

Bezpečnost jaderných elektráren

Nuclear power plant safety

Jakub Kroutil



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub KROUTIL**
Osobní číslo: **A08349**
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Téma práce: **Bezpečnost jaderných elektráren**

Zásady pro vypracování:

- 1. Zpracujte literární rešerši na problematiku týkající se bezpečnosti jaderných elektráren v České republice i ve světě. Zaměřte se přitom na historii, současnost i předpokládanou budoucnost v této oblasti.**
- 2. Popište, resp. znázorněte s využitím multimediálních prostředků, typy jaderných reaktorů, princip řízení jaderné elektrárny, zejména se zaměřením na jejich bezpečnost.**
- 3. Popište důvody havárií jaderných elektráren v České republice a ve světě.**
- 4. Navrhněte formu prezentace a zpracování získaných informací a podkladek.**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Jaderná bezpečnost [online]. [cit. 2011-01-11]. Dostupný z WWW: [http://www.jaderna-bezpecnost.cz/jaderna-bezpecnost-dozor.html].
2. RAČEK, Jiří. Jaderné elektrárny. Brno : VUT, 2008. 222 s. ISBN 978-80-214-3770-8.
3. World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements [online]. 1.12.2010 [cit. 2010-12-18]. Dostupné z WWW: [http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html].
4. Jaderná energetika [online]. c2010 [cit. 2010-12-14]. Dostupné z WWW: [http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika.html].
5. AUGUSTA, Pavel, et al. Velká kniha o energii. Praha : L.A. Consulting Agency, 383 s. 2001. ISBN 80-238-6578-1.
6. Výroba jaderné energie [online]. [cit. 2011-01-03]. Jaderný reaktor. Dostupné z WWW: [http://www.jaderna-energie.cz/jaderny-reaktor.html].
7. Správa úložišť radioaktivních odpadů [online]. [cit. 2011-01-010]. Dostupné z WWW: [http://www.surao.cz/].

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Navrátil, Ph.D.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce:

25. února 2011

Termín odevzdání bakalářské práce:

23. května 2011

Ve Zlíně dne 25. února 2011

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

aěkan

L.S.

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.

ředitel ústavu

ABSTRAKT

Hlavním bodem této práce je přiblížit současný stav jaderných elektráren a úroveň bezpečnosti na počátku 21. století. Další bod práce se zabývá využitím jaderné energie a nešířením jaderných zbraní. Další body se zabývají samotnou existencí jaderných elektráren od svého vzniku po současnost s vyhlídkami do budoucna. V závěru jsou zhodnoceny jaderné havárie, bezpečnost a zabezpečení elektráren. V příloze práce jsou ilustrační animace ukazující chod nejpoužívanějších jaderných reaktorů.

Klíčová slova: jaderná energie, elektrárna, bezpečnost, havárie

ABSTRACT

Abstrakt ve světovém jazyce

The main point of this work is to explain the current status of nuclear power and safety level in the early 21st century. Another point deals with the use of nuclear energy and nuclear non-proliferation. Other points deal with the existence of nuclear power plants from beginning to the present with the prospects for the future. In conclusion are rated nuclear accidents, safety and security of power plants. In annex of work are illustrative animations showing operations of the most common nuclear reactors.

Keywords: nuclear energy, power plant, safety, accidents

Na tomto místě bych rád poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Pavlovi Navrátilovi, Ph.D., za poskytnuté konzultace, cenné rady a podnětné návrhy, které pomohly ke vzniku této práce.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně 23. 5. 2011

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	8
1 VYUŽITÍ JADERNÉ ENERGIE.....	9
2 MINULÁ, STÁVAJÍCÍ A BUDOUCÍ SITUACE JADERNÝCH ELEKTRÁREN	10
2.1 POČÁTKY JADERNÝCH ELEKTRÁREN.....	10
2.1.1 První reaktor.....	10
2.1.2 První jaderné elektrárny	11
2.2 SOUČASNÁ SITUACE	12
2.2.1 Jaderné elektrárny ve světě.....	12
2.2.2 Jaderné elektrárny na našem území.....	15
2.3 BUDOUCNOST JADERNÝCH ELEKTRÁREN.....	27
3 JADERNÁ ENERGIE	29
3.1 JADERNÉ REAKTORY.....	29
3.1.1 Typy reaktorů	31
3.2 JADERNÉ PALIVO	39
3.2.1 Uran.....	39
3.2.2 Thorium.....	40
3.2.3 Plutonium	41
3.3 JADERNÝ ODPAD	41
3.4 JADERNÉ HAVÁRIE.....	45
3.4.1 Největší jaderné havárie	46
4 STÁTNÍ ÚŘADY V ČR.....	53
5 BEZPEČNOST JADERNÝCH ELEKTRÁREN	55
5.1 KONTROLY JADERNÝCH ELEKTRÁREN V ČR.....	62
5.2 ZABEZPEČENÍ JADERNÝCH ELEKTRÁREN	64
6 GIMP	67
6.1 TVORBA ANIMACÍ.....	68
ZÁVĚR	71
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ	72
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	72
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	78
SEZNAM OBRÁZKŮ	79
SEZNAM TABULEK.....	80
SEZNAM PŘÍLOH.....	81

ÚVOD

Tato bakalářská práce má za úkol přiblížit bezpečnost jaderných elektráren, zejména se zaměřením na ČR. Měla by také poskytnout celkový přehled a užitečné informace týkajících se samotných jaderných elektráren (JE).

V současné době je téma jaderných elektráren velmi aktuální, díky nehodě v Japonsku. Společnost je rozdělena na dvě strany, kde jedna vnímá JE jako velké riziko havárie a neschopnost člověka udržet je pod kontrolou. Na druhé straně jsou lidé, kteří si uvědomují neustále zvyšující se energetické potřeby lidí a ty mohou být v budoucnu velkým problémem. Jaderná energie je jeden z perspektivních způsobů výroby elektrické energie a JE mohou na rozdíl od některých jiných druhů elektráren také přispět ke snížení vlivu člověka na klimatické změny, což je v dnešní době také velmi aktuální.

Díky složitému technologickému postupu a nechvalné minulosti jsou v tomto odvětví snad nejpřísnější vnitřní kontroly a prověrky na světě. I tyto fakta mohou za to, že se o JE v dnešní době více mluví. Jsou to ale především provozní výsledky stávajících JE, bezpečnost, konkurenceschopnost na trhu a schopnost zajistit plynulé dodávky energie, které oživují zájem o jadernou energetiku a dávají podněty k výstavbám JE v budoucnu. Technologie, které jdou stále kupředu, mají za následek to, že elektrárny jsou projektovány jako stále odolnější a bezpečnější. O to, aby vše probíhalo korektně, se stará celá řada institucí, jako např. Mezinárodní agentura pro jadernou energii (MAAE) nebo Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB).

1 VYUŽITÍ JADERNÉ ENERGIE

Použití jaderných zbraní na konci druhé světové války postavilo společnost před řešení otázky, jakým směrem se bude ubírat výzkum a vývoj v oblasti jaderné energie. Na jedné straně byly možnosti využití v oblasti energetiky, průmyslu, medicíny a zemědělství a na straně druhé možné zneužití k vojenským účelům při dalším rozvoji zbraní hromadného ničení (ZHN). Ohromný vědecko-výzkumný potenciál mnoha států hrozil, že vyvinou své vlastní ZHN. S cílem zamezení takovému vývoji byla v roce 1968 vypracována a otevřena k podpisu Smlouva o nešíření jaderných zbraní.

Smlouva o nešíření jaderných zbraní

Smlouva byla předložena k podpisu roku 1968 a v platnost vstoupila v roce 1970. Myšlenkou této smlouvy bylo, že se státy vlastníci jaderné zbraně, zaváží k jadernému odzbrojení, zatímco státy, které nevlastní jaderné zbraně, se vzdají práva je vyrábět nebo je jinak získávat. Smlouva má také velký význam pro vytváření bezjaderných zón, které zvyšují jak globální tak i regionální bezpečnost. Na rozdíl od úmluvy zakazující chemické zbraně smlouva o nešíření jaderných zbraní postrádá institucionální rámec, tj. nemá stálý sekretariát ani vlastní organizaci a neumožňuje využít žádné specifické vynucovací prostředky, kromě možnosti upozornění adresovaném Radě bezpečnosti OSN o porušení smlouvy.[3]

Smlouva brala v úvahu ničivé důsledky ZHN. Přesto uznala pět států, které už v té době vlastnili jaderné zbraně (USA, SSSR, Velká Británie, Francie a Čína) a všechny ostatní smluvní strany se zřící jejich vývoje, výroby a jakéhokoli nakládání s nimi. Československo přistoupilo ke smlouvě dne 1. července 1968. Po rozpadu bývalého Československa přistoupily ke smlouvě oba nově vzniklé státy.

V současnosti je smlouva podepsána 189 zeměmi, z nichž 5 (USA, VB, Rusko, Čína a Francie) vlastní jaderné zbraně.

Jedinými státy, které smlouvu nepodepsaly, jsou Indie, Izrael a Pákistán. Dále sem patří Severní Korea, která sice smlouvu nejdříve podepsala, ale v roce 2003 odstoupila. Všechny tyto státy také vlastní jaderné zbraně.

První jaderná ponorka, nesoucí jméno Nautilus, byla vyrobena v USA, v roce 1955. O pohon ponorky Nautilus se staral tlakovodní reaktor s výkonem 10MW. Patřila

námořnictvu USA a byla první plavidlo, které dokončilo plavbu pod Severním pólem. Ponorka aktivně sloužila do roku 1980, ale dodnes je používána jako muzeum.[37]

2 MINULÁ, STÁVAJÍCÍ A BUDOUCÍ SITUACE JADERNÝCH ELEKTRÁREN

Za vznikem jaderných elektráren stojí spousta zásadních objevů ve fyzice od různých vědců. Jako příklad se může uvést:

- Wilhelmem Conradem Röntgenem, který objevil v roce 1895 rentgenové záření
- Antoine Henri Becquerel, který v roce 1896 objevil radioaktivní záření uranových solí (přírodní radioaktivita)
- Ernest Rutherford, který v roce 1911 objevil, že atom má kladné jádro
- Ernest Lawrence, který v roce v roce 1931 zkonstruoval první kruhový urychlovač částic (cyklotron)
- James Chadwick, který v roce 1932 objevil neutron

Jistý podíl na tom má i druhá světová válka, která světu ukázala hroživou sílu řetězové štěpné reakce, ve formě atomových bomb. Tyto bomby, které byly sestrojeny USA, byly použity v roce 1945.

2.1 Počátky jaderných elektráren

2.1.1 První reaktor

V roce 1942 byl postaven první jaderný reaktor Enricem Fermim.

Enrico Fermi se narodil 29. září 1901 v Římě a o fyziku měl zájem už od útlého věku. Studoval na univerzitě v Pise a poté v Německu. V roce 1926 se stal profesorem teoretické fyziky na univerzitě v Římě. V roce 1932 se seznámil s pracemi Jamese Chadwicka (objevitele neutronu) a rozhodl se navázat na jeho pokusy.

Nejvýznamnějšího úspěchu dosáhl v roce 1934, když objevil umělou radioaktivitu vyvolanou bombardováním jader neutrony, poukázal na význam zpomalení neutronů při této jaderné reakci, našel experimentální metody zpomalení a vypracoval teorii tohoto efektu. Za tuto práci mu byla udělena v roce 1938 Nobelova cena. Po převzetí ceny se už

do Itálie nevrací, emigruje kvůli fašismu do USA. V letech 1939 - 42 byl profesorem Columbia Univerzity, od roku 1942 byl profesorem v Chicagu. V letech 1944 - 45 se zúčastnil vývoje atomové pumpy. Po skončení druhé světové války se věnoval fyzice vysokých energií a kosmickému záření. Zemřel v Chicagu 28. listopadu 1954.

Spuštění reaktoru

Dne 2. prosince 1942 byl spuštěn první jaderný reaktor. Jako palivo byl použit čistý uran, jako moderátor grafit a jako absorbátor kadmiové tyče. Průběh experimentu, kterého se zúčastnilo 14 vědců, byl v nejvyšší možné míře utajen. Z celé akce nebyly dokonce ani pořízeny fotografie. První reakce byla zastavena po 28 minutách. Byl to opravdu odvážný čin, protože i přes všechny výpočty si nikdo nemohl být na 100 % jistý výsledkem experimentu. Reaktor CP-1 sloužil k výzkumům ještě 2 měsíce. Pak byl rozmontován, převezen do laboratoří poblíž Chicaga a po doplnění ochranným radiačním štítem pracoval dále pod označením CP-2.

2.1.2 První jaderné elektrárny

Ve světě

Elektrický proud v jaderném zařízení byl poprvé vyroben v prosinci roku 1951 na zkušební stanici reaktorů v USA. Byly použity 2 druhy palivových článků: přírodní a vysoce obohacený uran. Elektrický výkon činil pouhých 170kW.

Za počátek jaderné energetiky je považován rok 1954. V tomto roce byla v SSSR v Obninsku u Moskvy uvedena do provozu první průmyslová JE na světě. Elektrický výkon elektrárny byl 5MW. Jako palivo byl použit mírně obohacený uran, moderátorem byl grafit a chladivo obstarala obyčejná voda. Vyrobená elektrická energie byla určena pro veřejnou síť. Tato elektrárna byla v provozu skoro 48 let, odstavena byla 29. dubna 2002.

V roce 1956 ve VB zahájila provoz jaderná elektrárna v Calder Hallu, která měla 4 bloky. Jako palivo byl použit přírodní uran, moderátorem byl grafit a na chlazení se použil oxid uhličitý. Elektrický výkon každého bloku činil 50 MW. Hlavním cílem však byla výroba plutonia pro atomové bomby, kdežto výroba elektrické energie byla vedlejší produkt.

První komerční JE v USA byla uvedena do provozu v roce 1953 u Pittsburghu. Původní výkon elektrárny byl 60MW. V aktivní zóně byly použity 2 druhy palivových článků: přírodní a vysoce obohacený uran, chladivem i moderátorem byla voda.

V Československu a v ČR

Historicky první JE u nás byla československá JE v Jaslovských Bohunicích, která se dodnes nachází na Slovensku. Jedná se v podstatě o tři JE s celkem 5 reaktory, postupně postavené v jedné lokalitě. Jednotlivé části jsou označovány zkratkami A-1 (jeden reaktor), V1 (dva reaktory) a V2 (dva reaktory). JE A-1 byla uvedena do provozu v roce 1972. Byl zde těžkovodní reaktor chlazený oxidem uhličitým. Provoz byl doprovázen závadami a v roce 1977 byl ukončen. Výstavba V1 začala v srpnu 1972 a do komerčního provozu byly uvedeny v letech 1980 a 1981. První z nich byl odstaven v prosinci 2006 a druhý reaktor v prosinci 2008, jako jedna z podmínek vstupu Slovenska do Evropské unie[1]. Výstavba V2 začala v roce 1976. Do komerčního provozu byly uvedeny v roce 1984 a 1985. Fungují dodnes. [8]

Další JE, která se v ČR postavila, je Dukovany. Historie sahá až do počátku 70. let, kdy tehdejší Československo a Sovětský svaz v roce 1970 podepsaly mezivládní dohodu o výstavbě. První reaktorový blok byl uveden do provozu v květnu 1985, poslední čtvrtý blok v červenci 1987. Maximálního projektového výkonu 1760 MW dosáhla elektrárna v červenci 1987. Více než 80 % použitých zařízení bylo vyrobeno v ČR.[9]

Nejnovější JE v ČR se nachází v Temelíně, nedaleko Českých Budějovic. Investiční záměr stavby byl vydán už v roce 1979, vlastní stavba objektů pak byla zahájena v roce 1987. Po listopadu 1989 bylo rozhodnuto, že počet bloků se zredukuje ze 4 na 2. Stavba byla dokončena v roce 2000. V dnešní době se uvažuje o dostavbě zbylých dvou bloků.

2.2 Současná situace

2.2.1 Jaderné elektrárny ve světě

K 13. 4. 2011 bylo ve světě podle statistik WNA (World Nuclear Association – Světová jaderná asociace) v provozu 440 jaderných reaktorů s celkovou instalovanou kapacitou 375,410 MW. Celosvětově tyto reaktory vyrábějí skoro 14 % světové elektřiny. Ve výstavbě je jich 63 ve 14 zemích. Plánuje se výstavba dalších 158 reaktorů. Celkem se ve světě předběžně uvažuje o vybudování 326 reaktorů, jejichž instalovaný výkon dosáhne téměř 377 000 MW. [5]

Některé státy do teď nevyužívaly jádro k výrobě elektrické energie nebo elektrárny zavřeli.

Nyní se navrhuje a plánují nově výstavby, konkrétně ve státech:

- Bangladéš, kde jsou navrhované 2 reaktory
- Bělorusko, kde jsou 2 reaktory už naplánované a další 2 se navrhují
- Egypt, který 1 reaktor plánuje a další se navrhuje
- Indonésie, kde 2 reaktory jsou už naplánované a další 4 se navrhují
- Irán, kde je 1 reaktor ve výstavbě, 2 se plánují a ještě jeden se navrhuje
- Izrael, tady se zatím jen navrhuje první reaktor
- Itálie měla 4 jaderné reaktory, které postupně zavřela, poslední 2 po černobylské havárii, v Itálii je teď asi 10% elektřiny vytvořené jádrem, vše import, což se má změnit, protože vláda plánuje postavit 10 nových reaktorů a tím do roku 2030 pokrýt až 25% veškeré spotřeby
- Jordánsko, které zatím plánuje 1 reaktor
- Kazachstán, WNA uvádí, že má 15% světových zdrojů uranu, v roce 2009 se stal největším producentem uranu, s téměř 28% celkové produkce, Kazachstán už měl jeden reaktor jaderné elektrárny v provozu v letech 1972 – 1999, nyní plánuje 2 menší reaktory a další 2 se navrhují
- Malajsie, kde se zatím jen navrhuje první reaktor
- Polsko, které plánuje 6 reaktorů
- Thajsko, kde se 2 plánují a uvažuje se o dalších 5
- Turecko, které 4 reaktory plánuje a o dalších 4 uvažuje
- SAE, kde se plánují 4 reaktory a o 10 se uvažuje
- Vietman, kde se 2 reaktory plánují a o dalších 12 se uvažuje

Spousta zemí se také snaží nahradit jiné elektrárny jadernými a staví a plánují další, aby měli dostatek energie pro průmysl i v budoucnu. Typickým příkladem je Čína, která má 13 fungujících reaktorů, dalších 27 ve výstavbě, 50 naplánovaných a dokonce o dalších 110 uvažuje. Další budoucí jaderná velmoc by mohla být Indie, která má zatím 20 reaktorů, 5 ve výstavbě, dalších 18 plánuje a o dalších 40 uvažuje. A Rusko, které má 32 jaderných reaktorů v provozu, staví dalších 10, 14 má v plánu a o dalších 30 se zatím uvažuje.

Využití jádra hraje významnou roli také v EU, kde JE produkují přibližně jednu třetinu vyrobené elektřiny.

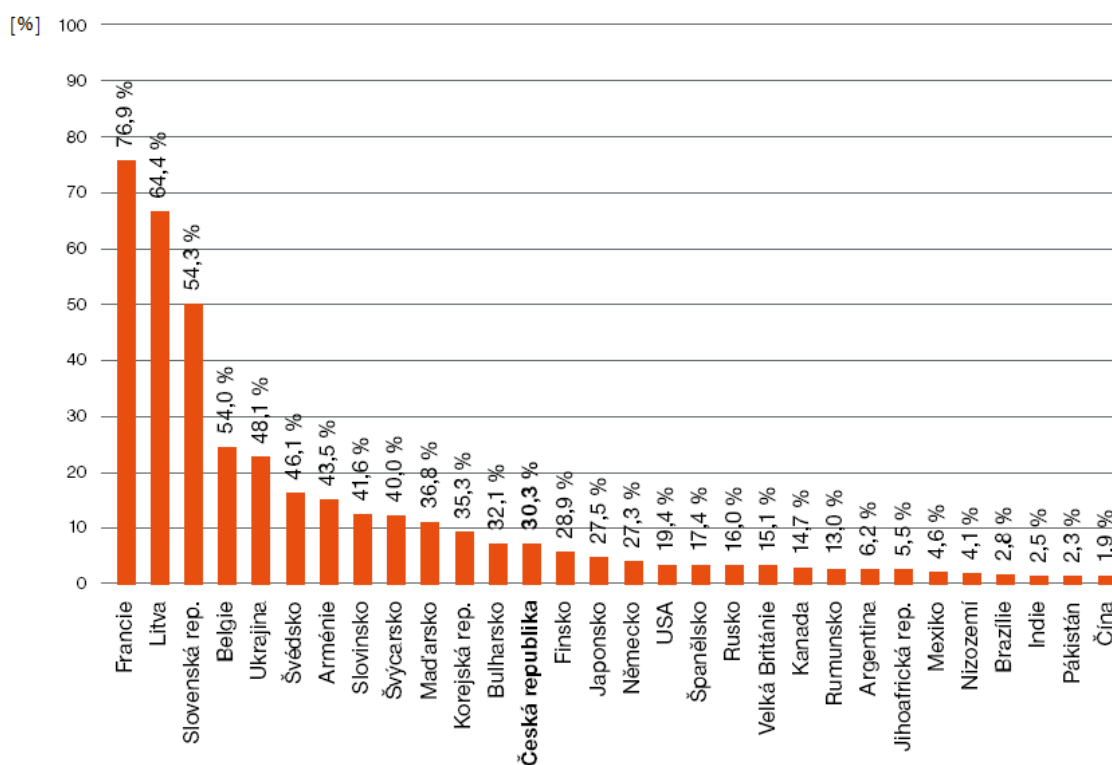
K 13. 4. 2011 bylo nejvíce jaderných reaktorů provozováno v USA (104), ve Francii (58), Japonsku (51), Rusku (32), Jižní Koreji (21), Velké Británii (19), Indii (19), Kanadě (18), a Německu (17). V zemích EU se většinou používají tlakovodní reaktory PWR (65 %), co do četnosti jsou na druhém místě varné reaktory BWR (22 %). Využívány jsou také reaktory těžkovodní, grafitové, plynem chlazené, rychlé a další typy.[5]

Tab. 1. Výroba elektřiny v ČR [27]

Typ elektrárny	Jednotka	2005	2006	2007	2008	2009 ¹⁾
parní a paroplynové	GWh	54 789	54 992	59 367	54 319	51 666
jaderné	GWh	24 728	26 046	26 172	26 551	27 208
spalovací	GWh	13	17	8	14	16
vodní	GWh	3 027	3 257	2 524	2 376	2 983
větrné	GWh	21	49	125	245	288
solární	GWh	0	0	2	13	89
celkem	GWh	82 578	84 361	88 198	83 518	82 250

¹⁾předběžný údaj

V průběhu posledních 15 let se výroba elektřiny v jaderných elektrárnách celosvětově zvýšila o více než 660 milionů kWh ročně. Příčinou je zejména výroba v nových zdrojích, rekonstrukce zdrojů současných, zvyšování výkonu a snižování poruchovosti. Novými metodami oprav, kontrol zařízení a lepší organizací práce se zkrátil také čas potřebný pro výměny paliva – jaderné elektrárny tak mají kratší dobu odstávek na výměnu paliva. Dnešní jaderné elektrárny dosahují průměrné hodnoty využití celosvětově okolo 84 %. Ve vyjádření z hlediska hodin provozu v přepočtu na jmenovitý výkon ročně vykazují jaderné elektrárny 8 000 hodin za rok, zatímco uhelné pouze 7 000 a plynové ještě méně. Větrné elektrárny fungují pouze 1 až 3 tisíce hodin ročně, v závislosti na počasí.[6]



Obr. 1. Podíl jaderné energie na výrobě elektřiny v roce 2007 [28]

2.2.2 Jaderné elektrárny na našem území

Jaderné elektrárny mají u nás pevné zastoupení, což potvrzuje tabulka (Tab. 2.). Podíl na výrobě elektrické energie činil k 13.4.2011 33,8 %. [5]

Tab. 2. Celkový nainstalovaný výkon elektráren v ČR

Typ elektrárny	Jednotka	2005	2006	2007	2008	2009 ¹⁾
parní a paroplynové	MW	11 428	11 477	11 449	11 510	11 598
jaderné	MW	3 760	3 760	3 760	3 760	3 830
spalovací	MW	29	51	60	58	59
vodní	MW	2 166	2 175	2 175	2 192	2 181
větrné	MW	29	44	114	150	193
solární	MW	0	1	4	54	465
celkem	MW	17 412	17 508	17 562	17 724	18 326

¹⁾ předběžný údaj

Ústav jaderného výzkumu Řež a.s.

