóny:

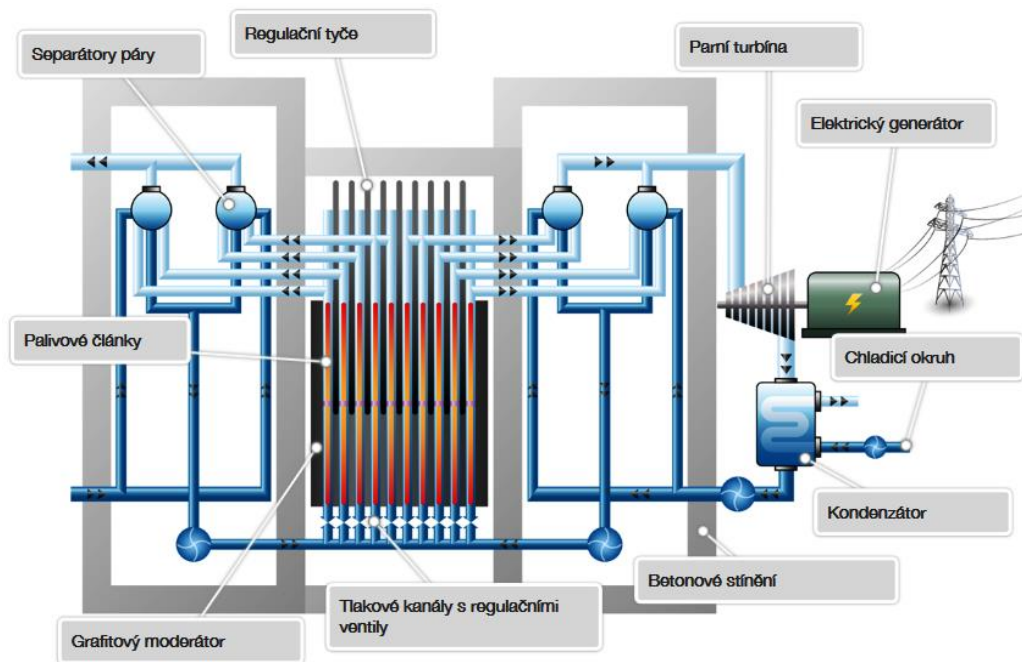
výška 7 m a průměr 11,8 m

Chladivo: lehká voda (H_2O)

Moderátor: grafit (C)

Tlak v primárním okruhu: tlak vody 6,9 MPa

Teplota na výstupu z reaktoru: teplota vody 280 °C



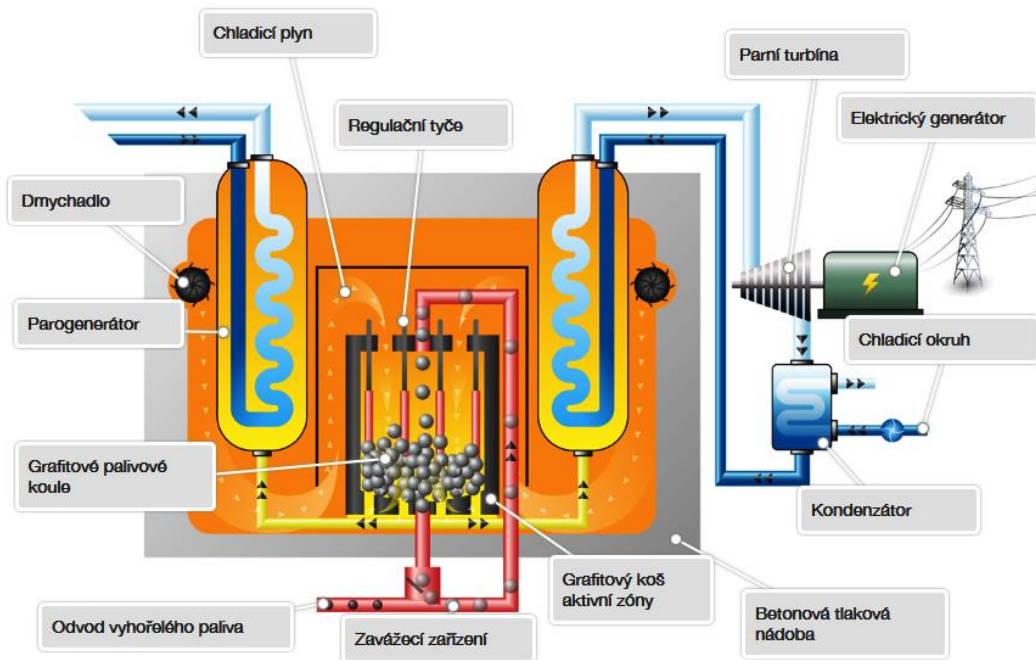
Obr. 7 Schéma reaktoru typu RBMK [2]

3.2.6. Vysokoteplotní reaktor HTGR

Pro dosahování vysoké účinnosti výroby elektrické energie (kolem 40 %) je vysokoteplotní reaktor HTGR (High Temperature Gas cooled Reactor) jedním z perspektivních typů jaderných reaktorů. Zatím existují jen experimentální reaktory a to v Německu, Velké Británii, USA a Číně. Ve válcové aktivní zóně reaktoru je umístěn grafitový koš, do kterého se volně sypou palivové koule (v koncepci USA se na sebe skládají šestiúhelníkové bloky) a na dně jsou postupně odebírány. Přičemž je vyhořelé palivo nahrazováno novým. Grafit slouží současně jako bezpečná, tepelně odolná obálka uranu a vznikajících produktů štěpení a také jako moderátor. Skrz aktivní zónu je dmychadlem proháněno helium, které je výhodné, protože je netečné vůči chemickým a jaderným procesům a současně dobře přenáší teplo. Horké helium může být odváděno jednak přímo do

průmyslových a chemických procesů nebo do parogenerátoru, kde předaným teplem mění vodu sekundárního okruhu na páru, která pohání turbínu. Velká přednost tohoto typu reaktoru je vysoká tzv. inherentní bezpečnost. Vysoké teploty v reaktoru nepředstavují velké riziko, při vážné nehodě okruhu chlazení se reaktor po dobu několika hodin díky přirozené cirkulaci helia a velké tepelné setrvačnosti grafitu nepřehřívá a nevzniká v reaktoru nebezpečný přetlak.

<u>Jaderné palivo:</u>	vysoce obohacený uran na 93 % ve formě malých kuliček (průměr 0,5 mm) oxidu uraničitého (UO_2) potažené třemi vrstvami karbidu křemíku a uhlíku, které jsou rozptýlené v koulích z grafitu velkých asi jako tenisový míček (v případě koncepce USA šestiúhelníkové bloky)
<u>Rozměry aktivní zóny:</u>	výška 6 m a průměr 5,6 m
<u>Chladivo:</u>	helium (He)
<u>Moderátor:</u>	grafit (C)
<u>Tlak v primárním okruhu:</u>	tlak helia 4 MPa
<u>Teplota na výstupu z reaktoru:</u>	teplota helia 700-900 °C



Obr. 8 Schéma reaktoru typu HTGR [2]

3.2.7. Rychlý množivý reaktor FBR

Reaktorům používající ke štěpení rychlé neutrony je v dlouhodobé perspektivě přikládán velký význam a předpokládá se, že v budoucnu bude rychlé neutrony využívat většina typů reaktorů. Zatím se budují převážně demonstrační či experimentální reaktory tohoto typu. V současné době se reaktory typu FBR (Fast Breeder Reactor) provozují nebo je plánována jejich výstavba v Indii, Rusku, Číně a Japonsku. Největší výhodou těchto reaktorů je to, že při provozu produkují více nového spalitelného plutonia, než samy spalují. Což vede k významnému ušetření celosvětových zásob uranu. Aktivní zóna je tvořena svazky palivových tyčí ponořených do chladiva a obklopených plodivou obálkou z ochuzeného uranu, ve které téměř nedochází ke štěpení a vzniká zde nové plutonium vhodné pro další palivové využití. Do budoucna se počítá, že reaktory budou schopny vytvářet a spalovat plutonium přímo v aktivní zóně, navíc s možností spalovat aktinoidy⁴ z použitého jaderného paliva. Reaktor využívá ke štěpení rychlé neutrony, není třeba využívat žádný moderátor. V jednom litru objemu aktivní zóny se v reaktoru typu FBR produkuje 10x více tepla než u klasických tepelných reaktorů. Takové množství tepla nemůže být odváděno plynem ani vodou, ta navíc zpomaluje neutrony, proto se jako chladivo používá sodík, který je při teplotách nad 100 °C tekutý. Sodík má mnohem lepší tepelnou vodivost než voda, nepůsobí korozi materiálů. Chladivo v reaktoru cirkuluje pod bodem varu, který je u sodíku téměř

⁴ Skupina patnácti chemických prvků počínajících aktiniem (Ac)

900 °C, což je z hlediska bezpečnosti výhodné. Problém sodíku spočívá v jeho bouřlivé reakci s vodou nebo vzduchem, pro zvýšení bezpečnosti se tedy sodíkový okruh zdvojuje. Tepelná energie sodíku z primárního sodíkového okruhu je předávána sekundárnímu sodíkovému okruhu a tento již neradioaktivní sodík předává energii vodě v parogenerátoru, která po přeměně na páru roztáčí turbínu.

Jaderné palivo: uran a plutonium (podíl plutonia 15-20 %) ve směsi oxidu uraničitého (UO_2) a plutoničitého (PuO_2) nebo obohacený uran (až na 20 %) ve formě válečků oxidu uraničitého (UO_2) uzavřených do obalových trubek z nerezavějící oceli

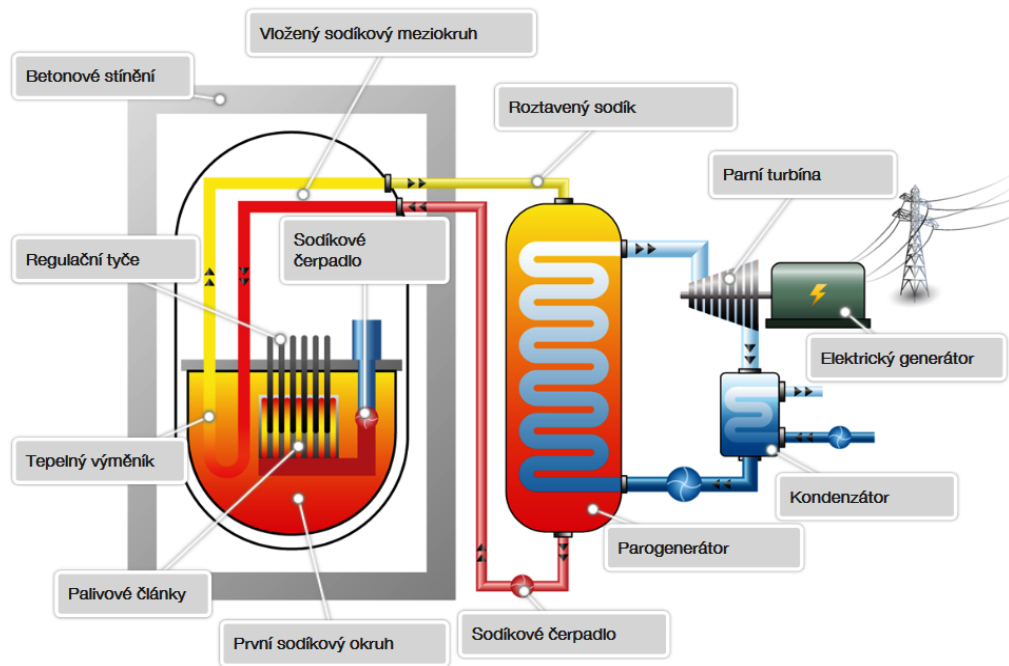
Rozměry aktivní zóny: výška 2,1 m a průměr 2,5 m

Chladivo: sodík (Na)

Moderátor: žádný

Tlak v primárním okruhu: tlak sodíku 0,25 MPa

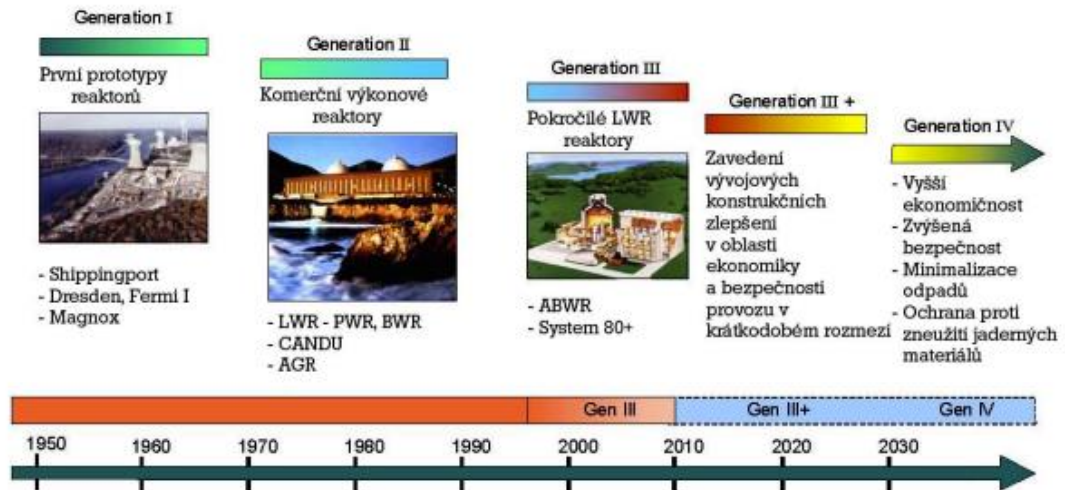
Teplota na výstupu z reaktoru: teplota sodíku 550 °C



Obr. 9 Schéma reaktoru typu FBR [2]

3.3. Budoucnost jaderných reaktorů

Jaderné reaktory I. generace byli vyvinuty a stavěny v letech 1950-1960 a ve většině se jednalo o prototypy. Dnes už je v provozu pouze jeden tento reaktor, a to reaktor typu Magnox v elektrárně Wylfa ve Velké Británii. Drtivá většina v současné době provozovaných reaktorů patří mezi reaktory II. generace, které byly vyvinuty v 70. letech. Reaktory III. generace vycházejí z osvědčených typů reaktorů II. generace a představují jejich vylepšení, zjednodušení a zároveň zvýšení bezpečnosti. Čtyři tyto reaktory typu ABWR jsou již v provozu v Japonsku a další typy se plánují nebo probíhá jejich výstavba. Generace III+, která přináší především zlepšení v oblasti ekonomiky a bezpečnosti, bezprostředně navazuje na Generaci III, můžeme tedy tyto dvě generace spojit. Přibližně od roku 2020 se počítá se zahájením provozu IV. Generace, která je zaměřena především na zlepšení ekonomické stránky, vyšší bezpečnost, minimalizaci odpadů a zabránění zneužití jaderných materiálů.