Ústav jaderného výzkumu (ÚJV) byl založen 10. června 1955, pod názvem Ústav jaderné fyziky a umožňoval výzkumnou činnost v oboru jaderné fyziky, radiochemie a jaderné energetiky. Byly zde postaveny hlavních experimentálních zařízení jako jaderný reaktor VVR-S, cyklotron aj. První etapa budování byla dokončena v roce 1962. [7]

Hlavní oblasti výzkumně vývojového programu byly jaderné reaktory typu VVER, materiály pro jaderné reaktory a pro palivové články. Dále to byla jaderná bezpečnost, technologie přepracování vyhořelého paliva, aplikace radiační chemie v radiační technologii, vývoj a výroba radiofarmak, neutronová aktivační analýza a v neposlední řadě kontrola a evidence jaderných materiálů ve spolupráci s Mezinárodní agenturou pro atomovou energii ve Vídni. [7]

V prosinci roku 1993 byl ústav privatizován na akciovou společnost s obchodním názvem Ústav jaderného výzkumu Řež a.s. Koncem roku 1994 byl zřízen Úsek podpory Státního úřadu pro jadernou bezpečnost.

Ústav v současnosti poskytuje široký rozsah expertíz a služeb nejen provozovatelům jaderných elektráren v ČR, ale i v zahraničí (Francie, Belgie, Slovensko, Ukrajina, Arménie). Podporuje centrální orgány ČR v oblasti strategického řízení energetiky a nakládání s radioaktivními odpady. Dále zajišťuje rozvoj využití ionizujícího záření a ozařovacích služeb pro základní a aplikovaný výzkum, zdravotnictví a průmysl aj. Poskytuje výzkum a služby pro likvidaci radioaktivních odpadů a v neposlední řadě provádí školení a výcvik odborných a vědeckých pracovníků. Kromě toho ÚJV působí v mnoha mezinárodních projektech a i v nejaderných oblastech, jako např. klasická energetika, chemický průmysl a ochrana životního prostředí.

V ústavu se nachází 2 jaderné reaktory a experimentální smyčky (olovo- lithiová, superkritická vodní a vysokoteplotní héliová), ve kterých zkoumá použití chladících médií pro budoucí reaktory. V současné době se připravují ještě další experimenty v rámci vývoje reaktoru čtvrté generace. Zajímavostí je, že kromě nespočetného množství kamer, které objekt hlídají, je zde i jedna kamera MAAE.

Reaktor LVR – 15

LVR-15 je výzkumný lehkovodní reaktor umístěný v beztlakové nádobě pod stínícím víkem a s provozním tepelným výkonem 10 MW.



Obr. 2. Reaktor LVR-15 [33]

Reaktor je provozován od roku 1989, kdy byla dokončena přestavba. Předchůdcem reaktoru LVR-15 byl výzkumný reaktor VVR-S o jmenovitém tepelném výkonu 2 MW. Přestavba zahrnovala výměnu všech technologických zařízení. Původní nádoba byla hliníková, nová nádoba je již z nerezové oceli a její životnost by měla být 30 let. Horizontální kanály, nosná deska aktivní zóny a plášť aktivní zóny je vyroben z hliníku o čistotě 99 %. Nosná litinová deska, která je upevněna v šachtě reaktoru, zůstala po rekonstrukci VVR-S na LVR-15 beze změny. Stínění reaktoru v radiálním směru je tvořeno vrstvou vody o šířce 0,8 m, vrstvou litiny o tloušťce 0,2 m a vrstvou těžkého betonu tloušťky 2,3 m. Reaktor je provozován po kampaních, jedna kampaň trvá 3 týdny, pak je reaktor týden odstaven a probíhá přestavba aktivní zóny a s tím spojené činnosti. [33]

Základní parametry: vnější průměr: 2300 mm,

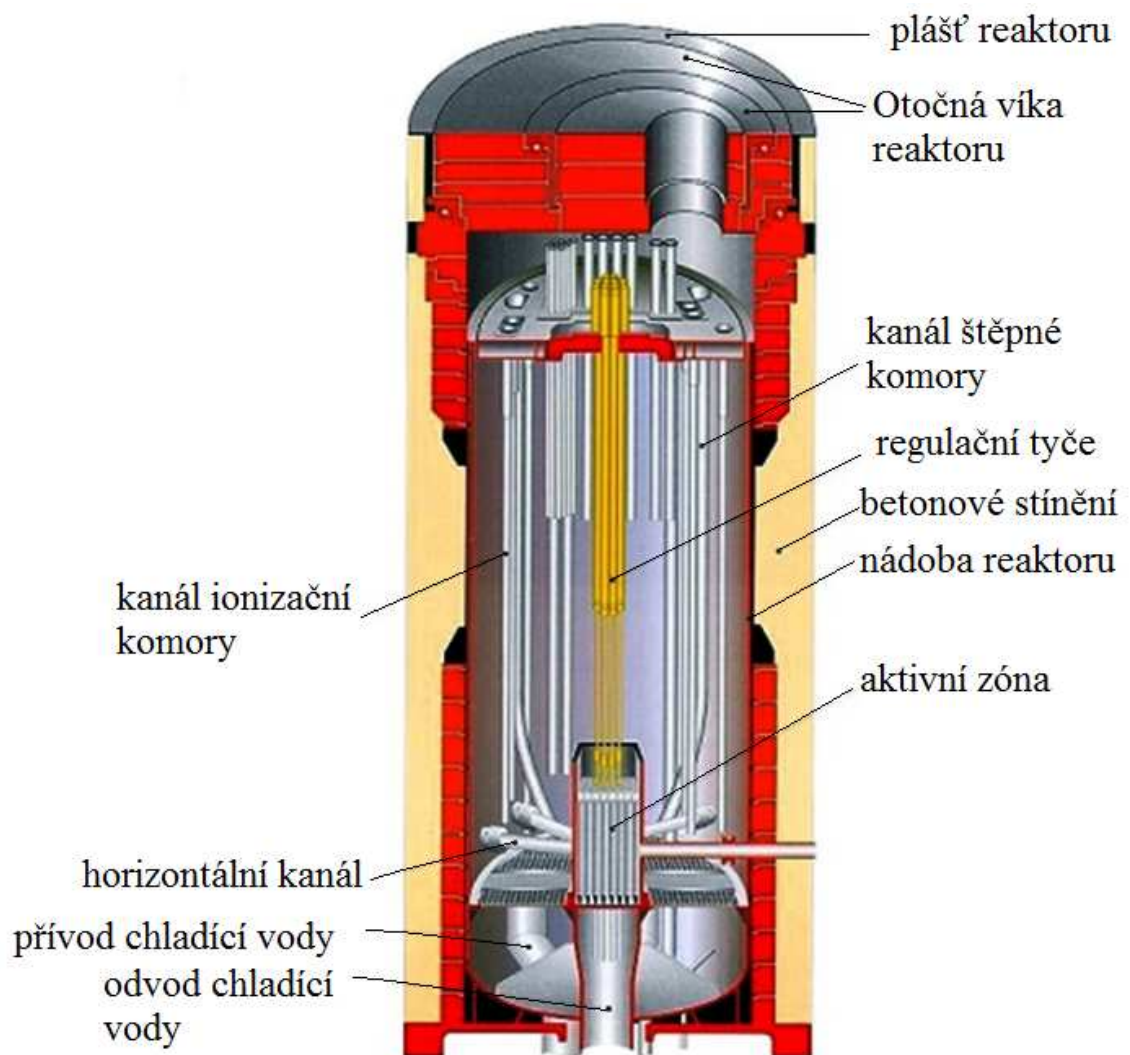
výška: 5760 mm,

tloušťka stěny: 15 mm,

tloušťka dna: 20 mm,

objem vody v nádobě: 22m³

hmotnost nádoby bez vody: 7900 kg



Obr. 3. Řez reaktorem LVR-15 [33]

Chlazení v reaktoru je realizované tak, že generované teplo je odváděno přes 3 chladicí okruhy do řeky Vltavy. Primární chladicí okruh je osazen 5 hlavními cirkulačními čerpadly a 2 čerpadly pro nouzové dochlazování připojenými na akumulátory, které zajišťují průtok chladicí demineralizované vody aktivní zónou a tepelnými výměníky. Při výpadku vnějšího

napájení reaktoru je dochlazování aktivní zóny realizováno jedním hlavním čerpadlem a jedním čerpadlem pro nouzové dochlazování, každé z nich je napájeno ze samostatného dieselgenerátoru.

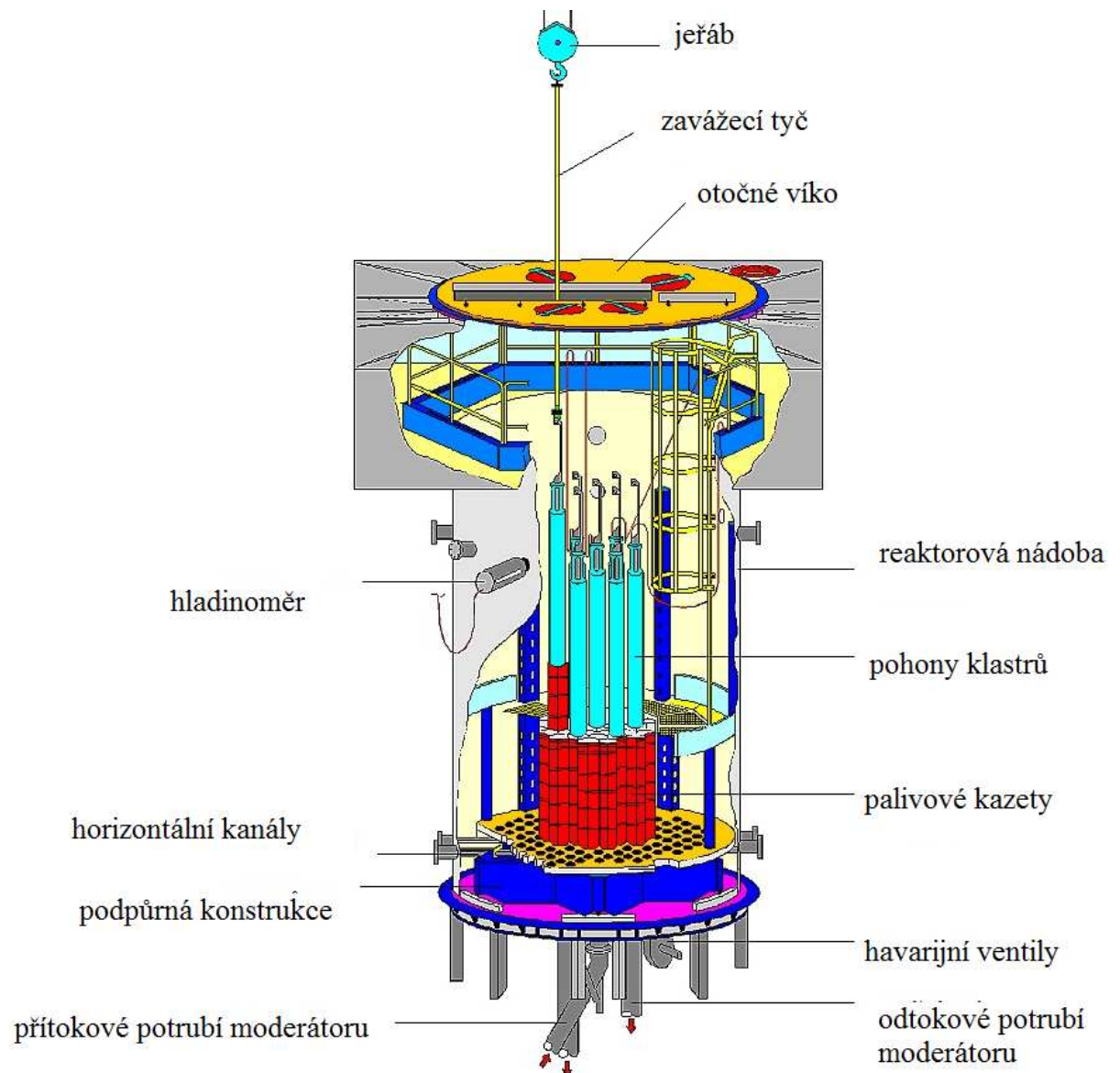
V prosinci 2001 byla na reaktoru provedena mise INSARR (Integrated Safety Assessment of Research Reactor) od MAAE, jejímž výsledkem bylo dodržení doporučení MAAE pro bezpečnost výzkumných reaktorů. V roce 2002 skončila platnost povolení provozu reaktoru, v dubnu 2003 byl provoz od SÚJB povolen do roku 2014. Prodloužení provozu reaktoru je možné až do roku 2028. [7]

Kvůli možným záplavám se reaktor nachází v prvním patře.

Reaktor LR – 0

Reaktor LR-0 je lehkovodní experimentální reaktor s nulovým výkonem. Do trvalého provozu byl uveden v roce 1983. Poskytuje vědecko-technickou základnu pro experimenty v oblasti fyziky aktivní zóny a stínění lehkovodních reaktorů typu VVER (Temelín, Dukovany a další reaktory ruské konstrukce), PWR a experimenty související se skladováním vyhořelého paliva z JE. Reaktor byl zkonstruován univerzálním způsobem vhodným pro realizaci fyzikálních experimentů v aktivních zónách VVER, tzn. široký rozsah počtu kazet, obohacení paliva, různá koncentrace kyseliny borité v moderátoru aj. Důležitou součástí výzkumu je modelování a experimentální ověřování radiačního poškození materiálů reaktorových nádob VVER.

Nádoba reaktoru je umístěna v betonovém stínícím bunkru. Skládá se ze dvou částí vyrobených z hliníku o čistotě nejméně 99,5%. Spodní válcová část má šířku 3,5 m a výšku 6,5 m, stěny mají tloušťku 16 mm, dno 25 mm. Horní čtvercová část má rozměry 6 x 6 m, výšku 1,5 m a je se spodní částí svařena v jeden celek. Vnější válcová část nádoby je zastíněna 1 mm silnými kadmiovými plechy a celá nádoba je zakryta odnímatelnou tepelnou izolací. Reaktor do současné doby slouží hlavně pro výzkum aktivních zón, skladovacích mříží a modelových experimentů reaktorů typu VVER-1000 a VVER-440. [34]



Obr. 4. Řez reaktorem LR-0 [34]

Jaderná elektrárna Temelín

Jaderná elektrárna Temelín (JET) leží přibližně 24 km od Českých Budějovic. Elektřina je vyráběna ve dvou výrobních blocích s tlakovodními reaktory VVER 1000 a je to elektrárna s největším nainstalovaným výkonem v ČR. Stavba byla dokončena v roce 2000. V původních plánech se počítalo se čtyřmi bloky, nakonec byly schváleny jen dva. V dnešní době se uvažuje o dostavbě zbylých dvou bloků [6]



Obr. 5. Jaderná elektrárna Temelín [38]

Lokalita Temelína byla určena na základě řady bezpečnostních, technických i ekonomických kritérií. Blízkost Vltavy a vodního díla Hněvkovice zajišťuje dostatek vody pro chlazení, díky poměrně vysoké nadmořské výšce však elektrárna nemůže být ohrožena povodní. V bezprostřední blízkosti nejsou ani žádná velká průmyslová zařízení, s výjimkou plynovodu, ani frekventované transportní cesty.

Prostor nad jadernou elektrárnou je zakázaným prostorem pro letadla. Tento zákaz je vyhlášen do celého světa Letovou informační příručkou. Nejbližší letecká cesta je vzdálena 18km od elektrárny. Vojenské letiště v Bečyni (18km od JET) bylo zrušeno a na vojenském letišti v Českém Budějovicích je pouze malý, nepravidelný provoz. Letecký provoz samozřejmě nemá na chod JE žádný vliv. [26]

Historie

O výstavbě JE v okolí Temelína bylo rozhodnuto po expertním výběru stavenišť pro 4 bloky VVER 1000 v roce 1980. Roku 1982 byla uzavřena smlouva na dodávku sovětského technického projektu. Tento projekt zahrnoval reaktorovnu, budovu aktivních a pomocných provozů a budovy dieselgenerátorových stanic. Samotná stavba provozních objektů byla zahájena v únoru 1987, přestože přípravné práce byly zahájeny už v roce 1983. Původní

sovětský projekt byl postupně vylepšován československými odborníky. Generálním dodavatelem byla akciová společnost Škoda Praha, která zásobuje elektrárnu dodnes.

Po listopadu 1989 došlo k přehodnocení potřeby výkonu 4000 MW v České republice. Vláda ČR roku 1993 rozhodla o dostavbě JE Temelín v rozsahu dvou bloků. V roce 2000 byla stavba dokončena a bylo zavezeno palivo do reaktoru. 21. prosince 2000 vyrobil první blok první elektřinu. V červnu 2002 bylo zavezeno palivo pro druhý blok a v srpnu 2002 byla zahájena reakce. K rozvodné síti byl druhý blok poprvé připojen v prosinci 2002 a zkušební provoz začal v dubnu 2003. V listopadu 2006 byl Temelín zkolaudován a rozhodnutí nabylo právní moci. [6]

Hlavní objekty

Budova reaktoru

Skládá se z hermetického prostoru skládající se z hermeticky uzavřeného prostoru, což je kontejnment a vnitřní konstrukce a nehermetického prostoru skládajícího se ze základové části, obestavby a ventilačního komína.

Kontejnment

Kontejnment je jedna z bezpečnostních bariér JE, tvoří hranici hermetické zóny. Jsou zde umístěny nejdůležitější části jaderné elektrárny - celý primární okruh a další bezpečnostní a pomocná zařízení.

Železobetonová konstrukce je vysoká 56 metrů. Stěny válce jsou silné 1,2 metru, konstrukce kopule má 1,1 metru. Vnitřní průměr kontejnmentu je 45 metrů. Vnitřní povrch kontejnmentu je pokryt 8 mm silnou vrstvou nerezové oceli, která hermeticky uzavírá vnitřní prostor kontejnmentu a tak brání úniku radionuklidů do okolí. Trvalé udržování podtlaku uvnitř kontejnmentu umožňuje v případě malých úniků radioaktivity její ofiltrování a nízkoaktivní zbytek kontrolovaně odvést do ventilačního komína. Vypnutí systému ventilace při větších haváriích umožňuje lokalizovat radioaktivitu uvnitř kontejnmentu. Konstrukce je provedena z předpjatého betonu. Předepnutí je provedeno ocelovými předepínacími lany, která procházejí celou konstrukcí kontejnmentu. [26]

tloušťka stěny kopule: 1,1 m

tloušťka ocelové výstelky: 8 mm

Budova aktivních pomocných provozů

Budova je tvořena třemi objekty, které plní společné funkce pro oba výrobní bloky JE. První objekt je používán ke skladování čerstvého paliva a jsou zde dílny sloužící k opravám technologických zařízení primárního okruhu JE. Druhý objekt je určen pro personál. Kromě šaten a sprch pro personál je zde umístěna i radiochemická laboratoř a dozorná radiační kontroly. Třetí objekt obsahuje technologické systémy na speciální čištění radioaktivních vod, systémy na zpracování a úpravu kapalných a pevných radioaktivních odpadů. [6]

Strojovna

Ve strojovně se nachází hlavní zařízení sekundárního okruhu. Nejdůležitějším zařízením je turbogenerátor o výkonu 1000 MW, jehož hlavní komponenty jsou parní turbína, elektrický generátor. Parní turbína je tvořena jedním vysokotlakým a třemi nízkotlakými díly.

Budova ústřední elektrické dozorny

V budově se nachází pracoviště směnového inženýra, ústřední elektrická dozorna a informační systém elektrárny. Směnový inženýr řídí provoz elektrárny prostřednictvím směnového personálu a personálu blokových dozoren, které jsou umístěny v reaktorovnách. Z ústřední elektrické dozorny je řízen a kontrolován také provoz elektrozařízení a provoz uzlu rezervního napájení obou hlavních výrobních bloků. Pro potřeby směnového inženýra je z ní zprostředkován styk elektrárny s dalšími pracovišti.

Dieselgenerátorové stanice

Pro případ ztráty hlavního i rezervního elektrického napájení vlastní spotřeby elektrárny, je elektrárna vybavena nouzovými zdroji elektrické energie, dieselgenerátory. Tyto zdroje jsou schopny elektricky napájet systémy, které jsou důležité z hlediska jaderné bezpečnosti. Každý je schopen vytvořit podmínky pro bezpečné odstavení reaktoru, dochlazení a pro jeho udržení v bezpečném stavu. Každý výrobní blok má k dispozici 3 dieselgenerátory, které jsou umístěny po dvou ve stanici.