Obr. 10 Přehled generací jaderných reaktorů [11]

3.3.1. Generace III (III+)

Tato nová generace využívá standardizovaný design předchozích typů reaktorů, což zkracuje dobu licenčního řízení a celkově snižuje náklady a dobu výstavby elektrárny. Jejich zjednodušená a stabilnější konstrukce umožňuje snadnější provoz a zvyšuje odolnost vůči vnějším vlivům. Také se klade důraz na zvýšení bezpečnosti, více využívající zejména tzv. pasivní prvky ochrany a minimalizaci dopadů elektrárny na životní prostředí, bylo sníženo i riziko havárie s významným poškozením aktivní zóny (výrazně pod $10^{-5}/rok$). Prodloužila se doba životnosti a to nejméně na 60 let. Dále tyto reaktory umožňují vysoké vyhoření paliva, čímž prodlužují interval mezi jeho výměnami a redukují množství produkovaného odpadu. Zvýšila se také schopnost plynuleji reagovat na požadavky sítě a regulovat výkon reaktoru.

Mezi nejperspektivnější jaderné reaktory Generace III (resp. Generace III+) patří vylepšené tlakovodní reaktory typu PWR (Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor), a to kupříkladu EPR (European Pressurized Reactor) vyvinutý ve spolupráci Francie a Německa firmou Areva, AP1000 americké firmy Westinghouse, APWR (Advanced Pressurized Water Reactor) společností Westinghouse a japonské Mitsubishi, MIR.1200 (Modernised International reactor) společný projekt české společností Škoda JS a ruských firem Atomstrojexport a Gidropress. Dále pak ACR1000 (Advanced CANDU Reactor), zmodernizovaný těžkovodní reaktor CANDU (CANada Deuterium Uranium) kanadské firmy AECL nebo také ABWR (Advanced Boiling Water Reactor), zdokonalený varný reaktor

BWR (Boiling Water Reactor) japonských společností GE-Hitachi a Toshiba.

3.3.2. Generace IV

Je snaha, aby na pomezí dvacátých a třicátých let tohoto století začala nastupovat generace úplně nových typů a koncepcí jaderných reaktorů. Proto v roce 2001 vzniklo Mezinárodní fórum pro IV. generaci (Generation IV International Forum, GIF) založené státy, které ve velké míře využívají jadernou energetiku v současnosti a plánují ji využívat i v dalších letech. Zakládajícími státy jsou Argentina, Brazílie, Francie, Japonsko, Jižní Korea, Jihoafrická republika, Kanada, Spojené státy americké a Velká Británie, v roce 2002 se připojilo Švýcarsko, roku 2003 celá Evropská unie zastoupená organizací EURATOM a v roce 2006 se přidalo Rusko a Čína. Indie členem není, vyvíjí však svojí vlastní koncepci nových reaktorů, soustředěných především na využití thoria Th^{232} , kterého má obrovské zásoby.

Jedním z cílů nových jaderných reaktorů IV. generace je co nejefektivnější využití jaderného paliva s využitím uzavřeného palivového cyklu a možnost využívat kromě uranu U^{235} také uran U^{238} a thorium Th^{232} , což umožňují rychlé množivé reaktory. Dalším požadavkem je samozřejmě bezpečnost reaktoru, přičemž je kladen důraz na to, aby bezpečnostní prvky byly schopny zabránit nehodě automaticky bez nutnosti aktivního zásahu operátora či kontrolního systému. Důležitá je také pevná konstrukce ochranné obálky reaktoru a celé budovy, která musí odolat např. i nárazu letadla nebo útoku raketou. Dále také zabránění zneužití jaderných materiálů v podobě vhodné např. k výrobě jaderných zbraní. Podstatným cílem je též zlepšení ekonomiky provozu jaderných elektráren a jejich konkurenceschopnost s ostatními zdroji elektrické energie. Společným rysem reaktorů Generace IV. by měla být práce reaktoru při vysoké teplotě a z toho plynoucí co možná nejefektivnější výroba elektrické nebo i jiné formy (např. vodíkové hospodářství) energie. S ohledem na tyto cíle, GIF v roce 2002 představilo těchto 6 koncepcí nových jaderných reaktorů, vybraných odborníky z cca 130 návrhů, splňujících nároky na budoucí rozvoj jaderné energetiky, na jejichž vývoji budou členové GIF spolupracovat:

1) Plynem chlazený rychlý reaktor GFR

Chladivem by mělo být v koncepci reaktoru typu GFR (Gas-cooled Fast Reactor) helium cirkulující kolem paliva, kterým bude ochuzený uran s obsahem plutonia 15-20 %, ve formě jehel nebo plátů. Teplota helia, které může být vedeno přímo na turbínu, v aktivní zóně by měla být cca 850 °C. Reaktor bude využívat spektrum rychlých neutronů a uzavřený palivový cyklus, který bude řešen přepracováváním paliva přímo v areálu elektrárny. V aktivní zóně nebude plodivá obálka, plutonium vzniká neutronovým záchytem přímo v palivu.

2) Olovem chlazený rychlý reaktor LFR

Jako palivo bude v reaktoru typu LFR (Lead-cooled Fast Reactor) používán uran nebo thorium ve směsi s aktinoidy, ve formě nitridového paliva. Reaktor bude pracovat se spektrem rychlých neutronů a s uzavřeným palivovým cyklem. Chladivem, jež bude za nízkého tlaku proudit v aktivní zóně díky své přirozené cirkulaci, by mělo být olovo nebo směs olova a bismutu. Teplota na výstupu reaktoru bude kolem 550 °C, pokud se však podaří vynalézt materiály, které budou schopny odolávat vysokým teplotám a korozi od olova, může teplota dosahovat až 800 °C. Plánuje se velké výkonové rozpětí od „baterií“ až po velké elektrárny a také mobilní reaktory s možností dlouhého provozu bez výměny paliva (cca 20 let).

3) Reaktor chlazený roztavenými solemi MSR

V reaktoru typu MSR (Molten Salt Reactor) bude palivo uran rozpuštěný v chladivu (sůl fluoridu sodného), které bude proudit kanály z grafítu, sloužících jako moderátor. Díky tomu může být palivo doplňováno za provozu. Reaktor tedy bude využívat zpomalených tepelných neutronů a také uzavřený palivový cyklus. Chladivo by mělo dosahovat nízkého tlaku a teploty kolem 700 °C. Jedná se o nejvíce inovativní koncept nových jaderných reaktorů Generace IV.

4) Sodíkem chlazený rychlý reaktor SFR

Tato koncepce se odvíjí od současných rychlých reaktorů chlazených sodíkem. Reaktor typu SFR (Sodium-cooled Fast Reactor) bude tudíž využívat rychlé neutrony a

uzavřený palivový cyklus. Kvůli zvýšení bezpečnosti bude sodíkový okruh zdvojen a až třetím okruhem bude voda. Teplota na výstupu reaktoru by se měla pohybovat okolo 500 °C a předpokládá se možnost konstrukce širokého rozpětí výkonů.

5) Superkritický vodou chlazený reaktor SCWR

Tento typ reaktoru SCWR (Super Critical Water Reactor) bude pracovat s teplotou a tlakem nad termodynamickým kritickým bodem vody (375 °C a 2 MPa), která bude zároveň chladivem i moderátorem. Je založen na technologiích lehkovodních reaktorů. Bude pracovat se zpomalenými neutrony. Díky teplotě 510-550 °C a tlaku 25 MPa v aktivní zóně by měl reaktor dosahovat velké tepelné účinnosti, která by mohla dosáhnout až 45 %. Používané palivo by měl být oxid uranu. Voda v podobě páry by měla být odváděna přímo na turbínu.

6) Plynem chlazený reaktor s velmi vysokou teplotou VHTR

Koncepce reaktoru typu VHTR (Very High Temperature Reactor) bude využívat zpomalené tepelné neutrony a otevřený palivový cyklus. Bude navazovat na zkušenosti s vysokoteplotními reaktory HTGR. Palivo ve formě kuliček vysoce obohaceného uranu bude rozptýleno v aktivní zóně, která bude složena z koulí nebo bloků grafitu. Chladivem bude helium, jež bude dosahovat teplot kolem 1000 °C, pro takové teploty musí být ještě vyvinuty materiály a turbína splňující náročné požadavky. U tohoto reaktoru se předpokládá velká účinnost výroby elektrické energie. Z hlediska výroby vodíku by tento reaktor měl být ze všech uvedených koncepcí nejperspektivnější.

4. Bezpečnostní prvky jaderných elektráren

Jaderná bezpečnost je schopnost jaderného zařízení a jeho obsluhy zajistit, aby se proces získávání energie štěpením těžkých jader nikdy nevymkl řízení a radioaktivní látky, které v tomto procesu vznikají, včetně doprovázejícího ionizujícího záření, neunikly nedovoleně do životního prostředí. [1]

Za běžného provozu řídí jadernou elektrárnu aktivní systémy, které reagují na pokyny operátora či počítače a potřebují ke svému provozu elektřinu. Pomocí těchto systémů se také řeší běžné provozní odchylky (např. řízení tlaku v primárním okruhu). V případě, že dojde k vážnější poruše, která by mohla vést k narušení jaderné bezpečnosti, je ovšem třeba, aby systémy zareagovaly správně za všech myslitelných okolností. Proto v takovém okamžiku často nastupují bezpečnostní systémy, které se na operátora, elektroniku či elektřinu nespolehají. Takové bezpečnostní systémy využívající fyzikálních zákonů (např. gravitace, konvekce, fyzikální vlastnosti reaktoru) nazýváme systémy pasivní. [2]

V prvé řadě je však cílem, co nejvíce snížit pravděpodobnost vzniku jakýchkoliv nehod či poruch, proto se nachází v každé jaderné elektrárně spousta preventivních opatření. Tím je například už samotný správný výběr lokality, která musí být volena i s ohledem na možnost rizika přírodních jevů (např. zemětřesení, záplavy, tsunami atd.), použití co možná nejkvalitnějších materiálů či konstrukce elektrárny a také systém mnohonásobných postupných a navzájem nezávislých bariér a organizačních opatření, kompenzujících možné selhání techniky a lidské chyby, tento princip se nazývá ochrana do hloubky (defence in depth). Důležité bezpečnostní prvky jsou zálohovány minimálně třikrát. Základním předpokladem bezpečnosti je neustálé odvádění uvolňovaného tepla z aktivní zóny reaktoru. Často se využívají tzv. inherentní bezpečnostní prvky, které využívají fyzikální zákony a jsou schopny zabránit rozvoji havárie bez zásahu elektroniky či operátora. Už při projektování jaderné elektrárny se počítá s možností případné nehody či selhání nějakého bezpečnostního prvku, na tuto havárii je elektrárna připravena a je schopna ji zabránit či eliminovat její následky. Pravděpodobnost této tzv. projektové havárie je jednou za desetitisíce, u modernějších typů elektráren dokonce cca jednou za milion reaktor-let⁵. Bezpečnostní systémy tvoří cca jednu čtvrtinu nákladů na stavbu jaderné elektrárny. Velmi důležitá je

⁵ Jeden reaktorrok tj. jeden rok provozu jednoho reaktoru

vysoká kvalifikace provozního personálu a dodržování bezpečnostních předpisů a principů radiační ochrany. Dále je podstatná neustálá kontrola a testování všech bezpečnostních zařízení a také cvičení a přezkoušení operátorů a jejich schopností ovládat reaktor.

4.1. Ochrana do hloubky (Defence in depth)

Tento princip ochrany využívá systém mnohonásobných postupných a na sobě nezávislých technických a organizačních opatření. Ochrana do hloubky se dělí na pět odstupňovaných úrovní. Pro bezpečnost jaderné elektrárny je velmi důležitá kompenzace možného selhání nějakého bezpečnostního prvku či lidského pochybení. Proto, dojde-li k selhání jedné úrovně opatření, je připravena ochranné funkce převzít další, vyšší úroveň.

Nedílnou součástí ochrany do hloubky je také zodpovědně prováděná veškerá činnost pracovníků jaderné elektrárny a dodržování principů kultury bezpečnosti, která je definována jako soubor charakteristik a osobních postojů v organizaci a myšlení lidí, který zajišťuje, že problémům bezpečnosti je věnována nejvyšší priorita, odpovídající jejich významnosti. [11]

1) První úroveň

Cílem první úrovně ochrany je prevence odchýlení od normálního provozu a poruch elektrárny. Patří sem např. výběr vhodné lokality pro stavbu, konstrukce elektrárny a vysoká jakost projektu, výroby a provozu, dodržování bezpečnostních předpisů pro běžný provoz elektrárny atd.

2) Druhá úroveň

Zajišťuje včasnou detekci selhání, kontrolu nad vznikem abnormálního provozu a co nejrychlejší navrácení provozu do běžného stavu. Příkladem opatření druhé úrovně jsou předpisy pro abnormální provoz, systém limitování maximálního výkonu reaktoru, systém kontroly teploty, pojišťovací ventily zamezující velkému převýšení tlaku v primárním a sekundárním okruhu a další řídicí a limitační systémy.

3) Třetí úroveň

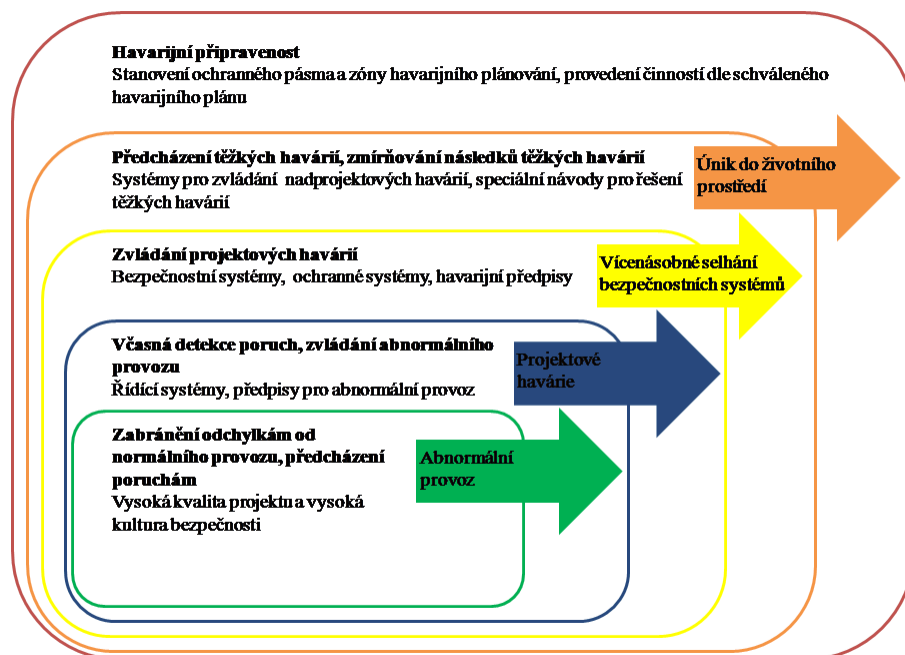
Třetí úroveň ochrany do hloubky tvoří bezpečnostní systémy pro zvládnutí projektových havárií, tyto systémy mají především zabezpečit dostatečné chlazení aktivní zóny a tím předejít jejímu tavení.