Hlavní komponenty a systémy primárního okruhu

Základní parametry primárního okruhu:

- tepelný výkon reaktoru 3000 MW
- teplota chladiva při vstupu do reaktoru 290 °C
- teplota chladiva při výstupu z reaktoru 320 °C
- pracovní tlak chladiva 15,7 MPa
- objemový průtok chladiva reaktorem 23,5 m³/s
- objem chladiva v primárním okruhu 337 m³

Reaktor

Vnitřní části reaktoru jsou umístěny v tlakové nádobě. Je 11 m vysoká a vnější průměr je 4,5 m. Tloušťka stěny její válcové části je 193 mm. Nádobu je navržena na tlak 17,6 MPa při teplotě 350 °C a je vyrobena z vysoce kvalitní nízkoalokované chrom - nikl - molybden - vanadové oceli. Byla vyrobena ve ŠKODĚ JS Plzeň speciální technologií s cílem zajistit požadovanou radiační odolnost materiálu tlakové nádoby. Ke sledování křehnutí tlakové nádoby v důsledku působení neutronového záření jsou v reaktoru umístěny speciální vzorky materiálu, které se pravidelně měří a hodnotí. Odnímatelné víko reaktorové nádoby je k válcové části připevněno hydraulicky předepjatými svorníky, jejichž těsnost je nepřetržitě monitorována. Vnitřní části reaktoru tvoří šachta aktivní zóny, boční plášť a blok ochranných trubek. [6]

Parogenerátor

Parogenerátor je horizontální válcový výměník, dlouhý 14,8 m s vnějším průměrem v rozmezí 4,2 - 4,5 m, tlak je zde 6,3 MPa a teplota 278,5 °C. V JET se nachází 4 parogenerátory. Parogenerátory jsou vyrobeny z nízkoalokované konstrukční oceli. Teplosměnné trubky jsou vyrobeny z chromniklové korozivzdorné oceli. Parogenerátory pro JE Temelín vyrobila firma VÍTKOVICE, a.s. [26]

Hlavní cirkulační čerpadla

Hlavní cirkulační čerpadla jsou v JET 4, každé na jedné ze čtyř cirkulačních smyček, zabezpečující cirkulaci chladiva primárního okruhu, které odvádí teplo z reaktoru do parogenerátoru. Každé čerpadlo je vysoké 11,9 m, příkon za nominálního provozu je 5,1 MW. Bezporuchový provoz čerpadel zabezpečují pomocné okruhy, např. olejové hospodářství, těsnicí voda, autonomní okruh chlazení atd.

Kompenzátor objemu

Kompenzátor zajišťuje vyrovnávání objemové a tlakové změny v chladivu primárního okruhu. Je to nádoba o neoddělitelně připojená k primárnímu okruhu. Ze dvou třetin je zaplněn chladivem primárního okruhu, zbytek tvoří pára. Tlak v primárním okruhu je určen tlakem páry v horní části kompenzátoru objemu. Při poklesu tlaku v primárním okruhu se zapínají elektrické ohřívače umístěné ve spodní části kompenzátoru objemu. Tím se zvětší objem páry v horní části kompenzátoru objemu a v důsledku toho i tlak v primárním okruhu. Při vzrůstu tlaku v primárním okruhu nad stanovenou hladinu je do činnosti uveden sprchový systém v horní části kompenzátoru. Jeho provozem se zmenší objem páry v parní části kompenzátoru a následně se sníží tlak v primárním okruhu. [26]

Jaderná elektrárna Dukovany

Jaderná elektrárna Dukovany se nachází 30 km jihovýchodně od Třebíče, u obce Dukovany. V elektrárně jsou ve dvou dvojblocích instalovány čtyři tlakovodní reaktory typu VVER 440. Tři z bloků mají elektrický výkon 460 MW, jeden disponuje výkonem o hodnotě 500 MW. Jaderná elektrárna Dukovany je první provozovanou jadernou elektrárnou v České republice a patří mezi největší, vysoce spolehlivé a ekonomicky výhodné energetické zdroje v ČR. Roční výroba elektrické energie se pohybuje okolo 13,5 TWh, což představuje asi 20 % z celkové spotřeby elektřiny v České republice. [6]

První reaktorový blok Jaderné elektrárny Dukovany byl uveden do provozu v roce 1985, druhý a třetí v r. 1986 a čtvrtý v roce 1987. Reaktory dodala Škoda Plzeň, parogenerátory Vítkovice.

V areálu elektrárny se nachází sklad použitého jaderného paliva a úložiště nízko a středně radioaktivních odpadů, kde koncem roku 2008 bylo zaplněno 13 jímek ze 112, tj. necelých 13 %. V současnosti se řadí JE Dukovany mezi pětinu nejlépe provozovaných jaderných elektráren na světě. Náklady na výstavbu elektrárny (25 miliard korun) se už dvakrát zaplatily a přitom vyrábí nejlevnější proud v ČR: 1 kWh za 0,60 Kč. Elektrárna splňuje všechny předpoklady pro bezpečný a spolehlivý provoz po dobu 40 let, přičemž lze v závislosti na technickém a ekonomickém vývoji očekávat i další prodloužení životnosti i na 60 let. [39]

2.3 Budoucnost jaderných elektráren

Reaktory v budoucnu by měly umožnit ještě intenzivnější využití jaderné energetiky, tedy větší účinnost, ale zároveň by měli řešit i ekologii. Od toho se odvíjejí požadavky. Ty se však nevztahují jen na reaktor, ale i na další komponenty nutné pro transformaci tepelné energie na elektrickou a v neposlední řadě i pro recyklaci vyhořelého paliva. Zásadní je samozřejmě bezpečnost jaderného reaktoru a samotné jaderné energetiky. Tedy to, aby se eliminovali možnosti úniku štěpného materiálu do ovzduší nebo pro výrobu jaderné zbraně. Dalším důležitým faktorem je ekonomika provozu jaderných elektráren a jejich konkurenceschopnost na trhu s ostatními zdroji energie. S tím souvisí i životnost a možná doba provozování jaderného reaktoru, kde každé zvýšení doby provozování zvyšuje i ekonomickou výhodnost. Pro dlouhodobé provozování jaderné energetiky je důležité zajistit pro reaktory dostatek paliva. Jako vynikající náhražka uranu, který bude v průběhu pár desítek let vytěžen, se rýsuje thorium. Je důležité zajistit co nejlepší vyhoření paliva a zajistit co nejmenší objem jaderného odpadu, který po provozování jaderné energetiky zůstane. Důležitou vlastností je také práce při velmi vysoké teplotě (od 510 °C do 1000 °C), která umožní co nejefektivnější výrobu elektrické energie i velice efektivní produkci vodíku, který se v drtivé většině (přes 96 %) vyrábí z fosilních paliv. Dalším důležitým prvkem bude snaha o jednoduchou konstrukci s jasně předvídatelným chováním. Důraz bude kladen na pasivní bezpečnostní prvky založené na jednoduchých fyzikálních principech srozumitelných i neodborníkům.

Reaktory budoucnosti (IV. generace)

Reaktory s velmi vysokou teplotou

Reaktory pracující s moderovanými neutrony. Jako moderátor se plánuje využití uhlíku. Jako chladivo by mělo být využito helium. Reaktor by pracoval při velmi vysoké teplotě, zhruba 1000 °C. Ta by umožnila jeho využití k produkci vodíku i pomocí termochemických metod. Při jeho konstrukci lze vycházet ze zkušeností získaných při konstrukci a provozování britských plynem chlazených reaktorů s grafitovým moderátorem Magnox a AGR. Ty však pracovaly při daleko nižší teplotě a s jiným plynem jako chladivem. Hlavně se tak bude navazovat na zkušenosti s provozem experimentálních vysokoteplotních reaktorů chlazených plynem a testů jejich použití pro produkci tepla a elektrické energie. Ovšem požadavek, aby systém pracoval při teplotách okolo zmíněných 1000 °C znamená radikální skok v nárocích na kvalitu použitých materiálů. Sedm členských zemí fóra pro generaci IV podepsalo v listopadu 2006 dohodu o střednědobém plánu vývoje potřebných technologií. Optimalizace systému a jeho vlastností by měla být dokončena v roce 2015. Nepočítá se s využitím přepracovaného vyhořelého jaderného paliva. Reaktor by mohl být k dispozici před rokem 2030. [47]

Lehkovodní reaktory s nadkritickými stavy páry

Jedná se opět o klasické reaktory s moderovanými neutrony. V tomto případě se jako moderátor i chladicí medium používá voda v superkritické (nadkritické) fázi. Při přechodu na nadkritické stavy páry se PWR a BWR fakticky spojují do jedné koncepce. Voda vstupuje do reaktoru zahřátá na 280 °C a při tlaku 250 MPa se ohřívá na více než 500 °C. Stejně jako v BWR pára putuje z reaktoru přímo do turbíny. Tyto reaktory tedy budou jednookruhové. Reaktor dosahuje daleko vyšší účinnost, už při teplotě páry 510 °C je to o 44 % a může to být i víc. Počítá se s maximální teplotou do 620 °C. [30]

Rychlé reaktory chlazené sodíkem

Jedná se o rychlé reaktory, kde se jako chladivo bude využívat tekutý sodík. Pracovní teplota se předpokládá okolo 550 °C. S těmito reaktory je bohatá zkušenost. V současnosti fungující rychlé energetické reaktory jsou právě tohoto typu, např. reaktor Phoenix ve Francii. V těchto reaktorech se ale projeví provozní problémy a nejsou zatím připraveny

na komerční využití. Z rychlých reaktorů by měl být k dispozici nejdříve, možná i před rokem 2030. O tyto reaktory jeví zájem hlavně Japonsko, v Evropě je zájem menší.

Rychlé reaktory chlazené olovem

S olovem chlazenými reaktory jsou dlouholeté zkušenosti. Spolehlivě například fungují v ruských ponorkách. Pro chlazení se plánuje využívat olovo nebo směs olova a bismutu. Výhodou směsi olova a bismutu je snížení teploty tavení. Jeho nevýhodou je pak, že reakcemi neutronů s bismutem se produkuje radioaktivní izotop, který je nebezpečným alfa zářičem. Olovo se taví teprve při teplotě 327 °C, směs už od teploty 123 °C. Běžná pracovní teplota by měla být 550 °C. Při použití speciálních materiálů pro konstrukci chladicího okruhu by však pracovní teplota mohla být až 800 °C. Tyto vyšší teploty by umožnily produkci vodíku pro vodíkové hospodářství. Rusko se, díky své vyvíjené koncepci olovem chlazeného rychlého reaktoru BREST a čtyřicetileté zkušenosti tohoto typu reaktoru u svých ponorek, velmi aktivně zapojilo i do práce na této koncepci reaktoru. Kromě středně velkých reaktorů s elektrickým výkonem 600 MWe se plánuje i vývoj malého kompaktního mobilního reaktoru s výkonem 10 až 100 MW, který by měl velmi dlouhý interval mezi výměnou paliva (15 až 20 let). To znamená, že nikdo během celé doby fungování reaktoru nemá k palivu přístup a nemůže s ním tedy nijak manipulovat, což se bude hodit v politicky nestabilních zemích. [47]

Rychlé reaktory chlazené plynem

Jedná se o reaktory chlazené heliem. Takové reaktory v provozu zatím nejsou. Má se jednat o reaktory s poměrně malým výkonem (do 300 MW). Těmto reaktorům nahrává hlavně nízká cena a fakt, že i kdyby došlo k výpadku chlazení, tak nemůže dojít k jaderné reakci. Počítá se s účinností kolem 45 %. [30]

3 JADERNÁ ENERGIE

3.1 Jaderné reaktory

Jaderný reaktor je zařízení, ve kterém se uskutečňuje řízená řetězová štěpná reakce. K hlavním prvkům, které umožňují provoz reaktoru, patří palivo, moderátor, absorbátor a

chladio. Konstrukce jaderného reaktoru musí splňovat několik základních funkcí, jako je rozmístění jaderného paliva v aktivní zóně, zpomalování neutronů při štěpení, řízení řetězové štěpné reakce a odvod tepelné energie z aktivní zóny.

Činnost reaktoru je řízena pomocí moderátoru (nejčastěji voda), který zpomaluje neutrony. Reakce se ovlivňuje také pomocí absorbátorů, které pohlcují přebytečné neutrony. Jsou to zpravidla tyče, které se zasouvají podobně jako palivo. V reaktoru dochází k řízenému štěpení jader paliva (nejčastěji uran). Při této reakci se uvolňuje velké množství tepla. Voda odvádí teplo do parogenerátorů. Zde se tvoří pára a ochlazená voda putuje zpět do reaktoru. Pára je vedena do turbíny, kterou roztáčí a ta pohání generátor elektrické energie. Generátor mění mechanickou práci turbíny na elektrickou. Páry z turbíny se dále vedou do kondenzátoru, který je ochlazuje, přeměňuje na vodu a posílá zpět do parogenerátoru. Voda proudící kondenzátorem, která odebírá teplo, je vedena do chladicí věže, kde je ochlazována. Do ovzduší nakonec stoupá z věží jen vodní pára.

Jaderná štěpná reakce

Je to reakce, při níž dochází k rozbití jádra atomu prvku, způsobené vniknutím cizí částice, nejčastěji neutronem, kdy se uvolní obrovská energie. K vyvolání této reakce se využívají těžká atomová jádra (např. uran).

Neutron pronikne do jádra uranu a předá jádru tolik energie, že se rozkmitá a rozdělí se většinou na dva odštěpky, které se od sebe velkou rychlostí rozletí (10 000 km/s). Jsou však velmi brzy brzděny nárazy o okolní atomová jádra a jejich kinetické energie se mění na energii tepelnou.

Při rozštěpení jádra uranu se uvolní dva až tři neutrony, které mají za úkol rozštěpit další jádra. Aby se zvýšila pravděpodobnost štěpení dalšího jádra, musíme tyto neutrony zpomalit (moderovat) pomocí moderátoru, který je ve většině případů realizován vodou.

Pokud bychom neutrony pouze zpomalovali a neregulovali jejich počet, došlo by k exponenciálnímu růstu počtu štěpení a k neřízené řetězové reakci. Tato reakce se také

dá řídit pomocí absorbátorů, což jsou tyče vyrobené z materiálu, který neutrony pohlcuje. Tyče se pak v aktivní zóně reaktoru zasouvají nebo vytahují.

Otrava reaktoru

Tento fyzikální jev sehrál při černobylské havárii důležitou úlohu. Xenonová otrava je redukce reaktivity reaktoru v důsledku velmi vysokého pohlcování neutronů xenonem (Xe^{135}), který je štěpným produktem. Jedním z vedlejších produktů vznikajících ze štěpení jader uranu nebo plutonia je tvorba jódu, který činí zhruba 6 % ze vzniklých štěpných produktů. Jelikož je malá šance, že by jód absorboval neutron, není jeho výskyt z hlediska řízení štěpné reakce významný. Jód má poločas rozpadu 6,7 hodin a přeměňuje se postupně v xenon s poločasem rozpadu 9,2 hodin. Tento izotop má neobvykle velký průřez pro absorpci neutronů. Xenon se tak stává téměř dokonalým absorbátorem neutronů a je velmi důležitým činitelem ovlivňujícím reaktivnost v aktivní zóně. Při normálním provozu reaktoru je přítomnost xenonu a jódu v rovnováze. Tato situace je daná tím, že probíhající štěpná reakce neustále produkuje nový jód, který se mění v xenon a ten se rozkládá na stabilní cesium nebo, což je častější, pohlcuje neutrony a přeměňuje se na stabilní xenon-136. Cesium ani xenon-136 již neutrony neabsorbují a štěpnou reakci neovlivňují. Jestli se výkon reaktoru sníží o velkou hodnotu nebo se reaktor odstaví, je rovnováha narušena a v reaktoru se začíná hromadit xenon-135, protože vytvořený jód se stále přeměňuje na xenon-135, ale ten vlivem výrazně menšího počtu neutronů v aktivní zóně zůstává v reaktoru a nepřeměňuje se. Vrchol koncentrace xenonu-135 nastává zhruba po 12 hodinách od odstavení reaktoru. To je dáno především poločasem rozpadu. Z tohoto důvodu není ani možné spustit krátce po odstavení opět reaktor, protože tomu xenon zabrání.

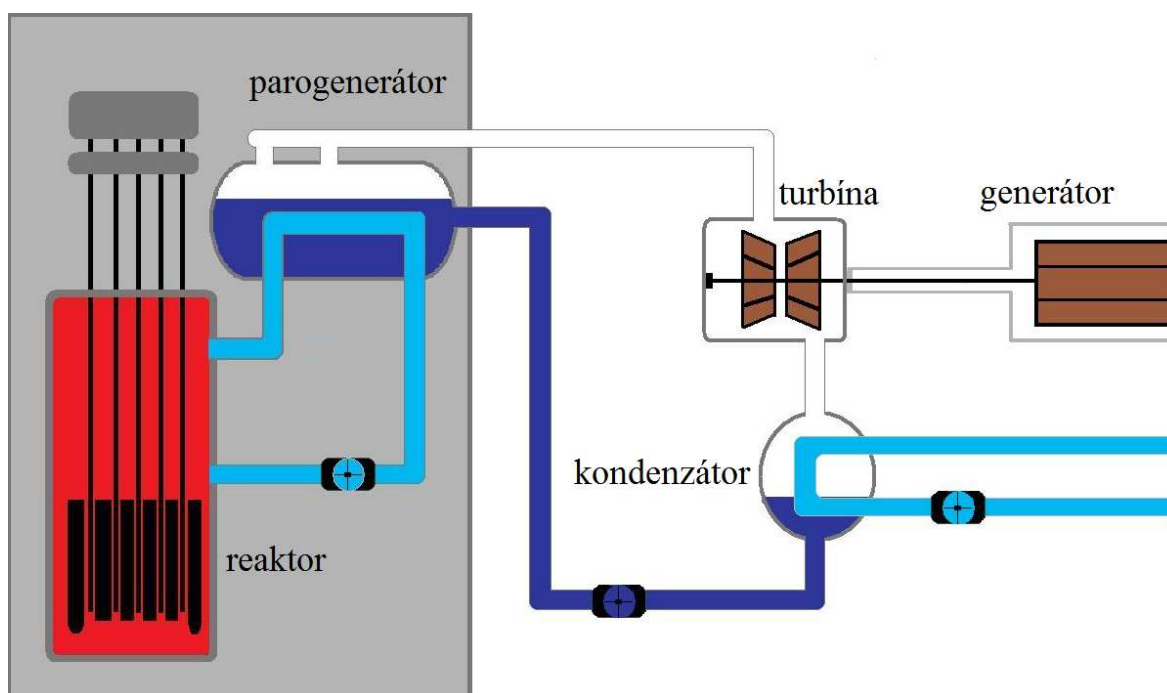
3.1.1 Typy reaktorů

Jaderné reaktory jsou dvojího typu, jednookruhové nebo dvouokruhové. U jednookruhových se vyrobená pára z reaktoru přivádí přímo do turbíny. U dvouokruhových se vzniklé teplo z reaktoru odvádí teplotonosnou látkou primárním okruhem do parního generátoru, kde vzniká pára, která se sekundárním okruhem přivádí k turbíně pohánějící generátor.

Reaktory mohou být energetické, školní, experimentální a pro vojenské účely.

PWR, VVER

Tlakovodní reaktor (Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor) je dnes ve světě nejrozšířenějším typem jaderného reaktoru (asi 57 %). Tento typ se používá i v JE Dukovany a JE Temelín. Původně byl vyvinut v USA, později koncepci převzalo Rusko. Stejně reaktory jsou pro svou vysokou bezpečnost používány kromě jaderných elektráren i k pohonu jaderných ponorek. Palivem je slabě obohacený uran ve formě tabletek oxidu uraničitého uspořádaných do palivových tyčí. Moderátorem i chladivem je obyčejná voda. Výměna paliva probíhá při odstaveném reaktoru zpravidla jednou za 1 až 1 a půl roku, kdy je nahrazena jedna třetina vyhořelého paliva. Tyto reaktory jsou nejčastěji ve dvou provedení, 440MW a 1000MW.

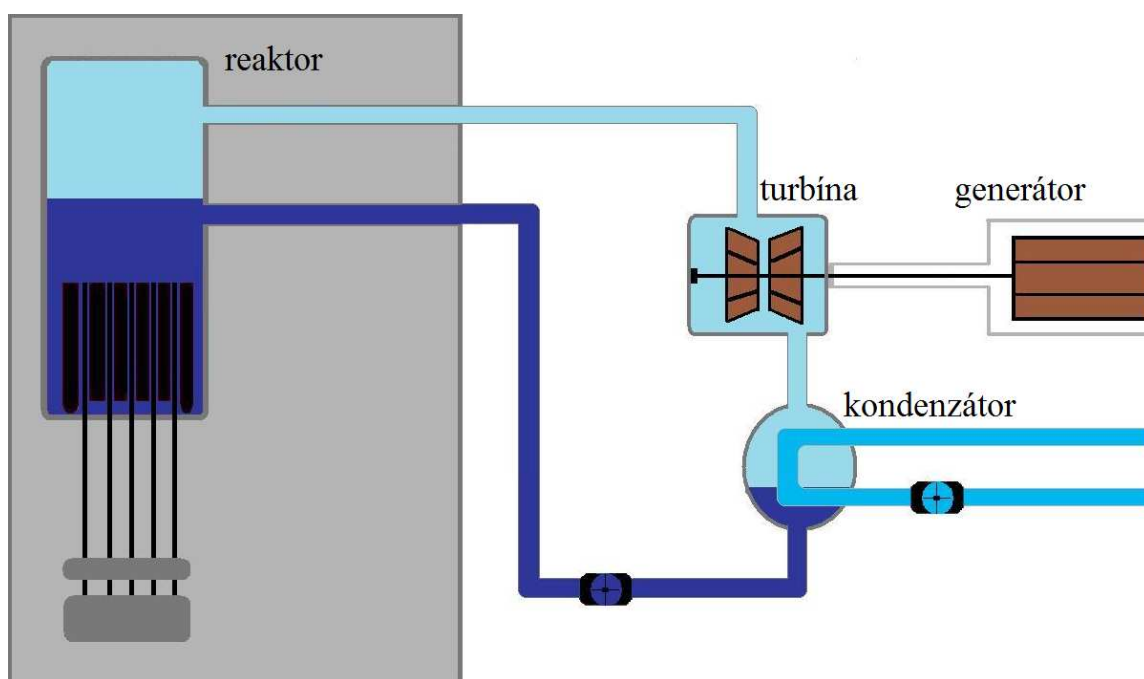


Obr. 7. Schéma reaktoru VVER

BWR

Varný reaktor BWR (Boiling water reactor) je druhým nejrozšířenějším typem (asi 21 %). Palivem je mírně obohacený uran ve formě válečků oxidu uraničitého uspořádaných do

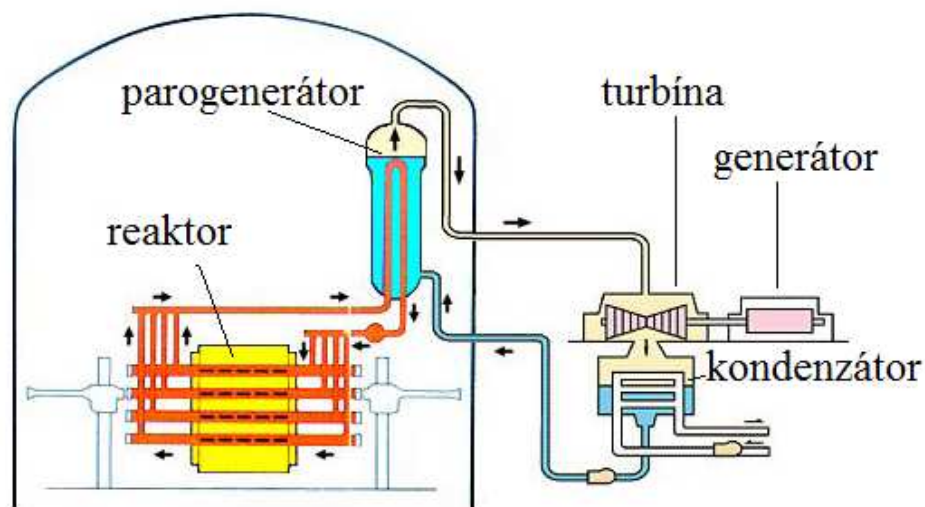
palivových tyčí. Palivo je měněno při odstavení reaktoru, to je zpravidla jednou za rok až rok a půl. Chladivem i moderátorem je zde obyčejná voda. Tyto reaktory se podobají PWR, avšak je tu zásadní rozdíl: reaktory BWR jsou jednokruhové, tzn., že voda se ohřívá až k varu přímo v tlakové nádobě a v horní části reaktoru se hromadí pára, která putuje přímo k turbíně. Primární okruh je tedy daleko jednodušší a vyžaduje méně komponent.