4) Čtvrtá úroveň

Cílem čtvrté úrovně je, za předpokladu, že první tři úrovně ochrany do hloubky nezabrání poškození aktivní zóny, minimalizovat následky nadprojektové havárie a zabránit úniku radioaktivních látek do životního prostředí. To zajišťuje ochranná obálka elektrárny tzv. kontejnment, který obklopuje primární okruh elektrárny a je poslední bariérou proti úniku radioaktivních látek.

5) Pátá úroveň

V případě úniku radioaktivních látek do životního prostředí přijde na řadu, poslední pátá úroveň ochrany do hloubky, kterou tvoří havarijní plány a prostředky pro jejich realizaci, sloužící pro co největší zmírnění následků havárie.



Obr. 11 Schéma ochrany do hloubky

4.2. Bezpečnost jaderného reaktoru

Jaderný reaktor má tři základní bezpečnostní zásady a funkce:

- kontrolovat a regulovat probíhající jaderné štěpení a v případě nutnosti co nejrychleji štěpnou reakci přerušit (odstavení reaktoru)
- za každých okolností chladit jaderné palivo a odvádět teplo z aktivní zóny
- zbránit úniku radioaktivních látek do životního prostředí

Jelikož v průběhu provozu jaderného reaktoru klesá obsah štěpitelného uranu v palivu, je do chladiva reaktorů, které využívají jako chladivo a moderátor vodu, přidáván absorbátor v podobě kyseliny borité (H_3BO_3), jejíž koncentrace je postupně s klesáním obsahu štěpitelného uranu snižována a tím je zachováván konstantní výkon reaktoru. Tento proces se nazývá dlouhodobé změny výkonu reaktoru. Pro rychlé krátkodobé změny výkonu reaktoru se používají tzv. řídicí (regulační) tyče s obsahem absorbátoru neutronů, nejčastěji se využívá bor (B) nebo kadmium (Cd). Zasouváním a vysouváním těchto tyčí mezi palivové soubory se reguluje výkon reaktoru. U některých typů reaktorů je absorbátor obsažen v horní části palivových souborů a výkon se tedy řídí výškou zasunutí souborů do aktivní zóny. K rychlému odstavení jaderného reaktoru a okamžitému zastavení štěpné reakce slouží havarijní (bezpečnostní) tyče s vysokým obsahem absorbátu, který pohltí přítomné neutrony a zastaví štěpení. U většiny reaktorů jsou havarijní tyče zavěšeny nad aktivní zónou pomocí elektromagnetů, tím je zaručeno bezpečné odstavení reaktoru i v případě ztráty celkového napájení, při kterém elektromagnety přestanou fungovat a tyče vlastní vahou spadnou do aktivní zóny. V jiných typech jsou tyče do aktivní zóny vystřelovány, čímž je zajištěn co nejrychlejší efekt. K odstavení reaktoru dojde během několika sekund, štěpná reakce nicméně ještě dobíhá několik minut.

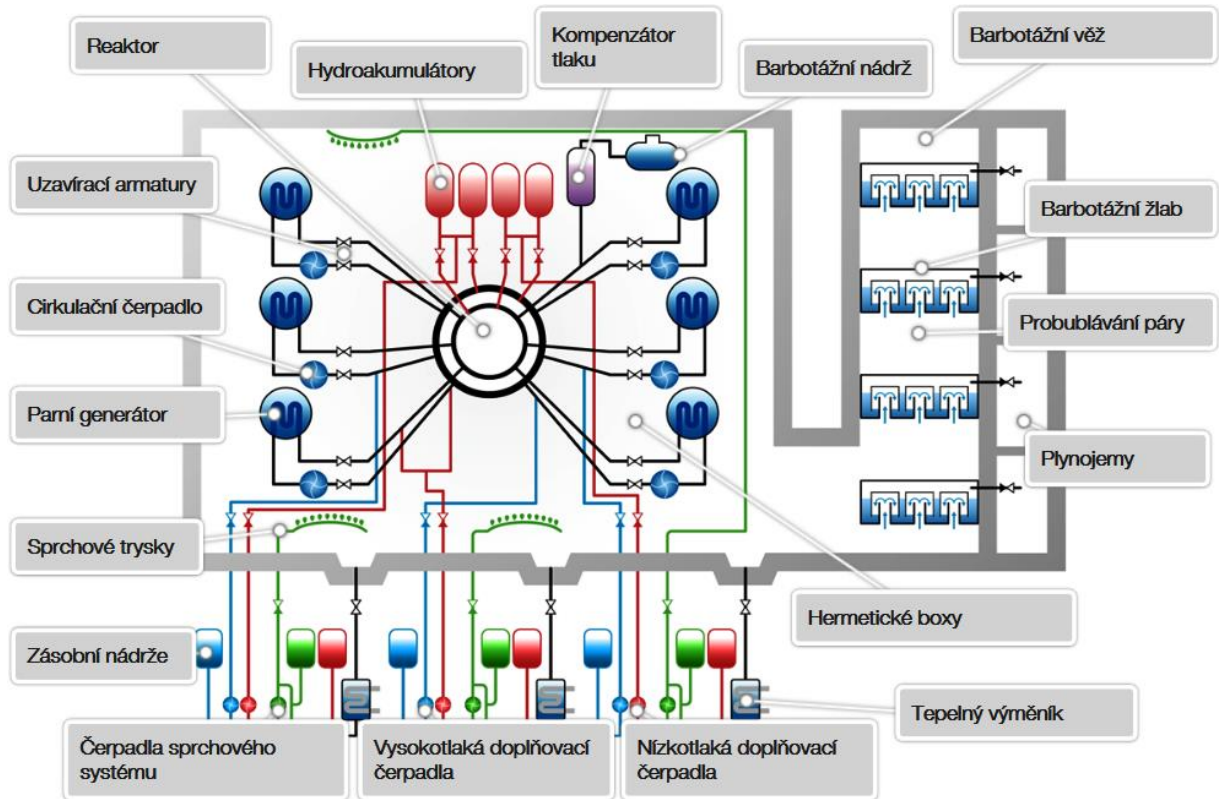
I po odstavení reaktoru se v aktivní zóně generuje velké množství tepla, které musí být neustále odváděno, což je obstaráváno mnohonásobně zálohovaným systémem chlazení. Proudění chladiva v primárním okruhu zajišťují hlavní cirkulační čerpadla. Nutné je také účinně a rychle odvádět teplo z chladiva, k tomu v jaderné elektrárně slouží tzv. konečný jímač (absorbér) tepla. Jako koneční absorbér tepla se v elektrárnách využívá atmosféra, za

pomocí chladicích věží nebo chlazení pomocí vody v řekách či mořích.

Mezi nejzávažnější typy havárií jaderných elektráren patří havárie se ztrátou chladiva tzv. LOCA (Loss Of Coolant Accident). Při ztrátě chladiva je omezena schopnost chladit primární okruh, což může vést až k tavení aktivní zóny, proto má každý reaktor k dispozici celou řadu havarijních chladicích systémů tzv. ECCS (Emergency Core Cooling System), které se zapojují podle závažnosti havárie a zajišťují doplnění chybějícího chladiva a odvod tepla z aktivní zóny. Zásobní nádrže, z kterých se doplňuje chladivo, bývají umístěny nad aktivní zónou, aby chladivo mohlo vytékat jen působením gravitace bez nutnosti použití čerpadel. Při malých únicích chladiva, kdy je možno zachovat provozní tlak v primárním okruhu, se k dochlazování aktivní zóny využívají vysokotlaká doplňovací čerpadla, která vhání do primárního okruhu elektrárny vodu s vysokým obsahem absorbátoru. Pokud dojde v primárním okruhu k přílišnému poklesu tlaku, samovolně se otevřou zpětné ventily hydroakumulátorů, které jsou naplněny roztokem kyseliny borité. Nad hladinou kyseliny borité je stlačený dusík, jenž ji po otevření ventilů vytlačuje ven. Poté se zapojují nízkotlaká doplňovací čerpadla dodávající velké množství vody, sloužící k dlouhodobému dochlazování aktivní zóny. V případě celkové ztráty napájení nemohou doplňovací čerpadla fungovat, a proto se v některých typech reaktorů nachází tzv. systém izolovaného odvodu tepla, ve kterém se k pohonu čerpadel využívá pára z reaktoru. Dalším pasivním bezpečnostním prvkem je využití přirozeného proudění chladiva při návrhu chladicího systému. Potrubí primárního okruhu odvádějící z reaktoru horké chladivo je umístěno nad potrubím přivádějící ochlazené chladivo zpět, takže i při nefunkčnosti čerpadel může chladivo díky přirozené konvekci (proudění), ovšem menší rychlostí, cirkulovat v primárním okruhu. Možno je také zapojit vnější čerpadlo např. hasičský vůz.

Tlak v primárním okruhu je automaticky regulován pomocí tzv. kompenzátoru objemu (válec z poloviny naplněný chladivem a z druhé poloviny párou), který je připojen na primární okruh. Když je tlak v primárním okruhu příliš nízký, elektrickými ohříváky se přihřívá chladivo v kompenzátoru, tím vzniká víc páry a tlak chladiva v celém systému stoupne. V případě, že je tlak příliš vysoký, pára se sprchuje, to vede k její kondenzaci a tím se celkový tlak sníží. Pokud je tlak v primárním okruhu tak velký, že hrozí riziko nehody, je přetlak snižován upouštěním páry z kompenzátoru objemu přes ventily do barbotážní nádrže, kde se nachází velký bazén vody, ve kterém se pára nechává tzv. probublávat, tím se ochlazuje, kondenzuje a tlak v primárním okruhu klesá. Při nárůstu tlaku uvnitř ochranné obálky

reaktoru tzv. kontejnmentu v důsledku havárie, je také připraven havarijní sprchový systém, který umožňuje skrápění celých vnitřních prostor kontejnmentu, za účelem kondenzace páry a snížení celkového tlaku.



Obr. 12 Zapojení bezpečnostních systémů reaktoru VVER 440 [2]

4.3. Bezpečnostní (fyzické) bariéry

Pro zajištění bezpečnosti je klíčové za každých okolností zabránit úniku radioaktivních látek a radioaktivního záření do životního prostředí a tím předejít případnému ohrožení personálu a obyvatelstva v blízkém i vzdáleném okolí elektrárny. To zabezpečují tři úrovně fyzických bariér, jejichž hermetičnost (nepropustnost) je neustále kontrolována.

1) První bariéra

První bariérou je hned sama matrice jaderného paliva, oxid uranický ve formě keramického válečku je velmi odolný a pevný, takže zachytává téměř všechny štěpné produkty vznikající při štěpení. Další ochranou je hermetický obal palivového proutku ze speciální slitiny zvané zircaloy, který chrání palivové pelety před kontaktem s chladivem a zabraňuje případnému úniku štěpných produktů.

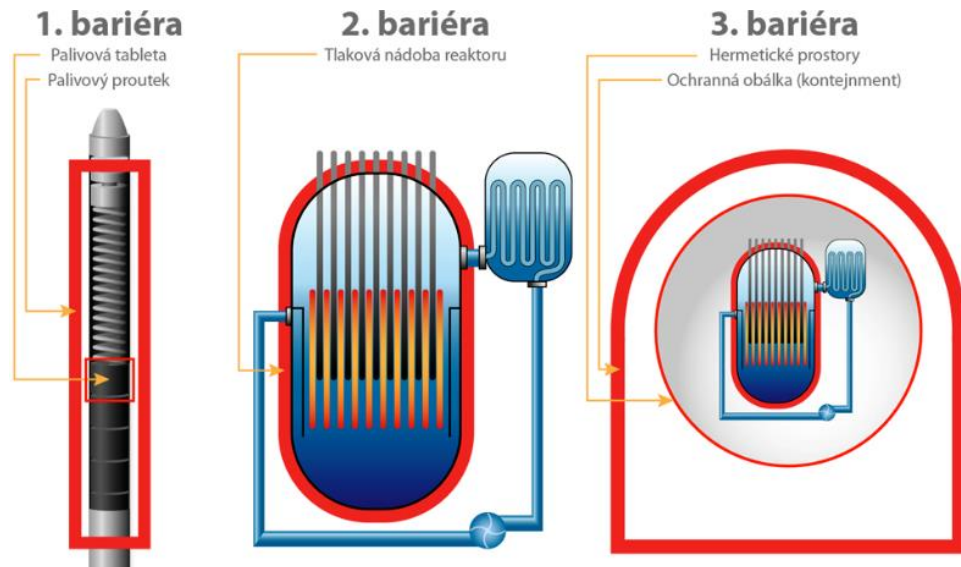
2) Druhá bariéra

Další fyzickou bariérou je reaktorová nádoba a konstrukce celého primárního okruhu. Tlustostěnná ocelová nádoba reaktoru a všechny komponenty elektrárny, které jsou hermeticky uzavřené v primárním okruhu, musí být navrženy a konstruovány tak, aby byly schopny odolávat velkým teplotám, tlaku a radiačnímu zatížení.

3) Třetí bariéra

Poslední bariérou je ochranná obálka tzv. kontejnment, obklopující hermetické prostory jaderné elektrárny, tj. prostory, v nichž se nacházejí komponenty primárního okruhu. Má za úkol za pomoci bezpečnostních systémů zajistit potlačení tlaku v případě nehody či havárie, zabránit úniku radioaktivních látek do životního prostředí a tvoří hranici hermetické zóny. Kontejnmentů existuje mnoho druhů, asi nejvyužívanější jsou obálky z předpjatého betonu s ocelovou výstelkou se stěny tlustými cca 1-1,2 m. Uvnitř ochranné obálky se trvale udržuje mírný podtlak, kvůli snadnějšímu zjištění případné netěsnosti. Zevnitř moderní kontejnment odolá dvojnásobku až trojnásobku atmosférického tlaku, zvenku zabezpečuje ochranu proti vnějším vlivům a přírodním jevům, je schopen odolat dokonce i pádu letedla nebo explozi.

Některé, zejména starší typy jaderných elektráren s reaktory VVER 440 využívají místo kontejnmentu tzv. barbotážní vakuový systém (viz obr. 12), skládající se z hermetických prostorů (tzv. boxů), ve kterých je umístěno zařízení primárního okruhu a z barbotážní věže, která je spojena s hermetickými prostory koridorem. V případě havárie se unikající radioaktivní pára shromažďuje v barbotážní věži a nechává se probublávat a kondenzovat v barbotážních žlabech naplněných roztokem vody a kyseliny borité. Tím klesá tlak v primárním okruhu a minimalizuje se únik radioaktivních látek mimo hermetické prostory. Zbýlé nezkondenzované plyny zachytávají plynojemy.