Obr. 8. Schéma reaktoru PWR

CANDU

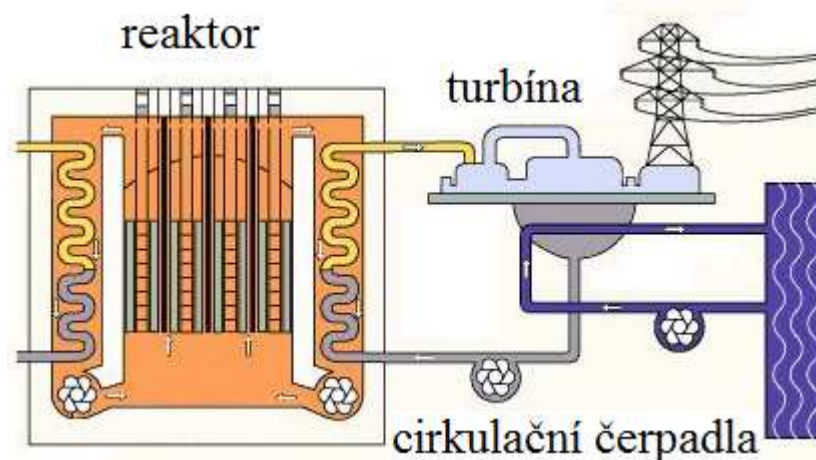
Těžkovodní reaktor CANDU (CANada Deuterium Uranium) byl vyvinut v Kanadě. Palivem je přírodní uran ve formě oxidu uraničitého, chladivem a moderátorem těžká voda. Aktivní zóna se nachází v nádobě ve tvaru ležícího válce, která má v sobě vodorovné průduchy pro tlakové trubky. Moderátor v nádobě musí být chlazen, protože moderační schopnost se snižuje se vzrůstající teplotou. Těžká voda z prvního chladicího okruhu předává své teplo obyčejné vodě v parogenerátoru, odkud se vede pára na turbínu. [13]



Obr. 9. Schéma reaktoru CANDU [32]

Magnox GCR

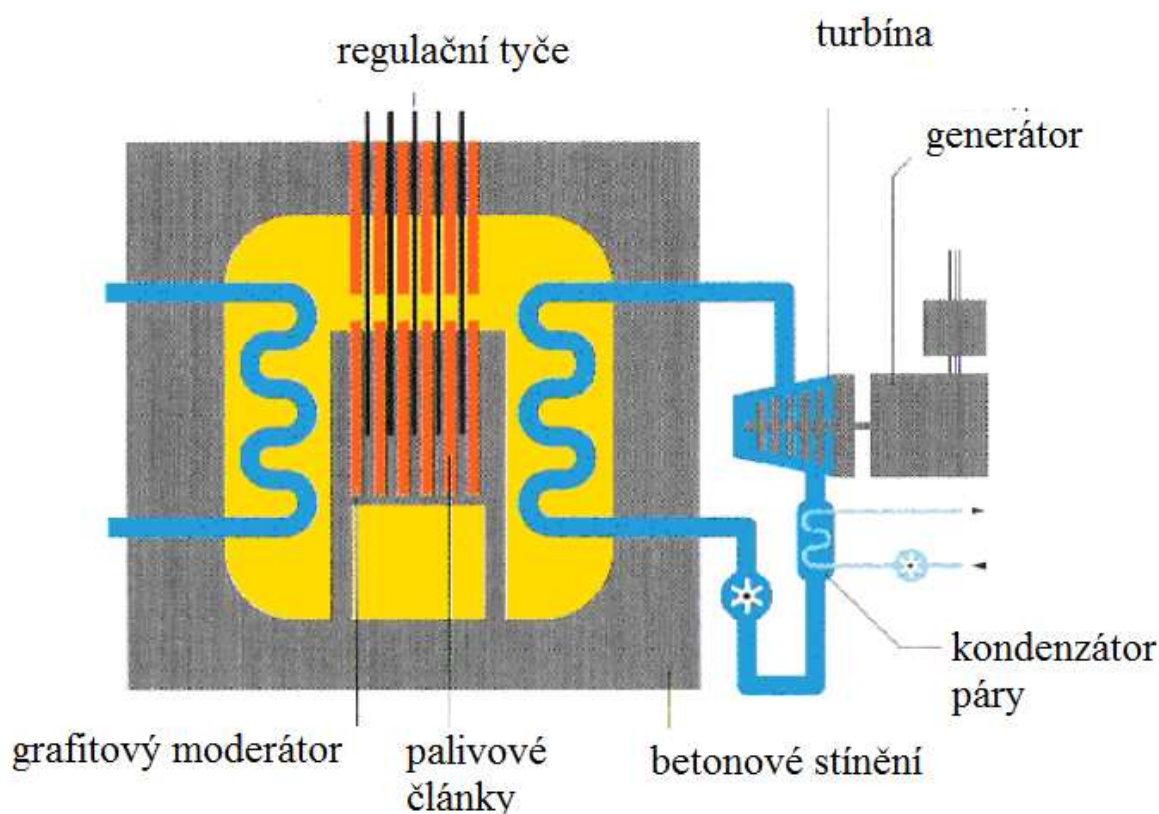
Plynem chlazený reaktor Magnox GCR (Gas cooled reactor) se používá ve Velké Británii a Japonsku. Palivem je přírodní kovový uran ve formě tyčí pokrytých oxidem magnezia, výměna paliva probíhá za provozu. Moderátorem jsou grafitové bloky, kterými prochází několik tisíc kanálů; do každého se umísťuje několik palivových tyčí. Chladivem je oxid uhličitý, který se po ohřátí vede do parogenerátoru, kde předá teplo vodě sekundárního okruhu. Chladivo má při výstupu z reaktoru teplotu 400 °C. Aktivní zóna je uzavřena v kulové ocelové tlakové nádobě s betonovým stíněním. Tyto reaktory jsou dvouokruhové a nejčastěji jsou konstruovány na výkon 600MW.



Obr. 10. Schéma reaktoru GRC [32]

AGR

Pokročilý plynem chlazený reaktor AGR (Advanced Gas Cooled). Zatím se používá výhradně ve Velké Británii, kde zatím funguje 14 reaktorů z celkových 19 [14]. Palivem je uran obohacený izotopem ^{235}U ve formě oxidu uraničitého, moderátorem je grafit, chladivem je oxid uhličitý, který má při výstupu z reaktoru teplotu $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tyto reaktory mají vysokou účinnost, jsou dvouokruhové a nejčastěji jsou konstruovány na výkon 600MW.

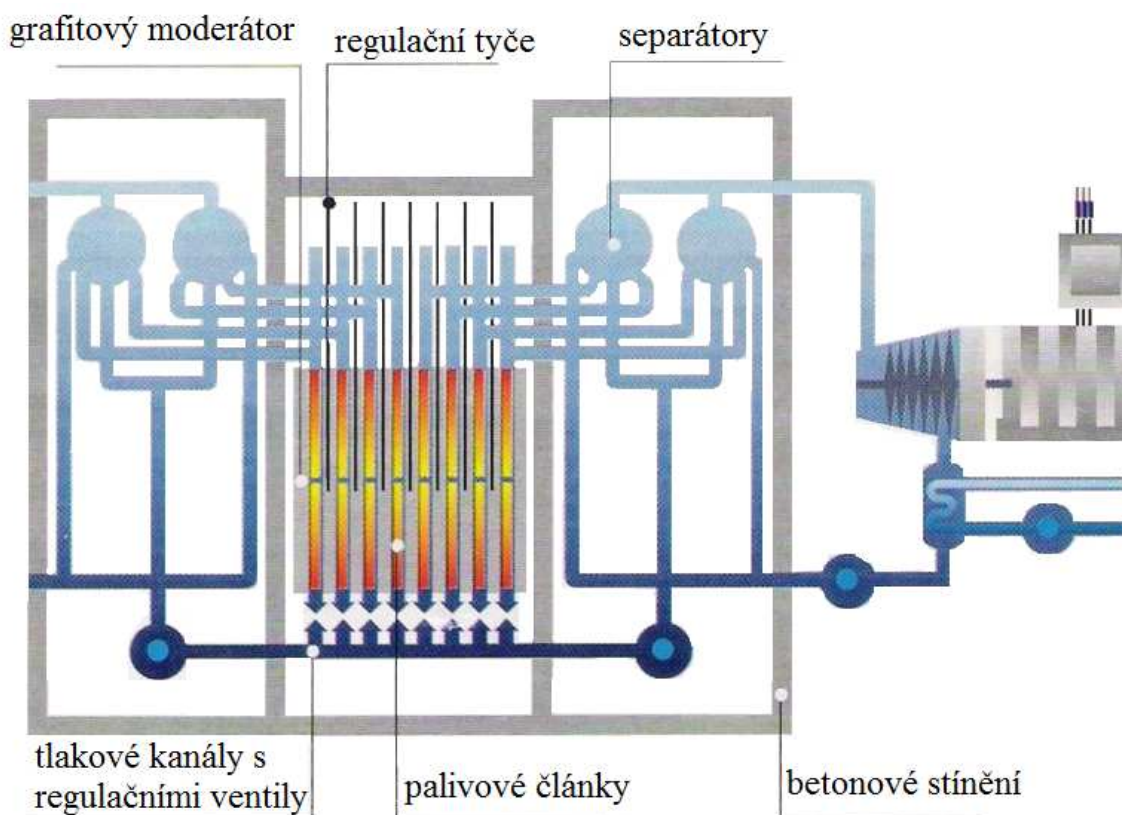


Obr. 11. Schéma reaktoru AGR [40]

RBMK

Reaktor typu RBMK (Rakto Bolšoj Moščnosti Kanalnyj) se používá výhradně na území bývalého SSSR. Tohoto typu by reaktor první jaderné elektrárny v Obninsku. Další reaktory tohoto typu se již nestaví. Moderátorem je grafit, který obklopuje kanály. Palivem je přírodní nebo slabě obohacený uran ve formě oxidu uraničitého. Palivové tyče jsou uloženy v kanálech, kudy proudí chladivo - obyčejná voda. V tlakových kanálech přímo

vzniká pára, která po oddělení vlhkosti pohání turbínu. Tento reaktor byl použit i v nejznámější jaderné elektrárně v Černobylu.

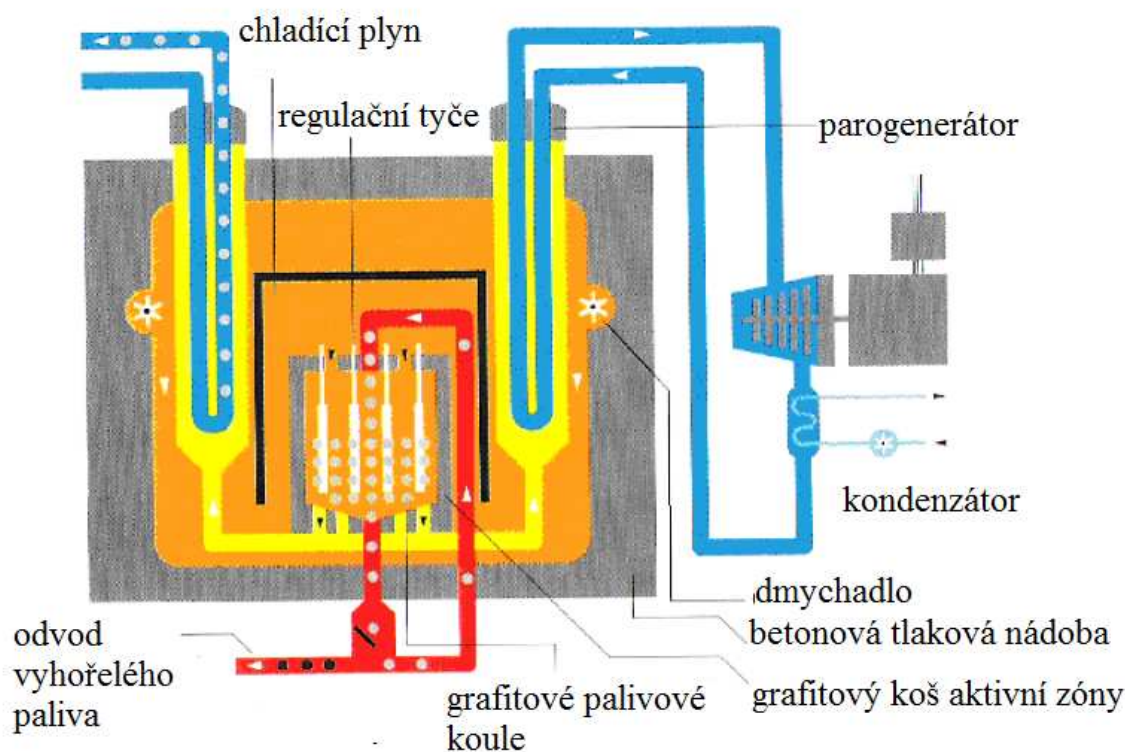


Obr. 12. Schéma reaktoru RBMK [32]

HTGR

Vysokoteplotní reaktor HTGR (High Temperature Gas Cooled Reactor) patří k perspektivním typům jaderných reaktorů. Díky vysoké teplotě na výstupu má velmi vysokou účinnost. Vysokoteplotní reaktory jsou zatím vyvinuty pouze experimentálně v Německu, USA a Velké Británii.

Palivem je vysoce obohacený uran ve formě malých kuliček oxidu uraničitého. Kuličky jsou rozptýleny v koulích grafitu. Grafit slouží jako pevná, tepelně odolná schránka uranu i vznikajících radioaktivních zbytků i jako moderátor. Palivové koule se volně sypou do aktivní zóny, na dně jsou postupně odbírány. V konceptu USA se používají místo koulí šestiúhelníkové bloky, které se skládají na sebe. Chladičem je helium proháněné skrze aktivní zónu. V parogenerátoru předá helium teplo chladicí vodě sekundárního okruhu, vzniká zde pára pohánějící turbínu. Teplota helia na výstupu z reaktoru je 284°C, chladicí helium může bez problémů dosáhnout teploty až 950°C. [13]

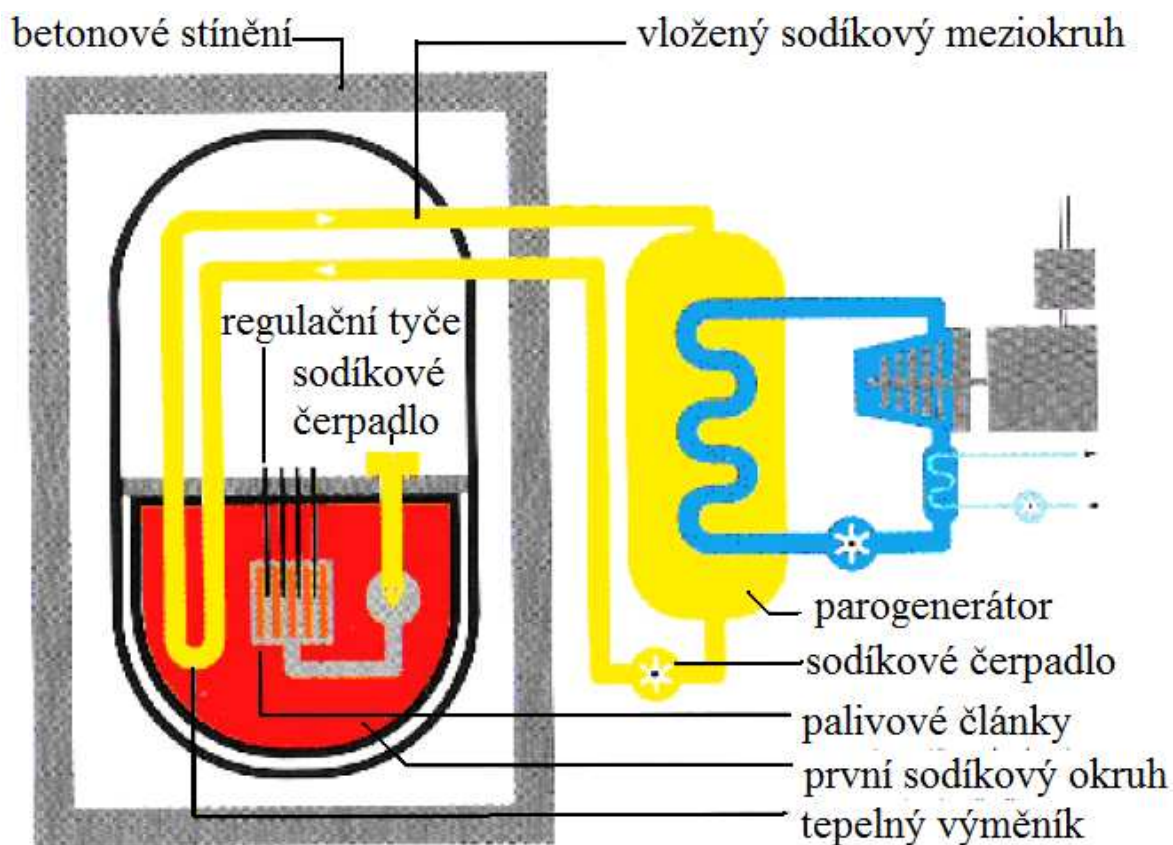


Obr. 13. Schéma reaktoru HTGR [40]

FBR

Rychlý množivý reaktor FBR (Fast Breeder Reactor) pracuje v Rusku, ve Francii a Velké Británii. V USA, Německu a Japonsku existují demonstrační elektrárny tohoto typu. V dlouhodobé perspektivě je těmto reaktorům přisuzován velký význam.

Palivem je plutonium ve směsi oxidu plutoničitého a uraničitého. Výhoda FBR spočívá v tom, že během provozu vyprodukuje více paliva, než kolik ho sám spotřebuje. Reaktor nemá moderátor, štěpná reakce v něm probíhá působením rychlých neutronů. Ve FBR se uvolňuje až desetkrát více tepla než u klasických pomalých reaktorů. Plyn ani voda takové množství tepla nemohou odvádět a voda navíc neutrony zpomaluje. Chladivem je proto sodík, lehký kov, který je při teplotách nad 100°C tekutý a jeho pohyb se velmi snadno kontroluje elektrickými čidly. Sodík má mnohem lepší tepelnou vodivost než voda a mnohem vyšší teplotu varu (téměř 900°C). Zásadním problémem sodíku je jeho velká chemická reaktivita s kyslíkem. Musí se proto zajistit co nejbezpečnější oddělení sodíkového okruhu od vody i vzduchu.[13]



Obr. 14. Schéma reaktoru FBR [40]

Tab. 3. Účinnost reaktorů a státy, kde jsou [32]

Typ reaktoru	Účinnost [%]	Státy
VVER, PWR	32,7	USA, Rusko, Německo, ČR
BWR	33,3	Japonsko, USA, Španělsko, Švédsko
CANDU	30,1	Kanada, Argentina, Čína, Pakistán
Magnox GCR	25,8	VB, Francie, Německo
AGR	41	VB
RBMK	31,3	Rusko, Ukrajina, Litva
HTGR	39	VB, USA, Německo
FBR	42	VB, USA, Francie, Rusko, Japonsko

3.2 Jaderné palivo

Z materiálů, které lze potenciálně využít k získávání energie pomocí štěpení, se na Zemi v přírodě vyskytují uran a thorium. U uranu se jedná o izotopy 235 a 238 a u thoria o izotop 232. Všechny tři izotopy jsou nestabilní a rozpadají se. Jejich pravděpodobnost rozpadu je velmi malá, poločas rozpadu je u uranu 235 přibližně 0,7 miliard let, u uranu 238 4,5 miliardy let a u thoria 232 dokonce 14 miliard let.

Uran a thorium jsou relativně běžné kovy. V malých množstvích jsou obsaženy v půdě a horninách, ve větším množství v uranových a thoriových rudách. Na Zemi se v průměru vyskytuje zhruba 2 - 6 mg uranu v 1 kg zemské kůry, u thoria je to pak zhruba 8 - 12 mg. Čísla jsou předběžná, protože hledání těchto rud zatím není přikládán takový význam jako např. u ropy. O množství uranu a thoria svědčí i to, že tepelná energie produkovaná jejich rozpady stačí k udržení žhavého a roztaveného nitra Země a pohání veškerou sopečnou činnost. Jeden z největších dodavatelů jaderného paliva je ruská společnost TVEL, která mj. dodává palivo i ČR. [15]

3.2.1 Uran

Převážná většina jaderných elektráren pracuje s lehkovodním reaktorem, který má vysoký stupeň bezpečnosti provozu. Jako palivo se zde používá obohacený uran. Dnes obsahuje přírodní uran pouze 0,73 % izotopu U235. To ovšem není dostačující pro provoz některých reaktorů a je nutné podíl zvýšit. To se děje při obohacování, kdy pomocí rozdílné hmotnosti mezi izotopy U235 a U238 dochází k jejich oddělení. Obvyklá míra obohacení uranu pro potřeby energetických reaktorů je 3 až 5 % hmotnostního podílu U235 v uranu. Technologie obohacování patří mezi strategické činnosti a zvládá ji v plném rozsahu jen několik průmyslově vyspělých států.

V koncentrovanější podobě lze nalézt uran v uranových rudách. Uranové rudy můžeme rozdělit podle koncentrace do čtyř skupin. Ruda s velmi vysokou koncentrací má okolo 20% uranu a vyskytují se třeba v Kanadě. Ruda s vysokou koncentrací má okolo 2% uranu, ruda s nízkou koncentrací má okolo 0,1% uranu a ruda s velmi nízkou koncentrací má okolo 0,01% nebo méně uranu. Rudou s velmi nízkou koncentrací nazýváme jen takový materiál, který má příslušnou koncentraci uranu a zároveň je v něm uran v takové podobě, že se dá chemicky i ekonomicky relativně lehce uvolnit. Taková ruda se těží například v Namibii nebo v Austrálii.

Nejznámější uranovou rudou je smolinec a karnotit, ale různých uranových nerostů je značný počet. Obsah uranu v současných běžně těžených rudách se pohybuje okolo 0,1 – 2 %. Je třeba si také uvědomit, že průzkum uranových zásob velmi silně zaostává například za průzkumem ložisek ropy a plynu. Dá se tedy předpokládat, že odhad množství uranu na Zemi se zvýší několikanásobně a není vyloučeno zvýšení i řádové. [15]

Přírodní uran se v největší míře těží v Kanadě, Austrálii, Rusku a Kazachstánu. V ČR se těží uran už jen na jediném místě, v Dolní Rožínce.

Obr. 15. Známé a těžitelné zásoby uranu (2007) [28]

Stát	Tuny U	Podíl světových zásob [%]
Austrálie	1 243 000	23
Kazachstán	817 000	15
Rusko	546 000	10
Jižní Afrika	435 000	8
Kanada	423	8
USA	342 000	6
Brazílie	278 000	5
Nambie	275 000	5
Nigérie	274 000	5
Ukrajina	200 000	4
Jordánsko	112 000	2
Uzbekistán	111 000	2
Indie	73 000	1
Čína	68 000	1
Mongolsko	62 000	1
ostatní státy	210 000	4
CELKOVĚ	5 469 000	100

3.2.2 Thorium

Thorium je v zemské kůře poměrně silně zastoupeno, vyskytuje v koncentraci 8 – 12 mg/kg. Jeho obsah v mořské vodě je udáván okolo 7 µg/l. V přírodě se thorium vyskytuje pouze ve formě sloučenin. Nejznámějším jejich zdrojem jsou monazitové písky. Také

různých minerálů s obsahem thoria je velký počet. Protože je thorium relativně málo využíváno, je jeho těžba i geologická prospekce ještě méně rozvinutá než u uranu. Odhad zásob thoria je tak ještě nejistější a je pravděpodobně ještě více podceňován. Velká ložiska rud obsahující thorium byla zatím objevena v Austrálii, Indii, Skandinávii, USA, Číně, Brazílii, Indonésii a Kanadě.

V současné době byla nalezena velká ložiska v USA, kde se velmi diskutuje o nahrazení uranu thoriem, které nabízí mnoho výhod. Ty začínají výhodou velkých domácích zásob. USA skoro netěží uran, dováží až 90%. Další je skutečnost, že z thoria nelze vyrobit jadernou zbraň a při jeho použití v reaktorech se produkuje menší objem vysoce radioaktivních složek odpadů.

Známa společnost pro výrobu aut Cadillac, představila na začátku roku 2009 nový koncept. Kde auto by jezdilo na thorium. Model se jmenoval Cadillac WTF (World Thorium Fuel).

3.2.3 Plutonium

Plutonium je silně radioaktivní a toxický kov. V přírodě se téměř nevyskytuje, jen v ultrastopovém množství v uranových rudách. Kov je uměle vyroben v jaderném reaktoru, poprvé bylo plutonium vytvořeno roku 1940. Kromě paliva pro JE se dá použít i na výrobu ZHN.

3.3 Jaderný odpad

Žádná lidská činnost se neobejde bez produkce odpadů. Radioaktivní odpady na rozdíl od jiných průmyslových nebo chemických odpadů, které mohou být jedovaté nebo nějak jinak nebezpečné na věky, svou nebezpečnost postupně ztrácejí díky poločasu rozpadu prvku a tzn., že 99 % produktů vzniklé štěpením uranu a plutonia by mělo ztratit svou nebezpečnost po necelých 300 letech. Vyhořelé palivo z jaderné elektrárny tvoří méně než 1 % objemu všech jaderných odpadů na světě, avšak obsahuje zhruba 95 % veškeré radioaktivity. I když bývá vyhořelé jaderné palivo považováno za odpad, může se stát cenným zdrojem surovin nebo jaderným palivem pro jiný typ jaderné elektrárny, protože obsahuje kolem 95% nespotřebovaného uranu. Obě české jaderné elektrárny během svého provozu vyprodukují asi 3 000 tun jaderného odpadu. O jaderný odpad se v ČR stará Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO).

SÚRAO získává finanční prostředky na svou činnost z tzv. jaderného účtu a ze státních dotací. Na jaderný účet připívají všichni původci radioaktivních odpadů ve výši podle vyhlášky č. 416/2002 Sb. Např. ČEZ platí cca 50 Kč za každou vyrobenou MWh v jaderných elektrárnách, tj. cca 1,6 miliardy ročně. Obce, na jejichž katastru leží úložiště radioaktivních odpadů, obdrží z účtu 1,5 mil. Kč ročně. [6]

Palivové články musejí v reaktoru vydržet teploty okolo 300 °C a tlak přes 12 MPa, takže snadno odolají podmínkám pro skladování a manipulaci. Na konci každého cyklu pro výměnu vyhořelého paliva se vyhořelé palivo z reaktoru vyjme a pod hladinou vody se kanálem převezde do bazénu vyhořelého paliva; který je v reaktorové hale vedle reaktoru. Tam jsou palivové články pod vodou uloženy asi 3 až 4 roky. Když radioaktivita klesne na 50 % původní hodnoty, vloží se články do kontejnerů a odvezou se do meziskladu vyhořelého paliva. Tam se skladují řádově několik desítek let. Účelem je snížit zbytkový tepelný výkon vyhořelého paliva na míru potřebnou pro jeho další přepracování nebo definitivní uložení v hlubinném úložišti jaderného odpadu. [16]

Možnost přepracování paliva

Od čtyřicátých let minulého století je znám proces přepracování použitého paliva, při kterém se oddělí nebezpečné radioaktivní látky od neškodného uranu. Přepracování je složitý a velmi nákladný proces. Vychází z toho, že použité lehkovodní jaderné palivo sice obsahuje asi tři procenta vysoce radioaktivních štěpných produktů, ale kromě toho také skoro 95 % nespotřebovaného uranu a nově vzniklé prvky (jako např. plutonium), kterých je okolo jednoho procenta. V reaktorech postavených po roce 1980 lze využít i štěpnou směs plutonia a uranu. Tato směs může nahradit až polovinu paliva, ale záleží na typu reaktoru. Při recyklaci se hmotnost paliva na ukládání sníží z 30 tun až na 5 tun.[30]

Ve světě je v porovnání s počtem JE jen velmi málo závodů na přepracování paliva. Je to dáno cenou recyklace štěpných materiálů, kterou si mohou dovolit jen bohaté země a také nízkou cenou uranu. Je ale zřejmé, že s dalším rozvojem jaderné energetiky bude přepracování paliva nutnost.

Komerční přepracovací závody jsou např. ve Francii, Velké Británii, Rusko a Japonsko. Mezi země, které své palivo nechávají přepracovávat v zahraničí patří Belgie, Německo, Švýcarsko a Nizozemí. Kromě štěpných materiálů odebírají i vysoce radioaktivní zbytky po

přepracování. Přepracované palivo je samozřejmě dražší než přírodní uran. Celkově se přepracovává asi 10 % použitého paliva. [30]

Typy odpadů

Radioaktivní odpady se dělí podle aktivity na nízkoaktivní, středněaktivní a vysokoaktivní odpady. Zneškodnění odpadů spočívá v zabezpečení jejich úplné izolace od životního prostředí, a to po celou dobu, po kterou mohou pro člověka a životní prostředí představovat riziko. Této izolace radioaktivních odpadů je dosaženo v úložištích. Radioaktivní odpady je třeba udržet pod kontrolou tak dlouho, dokud jejich radioaktivita neklesne v důsledku samovolného rozpadu na úroveň vylučující ohrožení jakékoliv složky biosféry. Drtivá většina odpadů jsou nízkoaktivní a tvoří je papír, látky, filtry, nářadí aj.

Úložiště odpadů



Obr. 16. Přípovrchová úložiště v ČR [17]

V České republice jsou v současné době v provozu tři úložiště. Největší úložiště je v areálu jaderné elektrárny Dukovany, další úložiště se nachází u Litoměřic a nejmenší je úložiště Bratrství u Jáchymova. Úložiště Dukovany je svou konstrukcí i bezpečností srovnatelné s podobnými stavbami v západoevropských zemích. Ukládají se zde nízko- a středně-aktivní odpady, které vznikají při provozu jaderných elektráren Dukovany a Temelín. Poslední úložiště se nachází v Hostimi u Berouna, které bylo v provozu od roku 1959 do roku 1964. Úložiště je od roku 1997 zavřené, ale stále se monitorují jeho vlivy na prostředí.[17]



Obr. 17. Vstup do úložiště Richard u Litoměřic [41]

V současné době se řeší i hlubinné úložiště pro vysokoaktivní odpady. Ukládací komory budou vybudovány v hloubce zhruba 500 m ve stabilní geologické formaci a odpad bude umístěn ve speciálních kontejnerech s dlouhodobou životností. Zprovoznění skladu u nás se předpokládá v roce 2065. Podzemní prostory a v nich probíhající ukládací činnost však neovlivní ani neomezí dění na povrchu. Doba uložení by měla být 100 000 let.



Obr. 18. Sudy s odpadem v úložišti Richard [41]

3.4 Jaderné havárie

Většina lidí vidí JE jako extrémně nebezpečné. Jako zbytečně velké riziko, kterému se vystavujeme. Statistiky však dokazují opak a to že jaderná energetika je jeden z nejbezpečnějších zdrojů, jenž vůbec máme k dispozici. Riziko nehody nebo havárie JE je přímo úměrná úrovni tzv. "jaderné bezpečnosti". Tu lze definovat jako schopnost jaderného zařízení a její obsluhy zajistit, aby se proces získávání energie štěpením nikdy nevymknul řízení a aby při tom nedošlo k úniku radioaktivních látek.

Mezinárodní stupnice pro hodnocení událostí v jaderných elektrárnách

Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí (INES) je určena ke komunikaci s veřejností v terminologii, která je v souladu s bezpečnostním významem událostí hlášených na jaderných zařízeních. Informováním o událostech ze správného úhlu pohledu může stupnice usnadnit vzájemné porozumění mezi jaderným společenstvím, sdělovacími prostředky a veřejností. Stupnice byla vytvořena skupinou expertů svolaných společně Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (MAAE) a Agenturou pro jadernou energii. Stupnice rovněž odráží zkušenosti získané z využívání podobných stupnic ve Francii a Japonsku i z návrhů stupnic zvažovaných v několika dalších zemích. Nejdříve byla stupnice určitou dobu zkušebně používána ke klasifikaci událostí v jaderných elektrárnách. Po té byla rozšířena a uzpůsobena tak, aby umožňovala použití ve všech zařízeních spojených s civilním jaderným průmyslem. V současné době je úspěšně používána v 60 zemích.[20]

INES zařazuje události do sedmi stupňů. Stupně 4–7 se označují jako „havárie“, stupně 1–3 jako „nehody“. Události, které nemají žádný bezpečnostní význam, jsou klasifikovány stupněm 0 a nazývají se „odchylky“.

Tab. 4. Stupnice INES [20]

Stupeň podle INES	Popis události
0	událost bez významu pro bezpečnost (nejběžnější provozní poruchy, běžně zvládnutelné)

1	odchylka od normálního provozu (poruchy nepředstavující riziko, ale odhalující nedostatky bezpečnostních opatření)
Stupeň podle INES	Popis události
2	porucha (technické poruchy, které neovlivní bezpečnost elektrárny přímo, ale mohou vést k přehodnocení bezpečnostních opatření)
3	vážná porucha (ozáření obsluhy elektrárny nad normu, menší únik radioaktivity do okolí - zlomky limitu)
4	havárie s účinky v jaderném zařízení (částečné poškození aktivní zóny, ozáření obsluhy elektrárny, ozáření okolních obyvatel na hranici limitu)
5	havárie s účinky na okolí (vážnější poškození aktivní zóny, únik biologicky významných radioizotopů, nutnost částečné evakuace okolí)
6	závažná havárie (velký únik radioaktivních látek mimo objekt, nutnost využít havarijních plánů k ochraně okolí)
7	velká havárie (značný únik radioaktivních látek na velkém území, okamžité zdravotní následky, dlouhodobé ohrožení životního prostředí).

3.4.1 Největší jaderné havárie

Do současnosti došlo jen k několika závažným haváriím, které spadají do kategorie 4-7 stupnice. Byly to havárie v JE v Jaslovských Bohunicích na území tehdejšího Československa, JE Three Mile Island v USA, JE ve Windscale ve VB, JE v Černobylu v tehdejším SSSR a japonská elektrárna Fukushima Daichii.

Jaslovské Bohunice

První vážnou událostí byla havárie, která se odehrála 5. 1. 1976. Kvůli nedostatečně zasunutým palivovým článkům unikl do reaktorové haly radioaktivní oxid uhličitý. Havarijní systém dal okamžitě pokyn k evakuaci reaktorové haly. Dva lidé se během této nehody udusili. Radiační situace ale neohrozila okolí.

Druhá závažná havárie se stala 22. 2. 1977, kdy obsluha vyměňovala vyhořelé palivo v aktivní zóně bez přerušení provozu. Palivové články měnila ve spěchu, aby nedošlo k samovolnému zastavení štěpné reakce. Operátor ale u jednoho z palivových článků zapomněl odstranit ochrannou vložku, a ta ucpala kanál v reaktoru. Tím se zastavil průtok chladicího plynu a palivo se začalo tavit. V ucpaném kanálu se protavila i vnější trubka a do primárního okruhu se dostala těžká voda. Radioaktivitou byl zamořen primární okruh a přes netěsnosti v tepelném výměníku i parovody, turbína a kondenzátor v nejaderné části elektrárny. Po nehodě byla elektrárna zakonzervována, postupná likvidace pokračovala i v devadesátých letech. Reaktor A-1 bohunické elektrárny už nebyl zprovozněn. [21] Tato havárie byla vyhodnocena stupněm 4 na stupnici INES.

Three Mile Island

Three Mile Island je JE ležící na stejnojmenném ostrově v USA. Celosvětově známou se stala v důsledku největší havárie americké jaderné energetiky.

Druhý blok JE postihla 28. 3. 1979 havárie, která jej natrvalo vyřadila z provozu. Katastrofu započal výpadek dodávky vody do jednoho ze dvou parogenerátorů elektrárny. Po havarijním odstavení reaktoru začala z primárního chladicího okruhu pomalu unikat voda. Tlak po odstavení reaktoru začal klesat, ale pojišťovací ventil, který se měl automaticky zavřít, se nezavřel. Kontrolky na řídicím pultu chybně ukazovaly, že ventil se zavřel. Obsluha únik chladiva neodhalila včas a chybné vyhodnocení situace vedlo k velké ztrátě chladiva a k tavení palivových článků v aktivní zóně. Vedení elektrárny nebylo vůbec připraveno na krizovou komunikaci, bylo zanedbáno i informování veřejnosti. Neschopnost personálu informovat okolní obce o skutečných důsledcích havárie vedly k panice a neřízené evakuaci tisíců lidí. [22]

V současnosti je reaktor uzavřen, roztavené palivo bylo vyvezeno pryč do bezpečného úložiště, chladicí okruh dekontaminován. Pod stálým dozorem čeká reaktor až druhý reaktor (TMI-2), stále vyrábějící elektřinu jen pár desítek metrů od něj, ukončí svou činnost, aby mohly být zlikvidovány současně.

Tato havárie měla i svá pozitiva. Bezprostředně po havárii posílil státní dozor v USA svou havarijní připravenost a zřídil stálé operační centrum s nepřetržitým provozem. Zpřísnily se požadavky na zařízení (např. požární ochranu, pomocné chladicí systémy, izolace kontejnmentu aj.), zavedly se pravidelné analýzy všech charakteristik provozu jaderných

elektráren a během následujících 20 let klesl počet havarijních událostí na jaderných reaktorech téměř k nule. [22] Tato havárie byla vyhodnocena stupněm 5 na stupnici INES.

Windscale

Po 2. světové válce chtěla VB vyrábět jaderné zbraně. Windscale byl grafitový reaktor ve Velké Británii sloužící výhradně k produkci plutonia pro vojenské účely.

Roku 1957 došlo vinou nepozornosti obsluhy k přehřátí několika palivových článků v aktivní zóně. Následovalo vznícení jejich povlaků a vzniklý požár byl uhašen až za čtyři dny. Oheň dokázal zničit 8% paliva v reaktoru a uvolněné radioaktivní látky se rozptýlily nad Anglii, Wales a severní Evropu. Havárie se obešla bez zranění. Provoz reaktoru již nebyl obnoven. Tato havárie celkem překvapivě nevzbudila ve své době prakticky žádnou pozornost. Tato havárie byla vyhodnocena stupněm 5 na stupnici INES.

Černobyl

Havárie jaderné elektrárny, ležící na území Ukrajiny (v tehdejší době ještě SSSR), se stala 26. dubna 1986. Tato událost je označována za nejznámější a největší jadernou havárii v historii jaderné energetiky. K havárii došlo ve 4. bloku JE v 1:24 hodin ráno tamního času.

Havárii způsobil experiment, který měl v reaktoru jaderné elektrárny ověřit setrvačný doběh turbogenerátoru. Test měl být proveden těsně před odstavením reaktoru z provozu. Experimentem se mělo zjistit, zda bude generátor jaderného reaktoru po rychlém uzavření páry do turbíny schopen při svém setrvačném doběhu ještě zhruba 50 sekund napájet proudem čerpadla havarijního chlazení. Před zahájením testu jaderné elektrárny Černobyl a v jeho průběhu došlo k několika vážným lidským chybám a nedodržení bezpečnostních předpisů. Další významnou vadou reaktoru byla konstrukce jeho regulačních tyčí. Tyto tyče nebyly v momentě zasouvání do reaktoru plně naplněny kapalinou. Jejich velká část byla v momentě zasunutí do reaktoru vyplněna pouze dutou částí tyčí. Voda a chladicí kapalina, která se používá jako pojistka proti přehřátí reaktoru, je velmi výkonný pohlcovač neutronů. Výkon reaktoru z nedostatku této kapaliny stoupl, což nebylo operátorům elektrárny vůbec známo, jelikož se jedná o velmi neintuitivní chování reaktoru. Následkem toho v průběhu experimentu nekontrolovatelně vzrostl výkon reaktoru, došlo k přehřátí paliva a destrukci jeho pokrytí. [23]

Jaderná havárie byla způsobena souhrnem více faktorů, které k ní svým dílem, i když ne bezprostředně, přispěly.

Především šlo o samotný reaktor RBMK. Tento reaktor nedosahoval úrovně současných standardů bezpečného provozu – ať už jde o samotný fyzikální princip fungování, nízkou úroveň automatizační techniky apod. Reaktor RBMK vyznačoval velkým **pozitivním dutinovým koeficientem**, což znamená, že při absenci neutrony pohlcujícího efektu vody se výkon reaktoru prudce zvyšuje a reaktor se postupně stává stále nestabilnějším a nebezpečnějším. Důležitou roli, stejně jako ve všech haváriích, sehrálo selhání lidského faktoru na všech úrovních. Jaderná nehoda v Černobylu byla do značné míry způsobena profesními chybami, kterých se dopustil provozní personál. Ten nerespektoval bezpečnostní omezení a předpisy. Začátek experimentu musel být neočekávaně odložen o devět hodin. Tento odklad způsobil, že jej z hlediska personálu obsluhy elektrárny prováděla jiná směna než ta, která se na jeho realizaci připravovala. V noční směně bylo méně zkušených operátorů, kteří se navíc na experiment nepřipravovali. Bylo zde i mnoho ignorování aspektů bezpečnosti, jako např. střecha reaktoru z nehořlavého materiálu, která byla nakonec hořlavá. Důvodem byla snaha splnit plán ještě před plánovaným termínem. Nelze opomenout ani negativní vliv utajování informací souvisejících s jadernou energetikou, které však bylo pro tehdejší sovětský režim typické i ve většině ostatních oblastí.

Jaderná havárie v elektrárně Černobyl se projevila dvěma explozemi, které rozmetaly část aktivní zóny jaderného reaktoru, včetně paliva a hořícího grafitu. Horní část budovy reaktoru 4. bloku elektrárny Černobyl byla zničena. Vznikl požár na střeše turbínové haly a také v prostorách reaktorové haly. Hořela také zhruba čtvrtina grafitových bloků v jaderném reaktoru. Z rozbitého a rozžhaveného reaktoru 4. bloku elektrárny Černobyl uniklo 5 % radioaktivity.

Radioaktivní zamoření zasáhlo nejvíce město Pripjat', ve kterém tehdy žili hlavně zaměstnanci samotné elektrárny se svými rodinami. Evakuace díky neinformovanosti byla provedena až následující den.

Havárie se ale v žádném případě neprojevila nukleárními výbuchy. První výbuch byl způsoben přetlakem v uzavřeném prostoru. Přesné příčiny druhého výbuchu nebyly doposud spolehlivě objasněny. Pravděpodobně se však jednalo o reakci rozžhaveného grafitu a páry se vzduchem.

Likvidace jaderné havárie byla problematická. Speciálnímu hasičskému útvaru se podařilo zlikvidovat požár zhruba po třech hodinách od výbuchu v reaktoru. Uvnitř reaktoru však

stále hořel grafit. Hasiči, kteří jadernou havárii likvidovali, neznali příčinu ohně a zalévali nejdříve trosky reaktoru vodou, čímž se situace ještě zhoršovala a docházelo k dalším menším explozím a následné akceleraci radioaktivního zamoření. Aby se zabránilo únikům radioaktivity, byl reaktor postupně zasypán celkem pěti tisíci tun sloučenin bóru, dolomitu, písku, hlíny a olova shazovanými z vrtulníků. Sypké materiály uhasily požár grafitu a částečně absorbovaly unikající radioaktivní aerosoly. Dva týdny po jaderné havárii rozhodly sovětské úřady zakonzervovat celý havarovaný blok včetně strojovny do tzv. sarkofágu - betonové obálky s vestavěným chladícím systémem. [23]

Od roku 2010 se začínají objevovat nové zprávy, které hodnotí současnou konstrukci sarkofágu jako popraskanou a nestabilní. Ukrajina má dostat velké dotace na nový projekt a vybudovat schopný sarkofág na příštích 100 let.