Obr. 13 Bezpečnostní (fyzické) bariéry [2]

4.4. Inherentní bezpečnost

Inherentní bezpečnost předpokládá využití fyzikálních zákonů a principů, díky kterým dokáže elektrárna bez zásahu elektroniky či obsluhy zareagovat na odchylku od běžného provozu či nehodu. Předejde se tak havárii a reaktor se samovolně vrátí do normálního provozu.

Aktivní zóna je proto navržena a zkonstruována tak, aby za každých okolností vykazovala tzv. záporný koeficient reaktivity. To znamená, že pokud dojde k nárůstu teploty v reaktoru nebo jen v jediném palivovém článku, zhorší se schopnost moderátoru zpomalovat neutrony, tudíž se začne snižovat počet štěpících se jader, což vede k útlumu štěpné reakce a poklesu teploty v aktivní zóně. U některých typů reaktorů IV. generace se počítá s využitím těchto vlastností k autoregulaci.

U reaktorů jenž se chladí i moderují vodou, která slouží ke zpomalování neutronů na rychlost potřebnou ke štěpení, se využívá ke zvýšení bezpečnosti tzv. negativního dutinového koeficientu. Dojde-li k varu vody, vznikající bublinky páry snižují její moderační schopnosti, což způsobí klesání množství uvolňované energie v reaktoru.

Do budoucna se s využíváním inherentních bezpečnostních prvků počítá stále více, jelikož jsou schopny chránit jadernou elektrárnu samy, bez jakéhokoli vnějšího zásahu, čímž zvyšují bezpečnost celého systému.

4.5. Nouzové zdroje elektrické energie

Je velmi důležité, aby veškeré bezpečnostní systémy jaderné elektrárny byly zálohovány, některé stěžejní prvky jsou zálohovány dokonce i více než trojnásobně. Za normálního provozu jsou systémy elektrárny napájeny z vnější elektrické sítě, pokud však dojde k úplnému výpadku proudu (tzv. blackout) je třeba využít elektrické zdroje umístěné v areálu elektrárny. K tomu jsou připraveny dieselagregáty, které zabezpečí dostačující dávku elektrické energie pro systémy elektrárny. Na bezpečné uchlazení jednoho reaktoru stačí jediný dieselagregát, přesto je jich kvůli bezpečnosti v elektrárně vždy více. Další zálohou v řadě jsou baterie. Všechny tyto záložní zdroje energie zajišťují dostatečné napájení systémů za jakékoliv situace.

5. Zhodnocení bezpečnosti jaderných elektráren

V předchozí kapitole jsme si popsali několik nepoužívanějších bezpečnostních principů a technologií v jaderné energetice, jelikož je ale každá jednotlivá jaderná elektrárna vlastně unikátním projektem a stavbou, liší se také některé použité bezpečnostní prvky a jejich uspořádání v elektrárně. Aby bylo dosaženo požadované bezpečnosti každého jaderného zařízení, je potřeba mít organizace, které na dodržení bezpečnosti dohlédnou, na mezinárodní úrovni se o toto stará organizace IAEA.

International Atomic Energy Agency (IAEA), známá též pod českým názvem jako Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE), tato organizace, jejímž současným generálním ředitelem je od roku 2009 Japonec Yukija Amamano byla založena 29. Července 1957, její hlavní sídlo je ve Vídni a v současnosti má 151 členských států. Byla založena, aby dohlížela a stanovovala pravidla pro mírové využívání jaderné energie, také má na starosti kontrolu dodržování Smlouvy o nešíření jaderných zbraní⁶. V roce 2005 byla organizaci udělena Nobelova cena za mír.

V roce 1990 vytvořila IAEA Mezinárodní stupnici jaderných událostí INES (International Nuclear Event Scale), která má za úkol zabránit zkreslujícímu hodnocení nastalé události a jasně a srozumitelně informovat veřejnost o závažnosti případné nehody či havárie. Od roku 2006 se již nepoužívá jen na známkování nehod v jaderných elektrárnách, ale byla rozšířena na veškerou manipulaci s radioaktivními materiály. Rozděluje události do sedmi stupňů a je rozdělena na nehody (stupně 1,2,3) a havárie (stupně 4,5,6,7), každý jeden další vyšší stupeň znamená cca desetkrát závažnější událost. Stupnice INES vyhodnocuje tři oblasti, na které měla nehoda či havárie a to dopad vně zařízení, uvnitř zařízení a na ochranu do hloubky. Událost vyhodnocuje a klasifikuje stát, na jehož území se stala.

⁶ Smlouva, která má za úkol omezit šíření jaderných zbraní

Tab. 1 Stupnice INES

	Oblast dopadu		
	Dopad vně zařízení	Dopad uvnitř zařízení	Dopad na ochranu do hloubky
Stupeň 7 Velmi těžká havárie (Major accident)	Rozsáhlý únik: široce rozšířené dopady na zdraví a životní prostředí		
Stupeň 6 Těžká havárie (Serious accident)	Závažný únik: pravděpodobné nasazení veškerých plánovaných protiopatření		
Stupeň 5 Havárie s rizikem vně zařízení (Accident off-site risk)	Omezený únik: pravděpodobné částečné nasazení plánovaných protiopatření	Vážné poškození aktivní zóny reaktoru / radiačních bariér	
Stupeň 4 Havárie bez vážnějšího rizika vně zařízení (Accident mainly in installation)	Menší únik: ozáření obyvatelstva řádově v povolených mezích	Významné poškození aktivní zóny reaktoru / radiačních bariér / smrtelné ozáření zaměstnanců	
Stupeň 3 Vážná nehoda (Serious incident)	Velmi malý únik: ozáření obyvatelstva zlomkem povolených limitů	Velké rozšíření kontaminace / akutní účinky na zdraví zaměstnanců	Téměř havarijní stav, nezůstaly žádné bezpečnostní bariéry
Stupeň 2 Nehoda (Incident)		Významné rozšíření kontaminace / nadměrné ozáření zaměstnance	Nehoda s významným poškozením bezpečnostních opatření
Stupeň 1 Anomálie (Anomaly)			Anomálie od schváleného provozního režimu
Stupeň 0 Odchylka (Deviation)	Pod stupnicí Žádný bezpečnostní význam		

V Evropě bylo založeno v roce 1958 Evropské společenství pro atomovou energii (European Atomic Energy Community, EAEC nebo Euratom), které je plně integrováno do Evropské unie a má za cíl přispívat k výzkumu a vývoji jaderné energie, vytvářet společný jaderný trh, dohlížet na zacházení s radioaktivními materiály a na to aby byla zajištěna ochrana obyvatelstva.

Také každý stát využívající jaderné elektrárny pro výrobu elektřiny nebo jiným způsobem zacházející s radioaktivním materiálem, má svůj vlastní úřad pro jadernou bezpečnost, který kontroluje dodržování předpisů a bezpečnost všech jaderných zařízení v zemi. V České republice byl pro tento účel 1. ledna 1993 založen Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB), jehož nynější předsedkyní je od roku 1999 Dana Drábová.

SÚJB vykonává státní správu a dozor při využívání jaderné energie a ionizujícího záření⁷, v oblasti radiační ochrany a v oblasti jaderné, chemické a biologické ochrany. Základním legislativním dokumentem, který stanovuje požadavky na mírové využívání jaderné energie při provozu jaderných zařízení a pro výkon dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení je Atomový zákon - zákon č. 18/1997 Sb. v platném znění. [16]

⁷ Záření, které má schopnost ionizovat atomy či molekuly (např. záření alfa, beta, gama či neutronové záření)

6. Závěr

Jak může být jaderná energie nebezpečná, nám mohly ukázat havárie, které se udály ve vzdálenější i nedávné minulosti, ovšem nehody se stávají v každém průmyslovém či energetickém odvětví. V jaderné energetice dochází k vážným událostem jen zřídka, za více než 15 000 reaktorroků odsloužených světovými jadernými reaktory, došlo jen několika vážným haváriím, přičemž jen jedna z nich měla na svědomí lidské oběti. Podle studie Mezinárodní agentury pro energii (International Energy Agency, IEA) je dokonce jaderná energetika z hlediska počtu úmrtí vztažených na jednotku vyrobené elektřiny nejbezpečnějším zdrojem elektrické energie. Tři nejzávažnější havárie se staly v elektrárnách Three Mile Island, Černobyl a Fukušima.