Jaderná elektrárna Černobyl dnes již není v provozu. Řada zaměstnanců elektrárny však zůstala a pracuje na likvidaci, zajištění a pozorování elektrárny. Vstupují také do havarovaného reaktoru a provádějí zde měření.

Fukushima Daiichi

Dne 11. března 2011 Japonsko zažilo mimořádně silné zemětřesení a následně ničivé vlny tsunami. Na obrázku (Obr. 19) je vidět, které jaderné elektrárny se nacházejí v blízkosti epicentra zemětřesení: 3 bloky Onagawa, 6 bloků Fukushima Daiichi, 4 bloky Fukushima Daini a 1 blok Tokai Daini. Je také vidět, že k největšímu poškození došlo u prvního až čtvrtého bloku JE Fukushima Daiichi. V okamžiku zemětřesení bylo v uvedených JE v provozu 11 bloků, zatímco bloky 4, 5, 6 Fukushima Daiichi byly již dříve odstaveny kvůli výměně paliva a údržbě. U bloku 4 byla aktivní zóna zcela bez paliva, které se v tom okamžiku nacházelo v bazénu vyhořelého paliva. Všech 11 bloků, nacházejících se v postižené oblasti, které byly v okamžiku zemětřesení v provozu, bylo automaticky odstaveno. Současně se v JE Fukushima Daiichi automaticky nastartovalo 14 záložních dieselgenerátorů, jakmile došlo k výpadku elektrické sítě. V krátké době po zemětřesení však lokalitu zasáhla mohutná vlna tsunami, která vyřadila záložní dieselgenerátory, vyplaveny byly také olejové nádrže. Pára v reaktoru byla dál chlazena přes havarijní kondenzátor za pomoci stejnosměrného zdroje z baterií nouzového napájení, do reaktorů bloků 2 a 3 byla vstříkována voda prostřednictvím systémů samostatného (odděleného) dochlazování aktivní zóny. Během této doby byly na vnitřní sběrnice elektrického napájení připojeny mobilní zdroje, které však

nepracovaly dobře. I když nouzové baterie nadále dodávaly proud, bylo to jen krátkodobé řešení. [35]



Obr. 19. Statut jaderných elektráren po zemětřesení [44]

U 4. bloku Fukushima Daiichi byl reaktor od nehody uchráněn, protože neobsahoval žádné palivo, o to nepříznivější však byl situace v bazénu vyhořelého paliva, kde se kromě již dříve vyvezeného paliva nacházelo veškeré palivo z aktivní zóny 4. bloku. Toto palivo je také nejvýkonnější tepelný zdroj, jaký se v bazénu může vyskytovat. U bloků 5 a 6, které se v okamžiku zemětřesení nacházely také v odstaveném stavu, k žádným problémům nedošlo, navíc u obou těchto bloků bylo k dispozici elektrické zdroje střídavého napájení. Jako preventivní opatření proti případnému nahromadění vodíku a jeho explozi byly ve střeše reaktorových budov (sekundárních kontejnmentů) těchto bloků vyvrtány odvětrávací otvory. [44]

Tab. 5. Stav elektrárny Fukushima Daichii ke dni 10.5.2011 [36]

Blok JE	1	2	3	4	5	6
Rok uvedení do provozu	1970	1974	1976	1978	1978	1979

Výkon reaktoru	460 MW	784 MW	784 MW	784 MW	784 MW	1100 MW
Typ reaktoru	BWR	BWR	BWR	BWR	BWR	BWR
Blok JE	1	2	3	4	5	6
Stav při zemětřesení	V provozu	V provozu	V provozu	Odstaven	Odstaven	Odstaven
Poškození paliva	55 %	35 %	30 %	0 %	0 %	0 %
Integrita kontejmentu	Nepoškozen (odhad)	Podezření na poškození	Nepoškozen (odhad)	Nepoškozen	Nepoškozen	Nepoškozen
Chladicí systémy	Nefunkční	Nefunkční	Nefunkční	Není potřebný	Funkční	Funkční
Integrita reaktorové budovy	Vážně poškozena	Mírně poškozena	Vážně poškozena	Vážně poškozena	Proražena díra ve střeše	Proražena díra ve střeše
Hladina v reaktoru	Palivo odhaleno	Palivo odhaleno	Palivo odhaleno	Bezpečná	Bezpečná	Bezpečná
Tlak/Teplota v reaktorové nádobě	Roste/klesá	Neznámý/stabilní	Neznámý/roste	Bezpečný	Bezpečný	Bezpečný
Tlak v kontejmentu	Mírný pokles	Stabilní	Stabilní	Bezpečný	Bezpečný	Bezpečný
Vstřikování vody do reaktoru	Pokračuje (sladká voda)	Pokračuje (sladká voda)	Pokračuje (sladká voda)	Není potřeba	Není potřeba	Není potřeba
Vstřikování vody do kontejmentu	Zahájeno	Plánováno	Plánováno	Není potřeba	Není potřeba	Není potřeba
Chlazení vyhořelého paliva	Pokračuje (sladká voda)	Pokračuje (sladká voda)	Pokračuje (sladká voda)	Pokračuje (sladká voda)	Schopnost chlazení obnovena	Schopnost chlazení obnovena
Integrita vyhořelého paliva	Neznámá	Neznámá	Předpoklad na poškození	Pravděpodobně poškozeno	Nebylo poškozeno	Nebylo poškozeno

Dne 12. 4. došlo k přehodnocení události v JE Fukushima Daichii z INES 5 na INES 7. Důvod přehodnocení není kvůli tomu, že by se situace změnila k horšímu, ale kvůli tomu, že přišla data z měření o úniku radiace, které dříve nebyly.

Havárie v Černobylu a Fukushimě mají zcela odlišné kořenové příčiny i vlastní průběh. V případě Černobylu šlo o nekontrolovaný rozvoj štěpné řetězové reakce, který vedl k explozi reaktoru a destrukci budovy reaktoru. V případě Fukushimy se potíže s chlazením reaktorů

objevily až v situaci, kdy byla štěpná reakce v reaktorech zastavena. Opakování katastrofy v Černobylu u moderních jaderných elektráren lze prakticky vyloučit. [36]

4 STÁTNÍ ÚŘADY V ČR

Státní úřad pro jadernou bezpečnost

Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB) byl založen 1. ledna 1993. Důvodem založení úřadu bylo vykonávání státní správy a dozoru nad využíváním jaderné energie a ionizujícího záření, stanovení základních podmínek zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany, havarijní připravenosti a fyzické ochrany a výkon státní správy a dozoru při využívání jaderné energie a při činnostech vedoucích k ozáření, vytvoření státem garantovaného režimu pro zajištění bezpečného ukládání radioaktivních odpadů a havarijní připravenost pro případ radiačních nehod.[24]

V současnosti SÚJB řídí rozpočtovou organizaci – Státní ústav radiační ochrany (SÚRO) se sídlem v Praze a veřejnou výzkumnou instituci – Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany (SÚJCHBO), která sídlí v Příbrami.

Státní ústav radiační ochrany

Státní úřad radiační ochrany (SÚRO) je veřejnou výzkumnou institucí zabývající se odbornou činností v oblasti ochrany obyvatelstva před ionizujícím zářením. Právní rámec pro systém radiační ochrany v ČR, včetně systému monitorování radiační situace na území ČR, vytváří zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (tzv. „atomový zákon“) a na něj navazující prováděcí předpisy. Radiační situace na území ČR je zjišťována především pomocí Radiační monitorovací sítě. Jejím řízením je pověřen Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB). Vedle něho se na činnosti Radiační monitorovací sítě podílejí organizace resortů Ministerstva financí, Ministerstva obrany, Ministerstva vnitra, Ministerstva zemědělství a Ministerstva životního prostředí. [42]

Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany

Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany (SÚJCHBO) je veřejná výzkumná instituce podřízená Státním úřadem pro jadernou bezpečnost. Výzkumná činnost ústavu je zaměřená na identifikaci a kvantifikaci radioaktivních, chemických a biologických látek, hodnocení jejich účinků na člověka a prostředí, včetně hodnocení a vývoje individuálních a

kolektivních prostředků ochrany člověka před těmito látkami, dekontaminace. Ústav řeší i bezpečnostní výzkum v rámci boje proti terorismu a průmyslovým haváriím. [43]

Správa úložišť radioaktivních odpadů

Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) byla zřízena k 1. 6. 1997 Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR jako státní organizace na základě atomového zákona (§ 26 zákona č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření). Od roku 2000 je SÚRAO ve smyslu § 51 zákona č. 219/2000 Sb. organizační složkou státu. [17]

Hlavní úkoly a činnosti SÚRAO:

- zajišťovat přípravu, výstavbu, uvádění do provozu, provoz a uzavření úložišť radioaktivních odpadů a monitorování jejich vlivu na okolí
- zajišťovat nakládání s radioaktivními odpady
- zajišťovat úpravu vyhořelého nebo ozářeného jaderného paliva do formy vhodné pro uložení nebo následné využití
- vést evidenci převzatých radioaktivních odpadů a jejich původců
- spravovat odvody původců radioaktivních odpadů na jaderný účet
- vypracovávat návrhy na stanovení odvodů plátců na jaderný účet
- zajišťovat a koordinovat výzkum a vývoj v oblasti nakládání s radioaktivními odpady
- kontrolovat rezervy držitelů povolení na vyřazování jejich zařízení z provozu
- poskytovat služby v oblasti nakládání s radioaktivními odpady
- nakládat s radioaktivními odpady, které byly dopraveny na území České republiky ze zahraničí a nelze je vrátit;
- zajišťovat prozatímní správu radioaktivních odpadů, které připadly do vlastnictví státu.

Mezi nejdůležitější úkoly patří zajišťování provozu úložišť nízko- a středněaktivních odpadů a příprava hlubinného úložiště. Od roku 2000 spravuje všechna úložiště radioaktivních odpadů v ČR. Koordinujeme všechny práce, které směřují k přípravě a výstavbě hlubinného úložiště vysokoaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva, jehož provoz se předpokládá kolem roku 2065. [17]

5 BEZPEČNOST JADERNÝCH ELEKTRÁREN

V provozu jaderných elektráren se uplatňují velmi přísné vnitřní kontroly, prověřování a péče jako snad v žádném odvětví lidské činnosti. Bezpečnost jaderné elektrárny a eventuální negativní dopady jaderných elektráren na okolí jsou samozřejmě neustále v centru pozornosti provozovatelů jaderných zařízení i nejširší veřejnosti. Je třeba si však uvědomit, že žádná absolutní bezpečnost neexistuje.

Pro zajištění bezpečnosti JE jsou nutné tři základní požadavky: bezpečný projekt, kvalitní technologie a vysoká úroveň provozování elektrárny. Tím je myšlena způsobilá obsluha elektrárny, kvalitní dokumentace, využívání provozních zkušeností, technická kontrola, radiační ochrana, požární bezpečnost atd. Kromě toho, že jaderná elektrárna musí odolat všem nepříznivým vlivům počasí, musí čelit také všemožným poruchám, haváriím i případným narušitelům v objektu.

Minimální požadavky k naplňování těchto cílů jsou dány „Atomovým zákonem“, mezinárodními doporučeními vydávanými Mezinárodní agenturou pro atomovou energii ve Vídni a dalšími organizacemi zabývající se touto problematikou.

JE disponují ochrannými, výkonnými a podpůrnými systémy zahrnující přístrojové vybavení pro monitorování bezpečnostně důležitých veličin a stavů JE a pro automatické spouštění výkonných bezpečnostních systémů. Podpůrné systémy zajišťují funkce ochranných a výkonných systémů (zajištění elektrického napájení, chlazení apod.). Stabilita a funkčnost bezpečnostních systémů musí být zajištěna při všech předpokládatelných událostech, tj. normální i abnormální provoz, výpadky zařízení, poruchy a nehody na jaderné elektrárně včetně maximální projektové nehody, zemětřesení, požáry, zátopy a události vyvolané lidskou činností apod.[19]

Hodnotící konference ve Vídni potvrdila vysokou úroveň jaderné bezpečnosti v ČR

Ve dnech 4. -14. dubna 2011 proběhla ve Vídni, v sídle MAAE, 5. hodnotící konference Úmluvy o jaderné bezpečnosti, dále jen Úmluva. Úmluva byla přijata na půdě MAAE ve Vídni 17. 6. 1994, vstoupila v platnost 24. 10. 1996 (ČR ji podepsala 20. 9. 1994) a v současnosti má 72 smluvních stran.

Hodnotící konference uzavírá tříletý cyklus, který zahrnuje zpracování a hodnocení národních zpráv jednotlivých smluvních stran. Národní zprávy popisují plnění závazků a požadavků vyplývajících z Úmluvy o jaderné bezpečnosti včetně případných opatření

přijatých na základě doporučení předchozích hodnotících cyklů. Národní zprávy jsou smluvními stranami předkládány MAAE nejpozději sedm a půl měsíce před plánovaným zahájením hodnotící konference a jednotlivé státy je mohou zveřejňovat nejen na webových stránkách odpovědných národních orgánů (v ČR SÚJB), ale příslušný odkaz je uveden také na webu MAAE. K národním zprávám mohou jednotlivé smluvní strany do čtyř měsíců před zahájením hodnotící konference pokládat doplňující otázky, které musí být smluvními stranami zodpovězeny nejméně měsíc před konferencí.

Smluvní strany jsou z důvodu detailnějšího hodnocení během hodnotící konference rozřazeny do šesti pracovních skupin – v každé z nich jsou jak země provozující JE, tak země bez JE. Na této hodnotící konferenci byla ČR zařazena do skupiny s Ruskem, Indií, Rumunskem, Polskem, Nizozemím, Maltou, Tureckem, Bangladéší a Jordánskem. ČR představila národní zprávu včetně přehledu nejnovějšího vývoje a svých aktuálních záměrů. Těmi jsou např. připravovaná dostavba JE Temelín, potřeba posílení státního dozoru nebo probíhající změny legislativy. ČR dále informovala o plánovaných opatřeních na zlepšování jaderné bezpečnosti včetně nejnovější reakce na havárii ve Fukushima. Ty zahrnují především zátěžové testy, které budou provedeny na všech evropských jaderných elektrárnách. Vlastní přehodnocení bezpečnosti vykoná jejich provozovatel, následně přezkoumá státní dozor a vyhodnotí Evropská Komise. Letošní hodnotící konference byla ovlivněna březnovou havárií v japonské jaderné elektrárně Fukushima Daichii, na kterou reagovaly všechny smluvní strany Úmluvy informací o vlastních národních opatřeních, uskutečněných i plánovaných. Japonsko se také zavázalo přehodnotit bezpečnost svých jaderných elektráren ve vztahu k vnějším rizikům. Smluvní strany se ve společném závěrečném prohlášení zavázaly, že na základě výsledků hodnocení havárie ve Fukushima přijmou patřičné kroky. [51]

Stejně jako v předchozích ročnících ČR obhájila, že provoz jaderných elektráren Dukovany a Temelín stejně jako výkon státního dozoru ze strany SÚJB probíhá plně v souladu se všemi ustanoveními a požadavky Úmluvy.

Monitorování veličin v jaderných zařízeních

V JE na našem území se používá tzv. „metoda dva ze tří“. Ta spočívá v tom, že veličiny jsou měřeny třemi na sobě nezávislými detektory. Poplach se spouští v případě, že alespoň na dvou detektorech byly překročeny povolené limity.

Inherentní bezpečnost

Inherentní bezpečnost je vlastnost technických zařízení, která je daná fyzikálními zákony a vlastnostmi, tzn. ne lidskými opatřeními. U tlakovodního reaktoru je daná fyzikálními vlastnostmi uranu a vody, které se podílejí na procesu jaderného štěpení.

Voda, sloužící jako moderátor, zvětšuje v důsledku růstu teploty svůj objem, dochází ke zvětšování vzdáleností mezi jednotlivými molekulami vody. V důsledku toho se snižuje moderační účinek vody, který je předpokladem pro vznik a existenci štěpné řetězové reakce. To má za následek pokles počtu tepelných neutronů, které jsou schopny štěpit jádra uranu, a tak dochází k útlumu štěpné reakce, což postupně může vést až k úplnému samoodstavení reaktoru. Proto ve všech případech, při kterých by došlo k růstu teploty vody v důsledku nežádoucího výkonu, se výkon reaktoru samovolně tlumí. Dokonce kdyby v případě havárie, která je spojená se ztrátou chladiva z primárního okruhu, neodstavily reaktor několikanásobně zálohované nezávislé havarijní ochrany, došlo by k zastavení štěpné reakce díky tomu, že se v aktivní zóně reaktoru tvoří pára, ve které jsou vzdálenosti mezi molekulami řádově větší než u vody. Tímto způsobem přispívá voda k inherentní bezpečnosti tlakovodních reaktorů. Na bezpečnosti provozu těchto reaktorů se však podílí i samotné jaderné palivo. Uran 238, který tvoří asi 97 % paliva, zasahuje regulačně do procesu štěpení tak, že sám absorbuje neutrony, aniž by se dále štěpil.

Lidský faktor

Velká pozornost je věnována přijímání zaměstnanců. Součástí výběrových pohovorů a testů jsou i testy psychické a zdravotní způsobilosti. Obsluha elektrárny musí absolvovat nejen náročnou odbornou přípravu, ale i výcvik.

V areálu JET byl vybudován pro budoucí obsluhu elektrárny plnorozsahový simulátor blokové dozorny. Jde o kopii řídicího sálu reaktorového bloku, která umí přesně napodobit matematický model chování reaktoru i primárního a sekundárního okruhu. Simulátor byl po získání licence od Státního úřadu pro jadernou bezpečnost zařazen do systému pravidelného výcviku operátorů na blokových dozornách. Základní příprava operátorů trvá více než dva roky. Oprávnění k výkonu funkce je operátorovi vystaveno až na základě státních zkoušek před státní zkušební komisí. [19]

Školící výcvikové středisko v Jaderné elektrárně Dukovany organizuje přípravu jak vlastních zaměstnanců, tak částečně i zaměstnanců dodavatelů. Základní teoretická

příprava probíhá v Centru přípravy a vzdělávání v Brně. Každý zaměstnanec elektrárny má předepsanou tzv. Normu odborné přípravy, tj. soupis všech školení a zkoušek, které musí úspěšně absolvovat, než je mu vystaveno Pověření k výkonu funkce. Zkoušky mají časově omezenou platnost a zaměstnanec je musí periodicky opakovat. [39]

Ztráta elektřiny

Jaderná elektrárna musí počítat i se ztrátou hlavního i rezervního elektrického napájení vlastní spotřeby elektrárny. Z tohoto důvodu je vybavena nouzovými zdroji elektrické energie (diesलगенерátorové stanice), které jsou schopny napájet důležité systémy zajišťující jadernou bezpečnost. Tyto systémy dokážou vytvořit podmínky pro bezpečné odstavení reaktoru, dochlazení a pro jeho udržení v bezpečném podkritickém stavu.

Bezletová zóna

Vzdušný prostor nad JE (včetně ÚJV Řež) je pod neustálým dohledem armády. Bezletová zóna bývá o průměru cca 4 000 m a výšce 1500 m. Ke každému letadlu, které by se přiblížilo se do bezletové zóny, odstartuje dvojice letounů Jas-39 Gripen. Tyto letouny mají za úkol dostat se ke každému letounu během několika minut a zasáhnout. Tento systém je stejný v celé Severoatlantické alianci.[6]

Ochrana před účinky vyvolanými pádem letadla

JE jsou projektovány tak, aby vydržely pád letadla. Hodnocení účinků bylo prováděno podle metodik Mezinárodní organizace pro civilní letectví. Výsledky výpočtů ukázaly, že při pádu letadla nedojde k nepřipustnému poškození systémů primárního okruhu, protože konstrukce stavebních částí důležitých pro jadernou bezpečnost je dostatečně odolná proti možným účinkům, které jsou vyvolány pádem letadla. Analýzy také ukázaly, že zálohované systémy pro chlazení aktivní zóny reaktoru ve spojení s jejich různou prostorovou lokalizací a stavební ochranou zajišťují, že i při případném pádu letadla zůstanou v činnosti systémy důležité pro odstavení a dochlazení reaktoru. Také havarijní zdroje energie jsou chráněny stavebními konstrukcemi. Podle expertů je pád letadla velmi nepravděpodobný, jelikož jen trefit oblast JE by bylo i pro zkušeného pilota velmi obtížné.

Havarijní připravenost

Havarijní připravenost je předpokladem úspěšného krizového řízení mimořádných událostí (kalamitních stavů, povodní, systémových poruch až po vyhlášení stavu nouze dle zák. č. 458/2000 Sb., „energetický zákon“). Podstatou krizového řízení je schopnost včas a správně reagovat při vzniku krizové situace, kalamity a jiné mimořádné události a na nejvyšší možnou míru eliminovat riziko ohrožení životů, zdraví, majetku nebo životního prostředí. Varování zaměstnanců a dalších osob v areálu JE se provádí neprodleně po provedení klasifikace vzniklé mimořádné události. Rozsah varování závisí na stupni závažnosti mimořádné události. K varování jsou v JE zpravidla používány venkovní sirény a závodní rozhlas. Po závažných haváriích je realizována tzv. zakázaná zóna, což je uzavřená oblast v okolí JE a její obyvatelé jsou evakuováni. Rozsah této zóny je dán závažností havárie, u JE Černobyl je to 30km, u JE Fukushima Daichii 20km.

Zajištění havarijní připravenosti JE znamená vytvoření technicko-organizačních podmínek pro:

- zjišťování vzniku mimořádné události
- posuzování závažnosti mimořádné události
- vyhlásování mimořádné události
- řízení a provádění zásahu
- způsoby omezení ozáření zaměstnanců a dalších osob
- ověřování havarijní připravenosti

Tab. 6. Popis mimořádných událostí [6]

Stupeň události	Popis události
1	Může vést k nepřipustnému ozáření zaměstnanců a dalších osob nebo nepřipustnému uvolnění radioaktivních látek do prostor jaderného zařízení nebo pracoviště, která má omezený, lokální charakter a k jejímu řešení jsou dostačující síly a prostředky obsluhy nebo pracovní směny a při přepravě nedojde k úniku radioaktivních látek do životního prostředí.
2	Vede nebo může vést k nepřipustnému závažnému ozáření zaměstnanců a dalších osob nebo k nepřipustnému uvolnění radioaktivních látek do životního prostředí, které nevyžaduje

	zavádění neodkladných opatření k ochraně obyvatelstva a životního prostředí, její řešení vyžaduje aktivaci zasahujících osob držitele povolení a k jejímu zvládnutí jsou dostačující síly a prostředky držitele povolení, případně síly a prostředky smluvně zajištěné držitelem povolení.
Stupeň události	Popis události
3	Vede nebo může vést k nepřípustnému závažnému uvolnění radioaktivních látek do životního prostředí, vyžadujícímu zavádění neodkladných opatření k ochraně obyvatelstva a životního prostředí, stanovená ve vnějším havarijním plánu a v havarijním plánu kraje. Událost třetího stupně je radiační havárie a její řešení vyžaduje kromě aktivace zasahujících osob držitele povolení a zasahujících osob podle vnějšího havarijního plánu, popřípadě havarijního plánu kraje zapojení dalších dotčených orgánů.

Působení jaderných elektráren na okolí

Při štěpné reakci v jaderné elektrárně vznikají nebezpečné radionuklidy. Během normálního provozu reaktoru vznikají tyto štěpné produkty v jaderném palivu. Většina tam zůstane a je z reaktoru odstraňována společně s vyhořelým jaderným palivem.

Plynné výpusti

Zpracování plynných radioaktivních odpadů znamená odloučení radioaktivních látek filtrací tak, aby se jejich aktivita snížila na nejnižší možnou úroveň. V případě, že úroveň aktivity zpracovaných plynných radioaktivních odpadů je nižší než limit, lze plynné radioaktivní odpady vypustit do ovzduší. V opačném případě je nutno pokračovat v procesu dekontaminace. Plynné výpusti se do ovzduší vypouští ventilačním komínem. Největším zdrojem aktivity plynných radioaktivních odpadů je ventilace odplyňovače vody primárního okruhu.

Výpusti do ovzduší se spojitě monitorují, aby nedošlo k ohrožení zdraví lidí a životního prostředí. Monitorování se provádí podle mezinárodních norem a zejména se sledují aerosoly, izotopy jódu, vzácné plyny, tritium, atd. Pro vypouštění látek obsahujících

radionuklidy do ovzduší jsou stanoveny tzv. autorizované limity, které jsou dány vyhláškami SÚJB o požadavcích na zajištění radiační ochrany.

Kapalné výpusti

Hlavním zdrojem aktivity kapalných odpadů je voda z primárního okruhu. Zpracování kapalných odpadů označuje proces snížení jejich aktivity a provádí se tak, že se aktivita koncentruje do co nejmenšího objemu. Tím vzniká relativně malý objem radioaktivního odpadu a velký objem dekontaminované kapaliny, která se vypustí do životního prostředí nebo se vrátí zpět do primárního okruhu.

Voda z primárního okruhu, která obsahuje radionuklidy, se čistí ve speciálních čistírnách odpadních vod. Hlavní procesy, kterými se provádí úprava radioaktivní vody, jsou destilace a čištění na speciálních filtrech. Vyčištěná voda se vrací zpět do technologických okruhů nebo je vypuštěna do životního prostředí. Než je voda vypuštěna z kontrolovaného pásma, odvede se do kontrolních nádrží, ve kterých se provádí její radiochemická analýza. Zbytky z čisticího procesu, tj. koncentrované kapalně radioaktivní odpady a použité filtry, jsou fixovány ve speciálních sudech a ukládány v úložišti JE Dukovany. Ročně je ukládáno asi 1000 sudů.[6]

Monitorování odpadních vod

Každá JE musí mít ve své blízkosti kvalitní zdroj vody. Většina odebrané vody se používá pro odvod zbytkového tepla z reaktoru. Cirkuluje v chladicím okruhu, kde se v chladicích věžích její část odpařuje. Tím se však koncentrují všechny látky, které voda původně obsahovala, a proto se její část musí průběžně vypouštět a nahrazovat novou vodou z přehrady. Některé základní vlastnosti a parametry odpadních vod jsou sledovány kontinuálně. U ostatních je jedenkrát za 14 dnů sledována jejich koncentrace v miligramech na litr, jejich okamžité množství v gramech za sekundu a celkově vypuštěné množství za rok v tunách.

Hluk a vibrace

Analýzy možných zdrojů hluku a vibrací ukazují, že JE nebývají zdrojem nadměrného hluku a vibrací. Elektrárny musí splňovat požadavky všech hygienických předpisů na ochranu proti hluku. Ani při provozu se neočekávají neúměrně zvýšené hodnoty hluku. Analýzy i měření rovněž ukázaly, že elektrárny nepůsobí ani při stavbě ani při provozu vibrace, které by mohly ovlivňovat její okolí.

5.1 Kontroly jaderných elektráren v ČR

Provádění a hodnocení kontrol v ČR

Tuto činnost má na starost SÚJB a provozovatel JE. Cílem je prověřit, zda kontrolované subjekty dodržují jak požadavky platného zákona a souvisejících předpisů, tak i požadavky SÚJB. SÚJB má dvě skupiny inspektorů v nejdůležitějších lokalitách jaderných elektráren, v Dukovanech a Temelíně. Kontroly jsou organizovány především v pololetních plánech kontrol, které testují znalosti o podmínkách provozu jaderných zařízení.

Tab. 7. Oblasti kontrol SÚJB v ČR[49]

Oblast kontroly	Kontrolované činnosti
Provoz	spouštění a provoz na výkonu, odstávky, nastavování systémů, obsluha zařízení, monitorování a zaznamenávání stavu zařízení za normálního provozu a v rámci přechodových stavů, dodržování limitů, podmínek a provozních předpisů, řešení abnormálních nebo havarijních stavů
Údržba	údržba systémů, komponent jaderných zařízení, testování zařízení, včetně provozních a předprovozních kontrol, kalibrace, zkoušky těsnosti hermetických prostor
Technická podpora	technická a dokumentační podpora provozu, odstávek, údržby a zkoušek, kontrola a řízení projektů a projektových změn, šetření mimořádných událostí a zpětná vazba, příprava personálu
Radiační ochrana	Radiační ochrana provozu, monitorování a uvolňování radionuklidů do životního prostředí, bezpečnost zdrojů ionizujícího záření, nakládání s radioaktivními odpady, havarijní připravenost
Jaderné materiály	přeprava a nakládání jaderných materiálů a radioaktivních látek, evidenci a kontrola vývozu a dovozu těchto materiálů

Kontroly jsou specializované, zaměřené na jednu oblast, systém nebo zařízení, a periodicky prováděné. Podle situace na zařízení jsou nad rámec plánu prováděny kontroly zaměřené na řešení konkrétní problematiky v objektu. Mimořádné kontroly jsou provedeny například

pro zhodnocení připravenosti zařízení před vydáním povolení k jednotlivým etapám uvádění zařízení do provozu nebo k provozu nebo prošetření neobvyklé události. Výsledky provedených kontrol jsou pravidelně hodnoceny komisí pro hodnocení kontrolní činnosti, která jedenkrát za měsíc prodiskutuje podklady inspektorů. Dvakrát ročně je pak vytvořeno souhrnné hodnocení jaderného zařízení nebo jiných kontrolovaných osob. Jednotlivé oblasti jsou dále členěny do podoblastí tak, aby hodnocení, vycházející ze závěrů kontroly, co nejlépe vyjadřovalo stav jaderného zařízení.

Výsledky jednotlivých kontrol jsou vyjádřené ve čtyřech kategoriích, popisované v Tab. 7.

Tab. 8. Hodnocení kontrol v JE[48]

Kategorie kontroly	Výsledek kontroly
1	Pozornost je důsledně zaměřena na dodržení požadavků na jadernou bezpečnost a radiační ochranu. Programy, postupy a předpisy poskytují efektivní kontrolu. Nápravná opatření jsou technicky řádná, souhrnná, a úplná. Problémy jsou včas řešeny s důsledným využitím analýz kořenových příčin, které jdou do hloubky.
2	Pozornost je zaměřena na jadernou bezpečnost a radiační ochranu. Programy, postupy a předpisy poskytují nutnou kontrolu aktivit, ale mohou se vyskytovat i některé nedostatky. Výsledky analýz kořenových příčin jsou uplatňovány tak, že nápravná opatření jsou většinou efektivní
3	Pozornosti věnovaná jaderné bezpečnosti a radiační ochrany je na nízké úrovni. Programy, postupy nebo předpisy neposkytují dostatečnou kontrolu aktivit v důležitých oblastech. Vyšší počet méně závažných problémů naznačuje, že nápravná opatření nejsou včasná. Analýzy kořenové příčiny nejdou dostatečně do hloubky.
N	Neexistují dostatečné informace k hodnocení stavu z důvodů neexistujících aktivit držitele povolení nebo nedostatečné

	kontrolní činnosti ze strany SÚJB.
--	------------------------------------

Tab. 9. Počty kontrol v jaderných zařízeních v ČR [45]

Jaderné zařízení	Provoz	Údržba	Technická podpora	Radiační ochrana	Jaderné materiály
Temelín	84	67	61	31	4
Dukovany	37	30	28	23	6
ÚJV Řež	0	1	0	3	3

Hodnocení provozně-bezpečnostních ukazatelů

SÚJB hodnotí každoročně dosaženou úroveň jaderné bezpečnosti provozu jaderných elektráren pomocí provozně-bezpečnostních ukazatelů. Prvním hodnoceným rokem byl rok 1991 v JE Dukovany. Základy těchto ukazatelů byly vypracovány počátkem devadesátých let, k úpravám a rozšíření došlo v letech 1997 a 1998. Ukazatele, uváděné v materiálech MAAE, byly modifikovány pro podmínky v ČR. Pět ukazatelů je shodných s ukazateli používanými asociací World Association of Nuclear Operators. Rok 2003 byl prvním rokem, kdy bylo provedeno hodnocení provozně-bezpečnostních ukazatelů i pro jadernou elektrárnu Temelín. SÚJB shromažďuje v průběhu kalendářního roku soubor dat, jehož zdrojem jsou jednak informace, které předává doзору provozovatel jaderné elektrárny, jednak vlastní zjištění z kontrolní činnosti inspektorů SÚJB. Provozně-bezpečnostní ukazatele hodnotí čtyři oblasti provozu JE:

1. Významné události (neplánované události, odstávka reaktoru, aj.)
2. Provoz bezpečnostních systémů (neprovozoschopnost, selhání systémů)
3. Těsnost bariér (jaderné palivo, hermetické prostory)
4. Radiační ochrana (personál, radioaktivní výpusti)

Souhrnný dokument zveřejňuje SÚJB každoročně jako přílohu své výroční zprávy.[50]

5.2 Zabezpečení jaderných elektráren

Zabezpečení JE je jedna ze zásadních věcí, které pomáhají plynulému chodu elektrárny. Hlavním úkolem je zamezit vniknutí vetřelců do areálu. Z bezpečnostních důvodů je většina těchto informací utajených nebo je smluvně zakázáno o nich mluvit.



Obr. 20. Oplocení jaderné elektrárny Temelín [46]

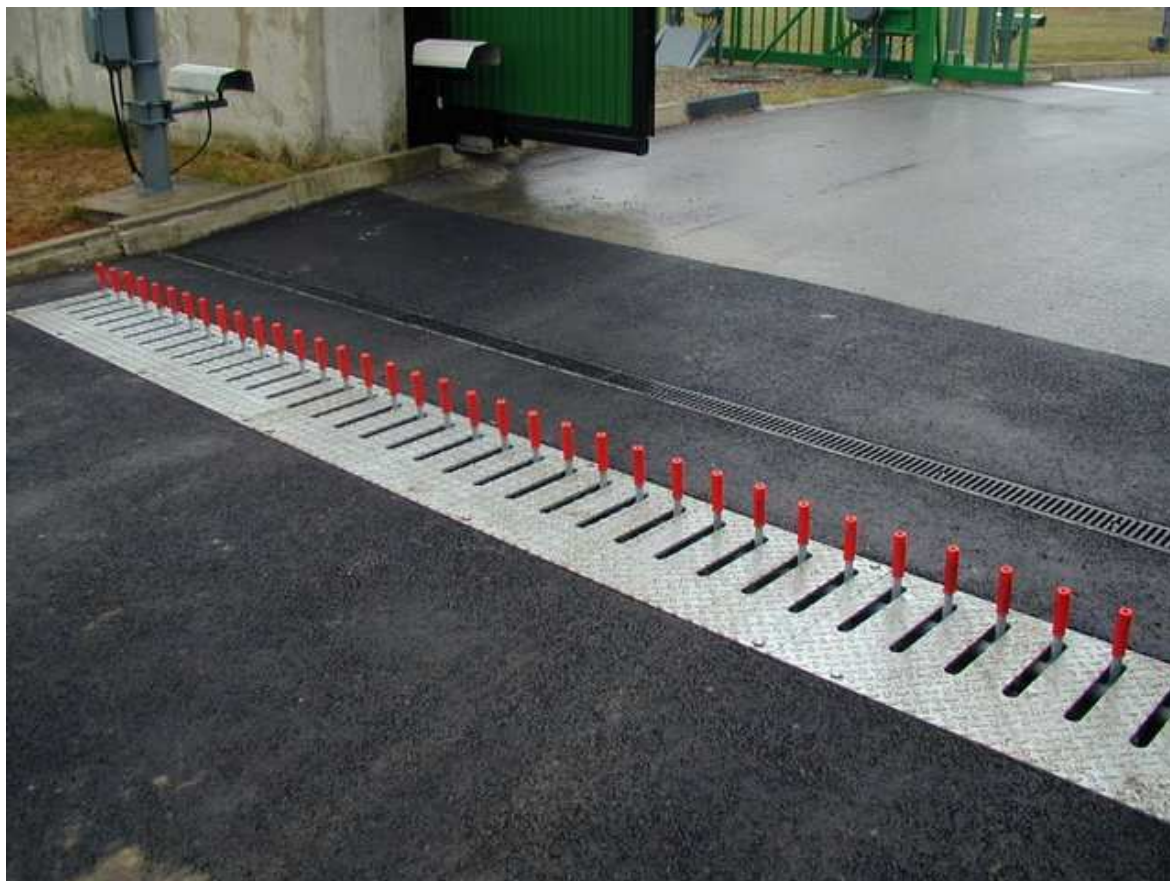
Kontroly probíhají všude stejně, ale zabezpečení každé JE se liší. Počínaje např. zabezpečením perimetru areálu. JE Dukovany chrání betonový plot, naproti tomu areál JE Temelín je obehnán dvojitým žiletkovým plotem (Obr. 20. a Obr. 21.).

Jako pletivo plotu je nejčastěji používané robustní svařované pletivo Bastille, které je speciálně vyvinuté pro oplocení průmyslových objektů. Hustá obdélníková oka a trny v horní části plotu zaručují obrannou i ochrannou funkci pletiva. Horní část plotu tvoří ocelové pásky ve tvaru ostrých žiletek na drátě z tvrdé nebo nerezové oceli.



Obr. 21. Detail- oplocení jaderné elektrárny [46]

Velká pozornost je přisuzována i přístupu do JE. V ÚJV Řež jsou kladeny menší nároky než u JE. Zde je fyzická kontrola u vstupu, ale detekce kovu a radioaktivity je řešena až v objektech, kde se nacházejí experimentální reaktory. Kriminalita v ÚJV je téměř nulová, v posledních letech zde byla odcizena pouze jedna tuna olova. U JE jsou kontroly daleko rozsáhlejší. Např. v Temelíně se u vstupu prochází detekčními rámy kovu, zatímco osobní věci procházejí bezpečnostním rentgenem. Osoba dále musí prokázat totožnost pomocí čipové karty a vlastní dlaně. Sérii kontrol zakončuje detekce radioaktivity. Fyzická ochrana samozřejmě kontroluje i vozidla jedoucí do nebo z objektu, ochranu zde také doplňují mechanické zábranné systémy a poplachové zabezpečovací systémy (Obr. 22).



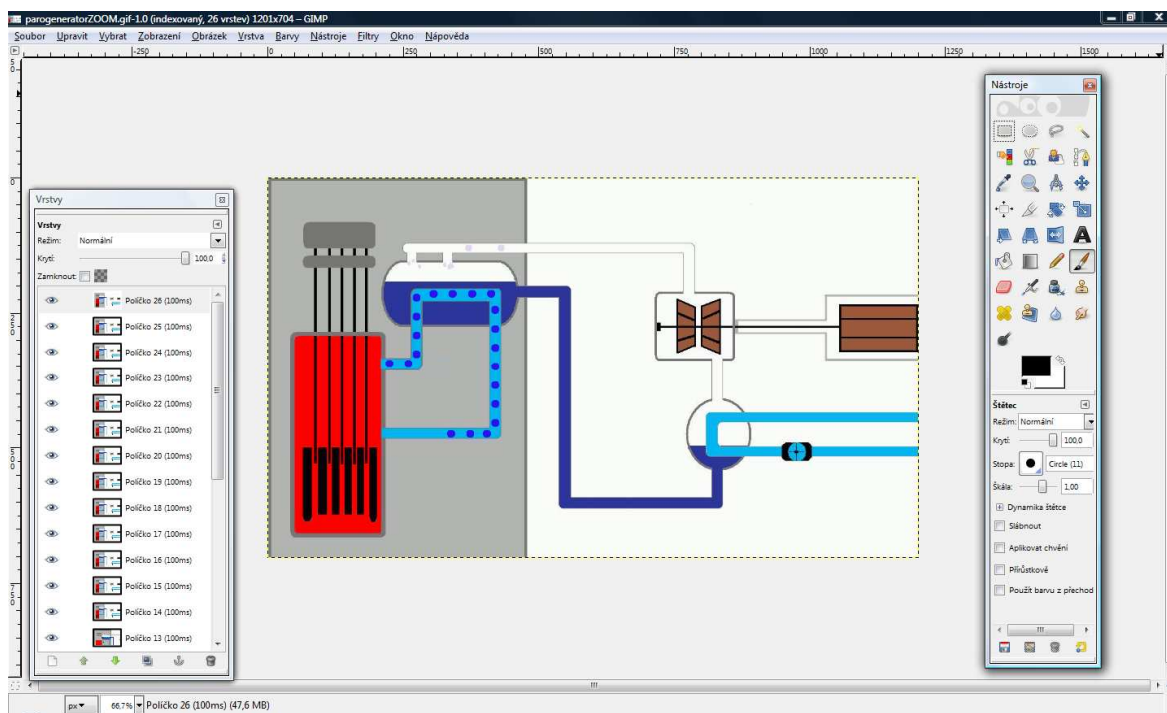
Obr. 22. Hřebenová bariéra v JE Dukovany [46]

6 GIMP

GIMP je grafický editor sloužící ke tvorbě a úpravě bitmapových obrázků. Program poskytuje mnoho výhod. Je distribuován pod licencí General Public License. Díky bohaté zásobě funkcí je velmi rozšířen. Gimp byl nejdříve vyvinut pro operační systémy linuxového typu, v současnosti je k dispozici pro všechny běžně používané operační systémy.

GIMP nabízí velmi bohatou paletu nástrojů pro kreslení, práci s vrstvami, filtry a efekty, nástroje na výběr částí obrázku, úpravy barev, jasu či kontrastu apod. Funkce grafického editoru může být navíc rozšířena pomocí plug-in modulů. Editor si poradí s většinou formátů, např. JPG, GIF, TIF, BMP, PDF aj.

Nejvíce používané okna jsou vyobrazeny na Obr. 23., kde v levé části je Panel vrstev, v pravé Panel nástrojů a uprostřed pracovní plocha.



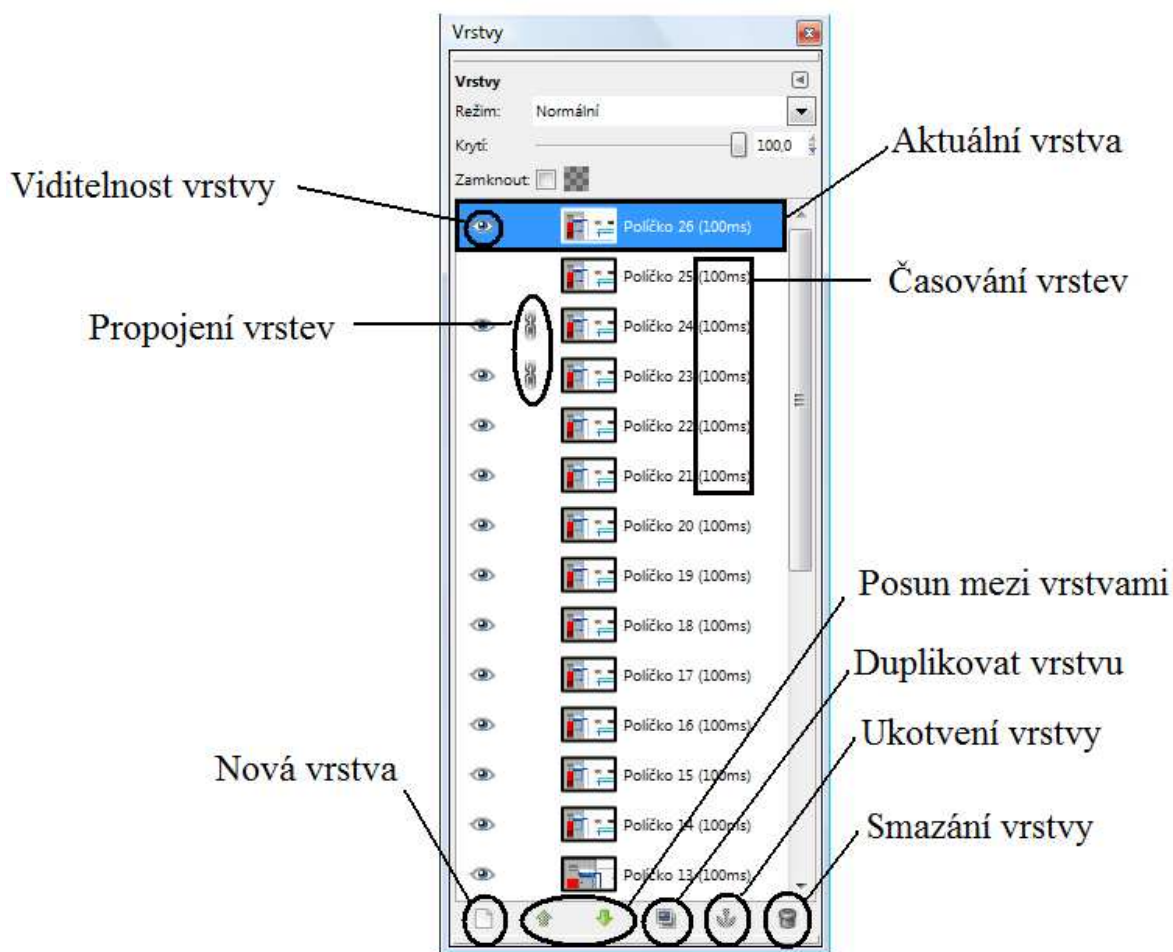
Obr. 23. Prostředí editoru GIMP

Nejpoužívanějšími kreslicími nástroji jsou tužka, štětec, guma a plechovka s barvou. Každý nástroj má své individuální možnosti, jako např. barva, styl, šířka tahu. Jednotlivé kreslicí nástroje, např. plechovka s barvou, je vhodné kombinovat s nástroji pro výběr. Je zde výběr obdélníku nebo eliptických částí sloužící k výběru geometrických oblastí. Dále je zde možnost volného výběru, kde si uživatel sám vytvoří požadovaný výběr. Podobná, ale rychlejší, je možnost přibližného výběru, který na základě výpočtů označí oblasti s podobným nebo stejným odstínem. Citlivost výpočtů lze individuálně nastavit.

6.1 Tvorba animací

Animace je způsob vytváření zdánlivě se pohybujících věcí. Principem je zaznamenání sekvence snímků, které se od sebe jen drobně liší. Při rychlém zobrazování snímků za sebou vzniká dojem pohybu, díky setrvačnosti lidského oka.

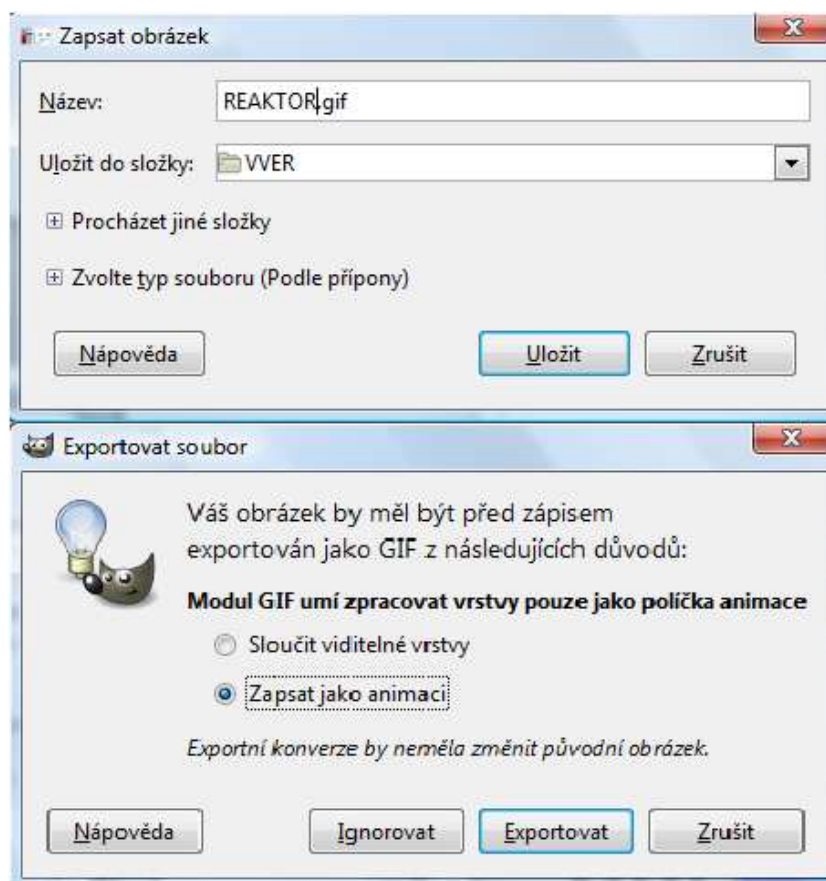
Editor Gimp podporuje tvorbu animací. Ty jsou tvořeny pomocí vrstev. Vrstvy mohou být interpretovány jako průhledné fólie naskládané na sobě. Na každou vrstvu mohou být nakresleny jednotlivé části obrazu. Vrstvy umožňují nezávislou práci s jednotlivými částmi obrazu. Každou vrstvu lze libovolně modifikovat nezávisle na ostatních vrstvách, protože obsah vrstvy se chová jako samostatný obrázek. S počtem vrstev se lineárně zvětšuje velikost celé animace. Práci s vrstvami usnadňuje Dialog vrstvy.



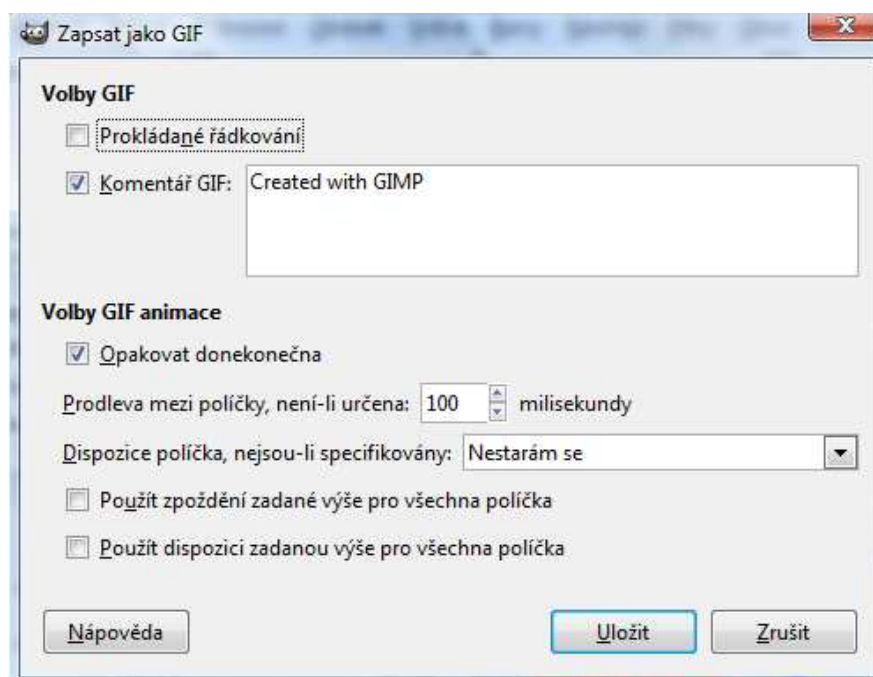
Obr. 24. Dialog vrstvy

Vrstvy musí být v konečné fázi poskládány tak, že prvním snímkem animace začíná a posledním končí.

Animace se ukládají podobně jako obrázky (Obr. 25). Dále se dá nastavit časování animace (Obr. 26), které však lze pak nastavit individuálně.



Obr. 25. Ukládání animace



Obr. 26. Finální uložení animace, nastavení časování vrstev

ZÁVĚR

Cílem práce byla snaha o shrnutí základních vstupních informací o fungování, využití a zabezpečení provozu jaderných elektráren v ČR a ve světě.

První část je zaměřena na využití jaderné energie. V další části jsou pak popsány počátky jaderných elektráren, aktuální situace jaderných elektráren u nás i ve světě a je zde i nastíněna možná budoucnost elektráren, přičemž jsou popsány typy jaderných reaktorů, které by mohly být v provozu kolem roku 2030.

Další část práce se zabývá činností současných reaktorů, což je zásadní z hlediska pochopení technologií i funkcí JE. Jako součást práce byly v grafickém editoru GIMP vytvořeny animace popisující chod používaných reaktorů. Tyto animace jsou obsaženy v příloze práce. V práci jsou zmíněny i druhy jaderných paliv a problematika jaderném odpadu, možnosti jeho uložení v ČR a možnost jeho přepracování, aby se dalo dále používat. Jedna část práce obsahuje popis nejzávažnějších jaderných havárií, kde jsou popsány příčiny, průběhy, následky a hodnocení. Poslední část práce je zaměřena na bezpečnost jaderných elektráren. Je popsána bezpečnost a kontroly v jaderných zařízeních, působení elektráren na okolí a samotné zabezpečení jaderných elektráren, které zabraňuje vstupu nepovolaných osob do areálu.

Jaderné elektrárny jsou nedílnou součástí dnešní doby, která má velké energetické potřeby. Jejich bezpečnost i provozování je realizováno na vysoké úrovni, o čemž se autor této práce osobně přesvědčil na exkurzích v JE Temelín a ÚJV Řež.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

Aim of this work was to summarize the basic input information about operation, use and security of nuclear power plants in the Czech Republic and the world.

The first part is focused on usage of nuclear energy. In next section are described the origins of nuclear power plants, current situation of nuclear power plants in our country and abroad and there is also outlined possible future power plants, which describes the types of nuclear reactors could be working around 2030.

Another part deals with reactors, which is essential for the understanding of technology and functions in nuclear power plants. As part of work were created animations by graphic editor GIMP describing operation of the reactors. These animations are contained in the annex of work. In work are also mentioned types of nuclear fuel and nuclear waste, options remain in Czech Republic and the possibility of reprocessing that could continue to use. One part of work contains a description of the most serious nuclear accident, which describes the causes, course, consequences and rating. The last part is focused on the nuclear power plants safety. It describes safety and control in nuclear facilities, the effect of plants on the environment and nuclear power plants security, which prevents unauthorized entry to the complex.

Nuclear power plants are an integral part of today, which has great energy needs. Their safety and the operation are performed at high level, as the author of this work personally persuaded the excursions and in the nuclear power plant Temelin and Nuclear Research Institute Rez.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] RAČEK, Jiří. *Jaderné elektrárny*. Brno : VUT, 2008. 222 s. ISBN 978-80-214-3770-8.
- [2] VANĚK, Václav. *Bez jádra to nepůjde*. Praha: ČEZ a.s. 2008.
- [3] TŮMA, Miroslav. *Mírové využívání jaderné energie, nešíření jaderných zbraní a jaderné odzbrojení*. Praha: Ústav mezinárodních vztahů. 2009. ISBN 978-80-86506-77-7
- [4] HOUDEK, František . *Muž, který dokázal zkrotit i rozbouřit atom* [online]. 25.11.2004 [cit. 2010-12-15]. Dostupné z WWW: <http://finweb.ihned.cz/1-10075640-15260400-006000_d-e9>.
- [5] *World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements* [online]. 13.4.2011 [cit. 2011-5-7]. Dostupné z WWW: <<http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html>>.
- [6] *Jaderná energetika* [online]. c2010 [cit. 2010-12-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika.html>>.
- [7] *Ústav jaderného výzkumu Řež a.s.* [online]. c2009 [cit. 2011-02-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.ujv.cz/>>.
- [8] 2. blok JE V1 v Jaslovských Bohuniciach odstavili. *TA3* [online]. 31.12.2008, [cit. 2010-12-10]. Dostupný z WWW: <http://www.ta3.com/sk/reportaze/108004_2-blok-je-v1-v-jaslovskych-bohuniciach-odstavili>.
- [9] *Slovenské elektrárne, a.s.* [online]. c2004 [cit. 2010-12-05]. História. Dostupné z WWW:<<http://www.seas.sk/elektrarne/atomove-elektrarne/atomove-elektrarne-bohunice/historia-ebo/>>.
- [10] BEČVÁŘ, Josef a kolektiv. *Jaderné elektrárny*. Druhé opravené vydání. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [11] *Výroba jaderné energie* [online]. [cit. 2011-01-03]. Jaderný reaktor. Dostupné z WWW: <<http://www.jaderna-energie.cz/jaderny-reaktor.htm>>.
- [12] *Výroba jaderné energie* [online]. [cit. 2011-01-03]. Typy jaderných reaktorů. Dostupné z WWW: <<http://www.jaderna-energie.cz/jaderny-reaktor-typy.htm>>.
- [13] AUGUSTA, Pavel, et al. *Velká kniha o energii*. Praha : L.A. Consulting Agency, 2001. ISBN 80-238-6578-1.

- [14] *Nuclear Power in the United Kingdom* [online]. Prosinec 2010 [cit. 2011-01-15]. World Nuclear Association. Dostupné z WWW: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf84.html>>.
- [15] WAGNER, Vladimír. Bude dost surovin pro jadernou energetiku?. *Osel* [online]. 18.07.2008, [cit. 2011-05-01]. Dostupný z WWW:<<http://www.osel.cz/index.php?clanek=3778>>.
- [16] *Jaderný odpad* [online]. [cit. 2011-01-08]. Dostupné z WWW: <<http://www.jaderny-odpad.cz/>>.
- [17] *Správa úložišť radioaktivních odpadů* [online]. [cit. 2011-01-010]. Dostupné z WWW: <<http://www.surao.cz/>>.
- [18] *Radioaktivní odpady a skupina ČEZ*. Praha : Skupina čez, [200?]. 31 s.
- [19] *Jaderná bezpečnost* [online]. [cit. 2011-02-10]. Dostupné z WWW:<<http://www.jaderna-bezpecnost.cz>>.
- [20] Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí. In *INES - Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí - Uživatelská příručka* [online]. Překlad vydání. SÚJB, 2001 [cit. 2011-02-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.sujb.cz/docs/INES.pdf>>.
- [21] *Jaderné elektrárny* [online]. c2011 [cit. 2011-02-14]. Havárie v Jaslovských Bohunicích. Dostupné z WWW: <<http://www.smartweb.cz/lukasvranek/index.php?nid=3244&lid=CZ&oid=411358>>.
- [22] Co se jaderníci naučili díky Three Mile Island. *3pól* [online]. 31. 3. 2009, [cit. 2011-02-10]. Dostupný z WWW: <<http://3pol.cz/774-co-se-jadernici-naucili-diky-three-mile-island>>.
- [23] *Havárie jaderné elektrárny Černobyl* [online]. c2006 [cit. 2011-02-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.cernobyl.cz/>>.
- [24] *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. 2011 [cit. 2011-02-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.sujb.cz/>>.
- [25] *Havárie v Černobylu* [online]. c2006 [cit. 2011-02-21]. Jaderná elektrárna Černobyl dnes. Dostupné z WWW: <<http://www.cernobyl-havarie.cz/elektrarna-cernobyl-dnes.html>>.

- [26] *Jaderná elektrárna Temelín*. České Budějovice : Odbor komunikace Divize výstavba JE Temelín, 2000. 68 s.
- [27] Statistická ročenka České republiky 2010. In *Výroba elektřiny a ostatních energetických zdrojů* [online]. [s.l.] : [s.n.], 24.11. 2010 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.czso.cz/csu/2010edicniplan.nsf/kapitola/0001-10--1600>>.
- [28] *Jaderná energetika v číslech* [online]. Praha : [s.n.], 2009 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/vyzkum-a-vzdelavani/pro-studenty/materialy-ke-studiu/tiskoviny/21.html>>.
- [29] BACHER, Pierre. *Energie pro 21. století*. Paris : Éditions Nucléon, 2003. 182 s. ISBN 80-902403-7-2.
- [30] *Pokročilé jaderné technologie a skupina ČEZ*. Praha : Skupina ČEZ, [200?]. 39 s.
- [31] SPILKA, Petr; SUCHARDA, Jan. *Jaderná elektrárna Dukovany včera, dnes a zítra : Stručná kronika 25 let provozu*. Praha : Skupina ČEZ, 2010. 96 s.
- [32] *Pro atom web* [online]. c2009 [cit. 2011-04-02]. Typy jaderných reaktorů. Dostupné z WWW: <<http://proatom.luksoft.cz/jaderneelektrany/typyreaktoru/>>.
- [33] *Ústav jaderného výzkumu Řež a.s.* [online]. c2009 [cit. 2011-04-03]. Reaktor LVR - 15. Dostupné z WWW: <<http://www.nri.cz/web/ujv-800/reaktor-lvr-15>>.
- [34] *Ústav jaderného výzkumu Řež a.s.* [online]. c2009 [cit. 2011-04-03]. Reaktor LR - 0. Dostupné z WWW: <<http://www.ujv.cz/web/ujv-800/reaktor-lr-0>>.
- [35] *Co vás zajímá o nehodě elektrárny Fukušima 1* [online]. 2011 [cit. 2011-04-03]. Dostupné z WWW: <<http://fukusima.protebe.info/>>.
- [36] *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. 2011 [cit. 2011-19-05]. Aktuální informace k jaderné havárii Fukushima 1. Dostupné z WWW: <http://www.sujb.cz/?c_id=1095>.
- [37] *Submarine Force Museum* [online]. c2011 [cit. 2011-04-15]. History of USS NAUTILUS (SSN 571). Dostupné z WWW:<<http://www.ussnautilus.org/nautilus>>.
- [38] JANČAR, Rostislav. Jak funguje Temelín. Byli jsme přímo v srdci reaktoru. *Technet.cz* [online]. 30. dubna 2007, 20000, [cit. 2011-04-16]. Dostupný z WWW:

<http://technet.idnes.cz/jak-funguje-temelin-byli-jsme-primo-v-srdci-reaktoru-f9n-tec_reportaze.asp?c=A070417_135542_tec_technika_rja>.

[39] *Skupina ČEZ* [online]. c2011 [cit. 2011-04-17]. Dukovany. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrany-cez/edu.html>>.

[40] *Studijní materiál JE* [online]. Praha : ČVUT, [201?] [cit. 2011-04-16]. Dostupné z WWW: <<http://vyuka.fel.zcu.cz/kee/JE-nuclear/studijn-materil-JE.pdf>>.

[41] GAZSI, Roman. *Richard* [online]. 29. 04. 2010 [cit. 2011-04-16]. Úložiště radioaktivních odpadů – areál bývalého dolu Richard II. Dostupné z WWW: <<http://richard-1.com/richard2/surao.htm>>.

[42] *Státní úřad radiační ochrany* [online]. c2011 [cit. 2011-04-16]. Informace o funkci a organizaci RMS. Dostupné z WWW: <<http://www.suro.cz/cz/rms>>.

[43] *Rejstřík veřejných výzkumných institucí* [online]. c2011 [cit. 2011-04-16]. Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v. v. i. Dostupné z WWW: <http://www.sujchbo.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=5&Itemid=10&lang=cs>.

[44] TINKA, Ivan. *Co vás zajímá o nehodě elektrárny Fukušima 1* [online]. 2011 [cit. 2011-04-17]. Fukushima Daiichi: příčiny-průběh-následky. Dostupné z WWW: <http://fukusima.protebe.info/sites/images/fukusima_priciny_prubeh_nasledky.pdf>.

[45] *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. 2009 [cit. 2011-04-17]. Přehledy počtů kontrol provedených v jaderných zařízeních podle základních oblastí kontroly. Dostupné z WWW: <<http://www.sujb.cz/docs/PoctyKontrol2008.pdf>>.

[46] *Dirickx bohemia* [online]. c2008 [cit. 2011-04-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.dirickx.cz/>>.

[47] WAGNER, Vladimír . Reaktory IV, generace. *Osel* [online]. 16.05.2008, [cit. 2011-04-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.osel.cz/index.php?clanek=3568>>.

[48] *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. c2011 [cit. 2011-04-25]. Provádění a hodnocení kontrol. Dostupné z WWW: <http://www.sujb.cz/?c_id=169>.

[49] *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. c2011 [cit. 2011-04-25]. Oblasti kontroly. Dostupné z WWW: <http://www.sujb.cz/?c_id=552>.

[50] *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. c2011 [cit. 2011-05-9]. Hodnocení provozně-bezpečnostních ukazatelů. Dostupné z WWW: <http://www.sujb.cz/?c_id=475>.

[51] *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. c2011 [cit. 2011-05-9]. Hodnotící konference ve Vídni potvrdila vysokou úroveň jaderné bezpečnosti v ČR. Dostupné z WWW: <http://www.sujb.cz/?c_id=1103>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

JE	Jaderná elektrárna.
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii.
ZHN	Zbraně hromadného ničení.
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost.
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu
INSARR	Integrated Safety Assessment of Research Reactor
JET	Jaderná elektrárna Temelín
INES	Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí
OECD	Organizaci pro ekonomickou spolupráci a rozvoj
SÚRO	Státní ústav radiační ochrany
SÚJCHBO	Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Podíl jaderné energie na výrobě elektřiny v roce 2007 [28]	15
Obr. 2. Reaktor LVR-15 [33]	17
Obr. 3. Řez reaktorem LVR-15 [33]	18
Obr. 4. Řez reaktorem LR-0 [34]	20
Obr. 5. Jaderná elektrárna Temelín [38]	21
Obr. 6. Hermetický uzávěr kontejmentu [38]	23
Obr. 7. Schéma reaktoru VVER	32
Obr. 8. Schéma reaktoru PWR	33
Obr. 9. Schéma reaktoru CANDU [32]	34
Obr. 10. Schéma reaktoru GRC [32]	34
Obr. 11. Schéma reaktoru AGR [40]	35
Obr. 12. Schéma reaktoru RBMK [32]	36
Obr. 13. Schéma reaktoru HTGR [40]	37
Obr. 14. Schéma reaktoru FBR [40]	38
Obr. 15. Známé a těžitelné zásoby uranu (2007) [28]	40
Obr. 16. Přípovrchová úložiště v ČR [17]	43
Obr. 17. Vstup do úložiště Richard u Litoměřic [41]	44
Obr. 18. Sudy s odpadem v úložisti Richard [41]	44
Obr. 19. Statut jaderných elektráren po zemětřesení [44]	51
Obr. 20. Oplocení jaderné elektrárny Temelín [46]	65
Obr. 21. Detail- oplocení jaderné elektrárny [46]	66
Obr. 22. Hřebenová bariéra v JE Dukovany [46]	67
Obr. 23. Prostředí editoru GIMP	68
Obr. 24. Dialog vrstvy	69
Obr. 25. Ukládání animace	70
Obr. 26. Finální uložení animace, nastavení časování vrstev	70

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Výroba elektřiny v ČR [27]</i>	<i>14</i>
<i>Tab. 2. Celkový nainstalovaný výkon elektráren v ČR</i>	<i>15</i>
<i>Tab. 3. Účinnost reaktorů a státy, kde jsou[32]</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 4. Stupnice INES [20]</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 5. Stav elektrárny Fukushima Daichii ke dni 10.5.2011 [36]</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 6. Popis mimořádných událostí [6]</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 7. Oblasti kontrol SÚJB v ČR[49]</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 8. Hodnocení kontrol v JE[48]</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 9. Počty kontrol v jaderných zařízeních v ČR [45]</i>	<i>64</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Obsah vloženého CD:

CD je součástí bakalářské práce a obsahuje dva následující adresáře:

1. Bakalarska_prace - obsahuje textovou verzi bakalářské práce ve formátu *.doc a *.pdf
2. Animace_reaktoru – adresář obsahuje 3 zdrojové soubory (GIF) pro 3 zrealizované animace reaktorů, konkrétně jsou to reaktory VVER, PWR a FBR.