	Počet úmrtí na 10 miliard kWh
Uhelné elektrárny	2,0
Vodní elektrárny	1,0
Plynové elektrárny	0,3
Jaderné elektrárny	0,2

Obr. 14 Počet úmrtí vztažených na jednotku vyrobené elektřiny podle studie IEA [18]

V jaderné elektrárně Three Mile Island nacházející se v Pensylvánii v USA došlo 28. března 1979 po roce provozu 2. bloku elektrárny k jeho havárii, která ho již navždy vyřadila z provozu. Nehoda byla klasifikována na stupnici INES číslem 5. Příčinou havárie byla souhra několika v podstatě triviálních závad, ale především chyba obsluhy reaktoru, která díky své nedostatečné odbornosti a špatné informovanosti o stavu reaktoru svým jednáním celý průběh havárie zhoršila. Bezpečnostní systémy zafungovaly správně, vážné porušení bezpečnosti nastalo pouze při automatickém přečerpání kontaminované vody z kontejnmentu. Do okolního prostředí uniklo tedy omezené množství radioaktivních látek, ovšem toto malé množství nemělo na okolní obyvatelstvo žádný vliv. Během dalších třinácti let byl kontrolován zdravotní stav 32000 obyvatel žijící v okolí elektrárny, avšak nebyla zpozorována žádná zdravotní újma. Důsledkem této havárie bylo zpřísnění bezpečnostních předpisů a kladení většího důrazu na kvalifikaci personálu jaderných elektráren.

Nejčernější okamžik v historii jaderné energetiky se přihodil v noci 26. dubna 1986 v jaderné elektrárně Černobyl ležící nedaleko města Pripjať na Ukrajině na bývalém území bývalého Sovětského svazu, kde došlo k vážné havárii čtvrtého bloku elektrárny. Důvodem této

havárie, která byla na stupnici INES vyhodnocena číslem 7, byl nepochybně sled několika podstatných chyb obsluhy reaktoru, její nedostatečná kvalifikace a hlavně hrubá ignorace a porušení bezpečnostních předpisů. Svoji vinu také nese nevhodná konstrukce reaktoru typu RBMK. Havárie si bezprostředně vyžádala 31 obětí, akutní nemocí z ozáření onemocnělo dalších 237 pracovníků, kteří se uzdravili. Několik lidí zemřelo při likvidaci havárie a tisíce dalších utrpělo velké dávky ozáření. Kvůli velkému úniku radioaktivních látek došlo ke zvýšení případů výskytu rakoviny štítné žlázy s několika smrtelnými oběťmi. Z okolí elektrárny Černobyl se muselo odstěhovat cca 300 000 obyvatel. Po této tragické události se pohled veřejnosti na jadernou energetiku podstatně změnil.

Nejčerstvější jaderná havárie se 11. března 2011 udála v jaderné elektrárně Fukušima nacházející se na ostrově Honšū v Japonsku, byla způsobená vlnou tsunami vysokou cca 14 metrů, která zavinila to, že se elektrárna ocitla téměř bez zdrojů elektrické energie. Číslem 7 na stupnici INES byla klasifikována z důvodu velkého úniku radioaktivních látek do životního prostředí, i když její následky jsou nesrovnatelně menší než u havárie v Černobylu. Nikdo z obyvatel v okolí elektrárny nebyl zraněn a ani neobdržel nebezpečnou dávku záření. Z lidí podílejících se na zvládnutí havárie obdrželo několik vyšší dávku ozáření, nebyla však zaznamenána žádná nemoc z ozáření.

Velmi důležité je, abychom se z těchto havárií poučili a zkušenosti z nich využili zajištění bezpečnosti jaderné energetiky.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] PAVEL, Augusta. A KOLEKTIV. *Velká kniha o energii*. Praha: L.A. Consulting Agency. spol. s.r.o., 2001. ISBN 80-238-6578-1.
- [2] BROMOVÁ, Edita, Dušan VARGONČÍK a Michael SOVADINA. *Jaderná energie a energetika* [Elektronická kniha]. Simopt, s.r.o., 2013. ISBN 978-80-87851-01-2. Dostupné z: <http://books.simopt.cz/cz/multimedialni-knihy/jadroz-jaderna-energie-a-energetika>
- [3] ÚSTŘEDNÍ INFORMAČNÍ STŘEDISKO PRO JADERNÝ PROGRAM. *Jaderné energetické reaktory*. Praha: Ústřední informační středisko pro jaderný program, 1977.
- [4] BARAN, Václav. *Jaderná energetika a další problémy moderní civilizace*. Praha: Academica, 2002. ISBN 80-200-1048-3.
- [5] KLIK, František a Jaroslav DALIBA. *Jaderná energetika*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2550-0.
- [6] Jaderný reaktor. *Wikipedia* [online]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%BD_reaktor
- [7] Typy reaktorů. *Jaderné elektrárny* [online]. Dostupné z: <http://proatom.luksoft.cz/jaderneelektrarny/typyreaktoru/>
- [8] *Jaderná energie* [online]. Dostupné z: <http://www.jaderna-energie.cz/>
- [9] WAGNER, Vladimír. Reaktory III. generace aneb jaké reaktory se staví teď a budou stavět v nejbližších desetiletích. [online]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/transmutace/generaceIII.htm>
- [10] WAGNER, Vladimír. Reaktory IV generace aneb jak by mohla jaderná energetika vypadat zhruba za dvacet až čtyřicet let. [online]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/transmutace/generaceIV.html>

- [11] *Skupina ČEZ* [online]. Copyright 2014 ČEZ, a. s. Dostupné z: <http://www.cez.cz/>
- [12] SKUPINA ČEZ. *Encyklopedie Energie* [online].
Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/index.htm>
- [13] GIF. *The Generation IV International Forum* [online]. Dostupné z: <https://www.gen-4.org/>
- [14] Tepelný jaderný reaktor. *Jaderné informace* [online].
Dostupné z: <http://jaderneinfo.webnode.cz/news/tepelny-jaderny-reaktor/>
- [15] Smlouva o založení Evropského společenství pro atomovou energii (Euratom). *Europa* [online]. Dostupné z:
http://europa.eu/legislation_summaries/energy/nuclear_energy/treaties_euratom_cs.htm
- [16] SÚJB. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. Dostupné z: <http://www.sujb.cz/>
- [17] SÚJB. *Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí* [online]. 2001.
Dostupné z: <http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/INES.pdf>
- [18] *3.pól magazín plný pozitivní energie* [online]. Dostupné z: <http://3pol.cz/>
- [19] *Jaderná bezpečnost* [online]. Dostupné z: <http://www.jaderna-bezpecnost.cz/>
- [20] SÚRO. *Státní úřad radiační ochrany* [online]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/>
- [21] Havárie spojené se ztrátou chladiva (LOCA). *Atom info* [online]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2013/12/havarie-spojene-se-ztratou-chladiva/>
- [22] Jaderná elektrárna. *Wikipedie* [online].
Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna