

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta
Ústav pro životní prostředí



Jaroslav Kukla
**OTÁZKY BEZPEČNOSTI MODERNÍCH
JADERNÝCH REAKTORŮ**

Bakalářská práce

Praha 2010

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Rudolf Přibil, CSc.

Prohlašuji, že jsem svou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.
Souhlasím se zapůjčováním práce.

V Praze dne 1. 6. 2010

Jaroslav Kukla

Název práce:

Otázky bezpečnosti moderních jaderných reaktorů

Autor:

Jaroslav Kukla

Vedoucí bakalářské práce:

RNDr. Rudolf Přibil, CSc.

Abstrakt:

Tato práce se zabývá bezpečností jaderných reaktorů. Shrnuje historii vývoje jaderných reaktorů a rozebírá příčiny některých závažných havárií, které se v minulosti udály. Popisuje fyzikální vlastnosti radioaktivního záření a uvádí základní přehled veličin a jednotek. Dále popisuje vliv radioaktivního záření na člověka a na další živé organismy. Definuje některé komponenty reaktoru a zaměřuje se na obecné bezpečnostní principy, které rozvíjí. Stručně vysvětluje metody hodnocení bezpečnosti jaderných reaktorů a úlohu jaderného dozoru. Řadí jaderné reaktory do několika generací a každý typ reaktoru zvlášť popisuje po technické a bezpečnostní stránce. Poukazuje na soudobé trendy ve vývoji jaderných reaktorů a na trendy ve vývoji jejich bezpečnosti.

Klíčová slova:

bezpečnost, jaderný reaktor, jaderná energie, jaderná elektrárna, jaderná bezpečnost, radioaktivita

Title:

Safety problems of modern nuclear reactors

Author:

Jaroslav Kukla

Supervisor:

RNDr. Rudolf Přibil, CSc.

Abstract:

This study is concerned with safety factors of nuclear reactors. It summarizes history of nuclear reactors development and analyses causes of some serious accidents, which occurred in the past. It describes physical characteristics of radioactive radiation and mentions a basic survey of quantities and units. Then it describes the influence of radioactive emission on man and other living organisms. It also defines some reactor components and focuses on general security principles, which are further developed. It shortly explains the methods of evaluation of safety factors of nuclear reactors and a role of nuclear supervision. It puts nuclear reactors into several generations and every type of reactor is described as for technical and safety aspects, respectively. It refers to contemporary trends in development of nuclear reactors and in development of their safety.

Keywords:

safety, nuclear reactor, nuclear energy, nuclear power plant, nuclear safety, radioactivity

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce RNDr. Rudolfu Přibilovi, CSc. za vstřícný a laskavý přístup. Dále děkuji panu RNDr. Vladimíru Wagnerovi, CSc. a panu Mgr. Marku Bozenhardovi za odbornou konzultaci některých nejasností.

Obsah:

1 Úvod	6
2 Historie	7
2.1 Vývoj jaderných reaktorů	7
2.2 Historie vybraných havárií jaderných reaktorů.....	9
3 Vliv radioaktivity na živé organismy	11
3.1 Charakteristika radioaktivního záření	11
3.2 Stručný přehled základních veličin a jednotek	11
3.3 Biologické účinky ionizujícího záření na člověka	12
3.4 Účinky ionizujícího záření na ostatní organismy.....	13
4 Jaderný reaktor	15
5 Zabezpečení jaderných reaktorů	17
5.1 Bezpečnostní principy jaderných reaktorů	17
5.2 Hloubková ochrana	18
5.2.1 Bezpečnostní systémy.....	18
5.2.2 Fyzické bariéry	19
5.2.3 Havarijní připravenost	20
6. Hodnocení bezpečnosti jaderných reaktorů	22
6.1 Četnost poškození aktivní zóny	22
7 Jaderný dozor	24
8 Faktory ovlivňující bezpečnost jaderného reaktoru	25
8.1 Stárnutí jaderných reaktorů.....	25
9 Typy jaderných reaktorů a jejich bezpečnost	26
9.1 Reaktory I. generace	26
9.2 Reaktory II. generace	26
9.3 Reaktory III. generace	28
9.4 Reaktory IV. generace	30
10 Současný trend vývoje jaderných reaktorů	33
11 Vývoj bezpečnostních požadavků	34
12 Závěr	35
13 Seznam použitých zdrojů	36
14 Seznam použitých zkratk	41
15 Seznam příloh	43

1 Úvod

Energetická poptávka lidstva se neustále zvyšuje. Hledají se proto způsoby, které by byly schopny zajistit dostatek potřebné energie na několik dalších tisíciletí. Musejí však zároveň splňovat mnoho podmínek, bez kterých nejsou realizovatelné. Jednou z možných variant je jaderná energetika, která představuje účinný, dlouhodobý, ale také poměrně kontroverzní zdroj energie.

Ve své historii se lidstvo v dostatečné míře přesvědčilo o kladech, ale bohužel také o záporech jaderné energetiky. Závažné havárie učinily z této problematiky záležitost přesahující hranice nejen regionů, ale i států. Obava z opakování jaderných katastrof klade velké požadavky na zajištění dostatečné bezpečnosti všech soudobých fungujících jaderných zařízení. To se týká především reaktorů, které představují pomyslné srdce každé jaderné elektrárny. Reaktory prošly od svého vzniku dlouhou cestou vývoje, která stále není u konce. Neustále se vyvíjejí a jsou pod důkladným dohledem odborníků, politiků i laické veřejnosti.

Cílem této práce je poskytnout komplexní informaci o tom jakými způsoby a proč se řeší bezpečnostní otázky jaderných reaktorů. Pojednat o havarijní prevenci a o dalších opatřeních potřebných k minimalizaci následků případné havárie. Zhodnotit současné i plánované typy jaderných reaktorů po jejich bezpečnostní stránce. Poukázat na možnosti a tendence ve vývoji jaderných reaktorů s důrazem na vývoj jejich bezpečnosti.

2 Historie

2.1 Vývoj jaderných reaktorů

Proces jaderného štěpení uranu ^{235}U byl poprvé pozorován v druhé polovině třicátých let dvacátého století v Německu. Vědci Otto Hahn, Lise Meitnerová a Fritz Strassmann tehdy popsali tento jev jako rozdělení atomu uranu na dva jiné atomy s uvolněním velkého množství energie (*The History of Nuclear Energy*, 1994).

Značné úsilí ve výzkumu štěpné reakce se vyvíjelo během druhé světové války, kdy se světové velmoci pokoušely o výrobu jaderné zbraně. Američané v tomto směru zaznamenali první výrazný úspěch. Dne 2. prosince 1942 byla na universitě v Chicagu spuštěna v reaktoru CP-1 první řízená, řetězová reakce. Byl zde použit přírodní uran jako palivo a grafit jako moderátor. Tvůrcem tohoto prvního jaderného reaktoru byl americký vědec italského původu Enrico Fermi. Vědecké závěry získané z pokusu byly mimo jiné použity ke konstrukci jaderných bomb, svržených v roce 1946 na Hirošimu a Nagasaki. Jaderné reaktory byly ve svém prvopočátku konstruovány především s cílem získat plutonium pro výrobu nukleárních zbraní. Této skutečnosti bohužel nahrávalo vyzbrojování světových mocností v období „studené války“ (*The History of Nuclear Energy*, 1994).

Začalo se však také vážně uvažovat o mírovém využití jaderné reakce jako zdroje tepelné energie pro elektrárny. Prvním jaderným reaktorem použitým k výrobě elektrické energie byl 20. prosince 1951 pokusný reaktor EBR-1, vyvinutý v USA. Svým výkonem byl schopen rozsvítit čtyři dvěstěwattové žárovky. Reaktor EBR-1 fungoval na principu rychlého množivého reaktoru (*The History of Nuclear Energy*, 1994). Nedlouho poté, v roce 1954, je v tehdejším Sovětském svazu spuštěna první jaderná elektrárna na světě, která začala dodávat elektrickou energii do rozvodné sítě. Tato elektrárna v ruském městě Obninsk měla tepelný výkon 30 MW. Tepelný výkon současných tlakovodních reaktorů bývá až stokrát větší než tomu bylo u reaktoru v Obninsku (PRIS, 2000). Nastává nová éra rozvoje jaderné energetiky.

Podle Drábové (2006) bylo v roce 1960 v provozu celkem 17 nukleárních reaktorů, které byly využity k výrobě elektrické energie. Všechny tyto reaktory byly situovány ve čtyřech zemích (SSSR, USA, Francie a Velká Británie). Již o deset let později, v roce 1970, bylo v provozu 90 reaktorů situovaných v patnácti zemích a tento nárůst se neustále zvyšoval. O dalších deset let později stoupl počet nukleárních reaktorů až na 235 instalovaných ve 22 zemích a dalších 235 bloků bylo ve výstavbě. Reaktory provozované v jednotlivých zemích se lišily konstrukčně a vykazovaly i různou míru bezpečnosti. Vývoj počtu reaktorů v provozu v jednotlivých letech je podrobněji znázorněn na grafu (Příloha č. 5).

Lidé si začali stále více uvědomovat přítomnost jaderné energetiky. Zdálo se, že byl konečně objeven ekologicky šetrný a takřka nevyčerpatelný zdroj energie, který řešil problematiku neustále narůstající energetické spotřeby. Na druhou stranu vyvstaly také první otázky spojené s bezpečností jaderné energetiky. Stále zde byl značný strach z nukleárních technologií podnícený účinky atomových bomb a desítkami let bezprostředního ohrožení jadernými zbraněmi během studené války. Tyto obavy prohloubila havárie jaderného reaktoru v elektrárně Three Mile Island (USA) v roce 1979. Sice zde nedošlo k obětem na životech, ani k výraznému úniku radioaktivity do okolního prostředí, přesto však měla havárie zásadní dopad na mínění veřejnosti ve vztahu k problematice jaderné energie. Začal se klást také větší důraz na konstrukční řešení reaktorů a elektráren s cílem zvýšit jejich bezpečnost a spolehlivost. Přesto došlo o sedm let později k největší jaderné havárii v dějinách lidstva na reaktoru RBMK v ukrajinském Černobyli. Tato havárie znamenala pro jadernou energetiku šok, se kterým se stále vyrovnává (Drábová, 2006). Po černobylské tragédii se objevily názory, že nukleární reaktory budou muset být v nejbližší době zcela nahrazeny alternativními zdroji energie. Tyto úvahy se však nakonec ukázaly jako ne zcela uskutečnitelné (Vaněk, 2008).

Po černobylské havárii se ještě více zpřísňují bezpečnostní opatření a nároky na technickou spolehlivost reaktorů i jaderných elektráren jako celku. Zároveň však dochází k podstatnému zbrždění dynamiky rozvoje jaderné energetiky. V současnosti je ve světě v provozu 438 jaderných reaktorů a dalších 54 reaktorů je ve výstavbě. Jaderná energetika se v roce 2008 podílela 21,5% na celkové výrobě elektrické energie v regionu zemí OECD. V České republice to bylo 32,4% (NEA, 2010).

Předpokládá se, že v nedaleké budoucnosti zaznamená jaderná energetika svou renesanci. Je to způsobeno různými faktory, jako je snaha o snižování emisí vznikajících při spalování fosilních paliv nebo obava z rostoucích cen nafty a zemního plynu. Velký rozvoj jaderné energetiky se předpokládá zejména v lidnatých rozvojových zemích jako jsou Indie a Čína. V současné době je právě Čína zemí, která má na svém území 23 jaderných reaktorů ve výstavbě, což představuje podíl 40% ze všech stavěných jaderných reaktorů na celém světě (PRIS, 2000).

Současný pohled veřejnosti na jadernou energetiku je stále poměrně rozporuplný. Jak ukazuje průzkum veřejného mínění prováděný v Evropské unii (Příloha č. 2) i přes převažující podporu má jaderná energetika stále poměrně mnoho odpůrců. Jejich počet však postupně klesá a jaderná energie si pomalu opět získává ztracenou důvěru (Attitudes towards radioactive waste, 2008).

2.2 Historie vybraných havárií jaderných reaktorů

Hlavním důvodem mnoha vážných diskusí o bezpečnosti jaderné energetiky byly především negativní zkušenosti lidstva, které se dostavily s prvními jadernými haváriemi. Proto je na místě uvést alespoň ve stručnosti několik nejzávažnějších havárií jaderných reaktorů.

Jednou z prvních závažných havárií vůbec byla 7. 10. 1957 havárie na grafitovém reaktoru v anglickém Windscale, který byl určen pro vojenskou výrobu plutonia. Během ohřevu grafitu v aktivní zóně došlo k přehřátí několika palivových článků, jejichž obal z hořčíkové slitiny se vznítil. Operátoři chtěli reaktor chladit zvýšením výkonu ventilace vzduchu, protože o požáru v aktivní zóně zpočátku nevěděli. Do větracího komínu se tak vhněly také radioaktivní látky a docházelo k zamořování okolního prostředí. Požár se podařilo plně uhasit až po čtyřech dnech. Do ovzduší tak uniklo poměrně značné množství radioaktivity. K zraněním ani obětem na životech nedošlo. Přestože šlo o závažnou havárii, v té době ještě neměla takový psychologický dopad na obyvatelstvo jako havárie pozdější (Windscale fire, 2009).

K nejzávažnější havárii jaderného reaktoru na území tehdejšího Československa došlo 22. 2. 1977 v elektrárně Jaslovské Bohunice (Slovensko). Stalo se tak během provozu při výměně palivového článku. Šlo o reaktor moderovaný těžkou vodou a chlazený plynem (CO₂). Důsledkem selhání lidského faktoru zůstal v palivovém článku silikagel, který zabránil volnému průchodu chladícího plynu. Vlivem následného lokálního přehřátí došlo k protavení bariéry a těžká voda, která zde měla funkci moderátoru se dostala mezi palivové články. Způsobila jejich rychlou korozi a tím i únik části štěpných produktů. Poškozena byla přibližně jedna čtvrtina palivových článků. Situaci se podařilo rychle zvládnout a nedošlo tak k většímu úniku radioaktivity mimo reaktorovou budovu. Reaktor byl v důsledku této havárie natrvalo odstaven (Kavka, 2009).

Prvním významným mezníkem ve vývoji jaderných reaktorů byla havárie na tlakovodním reaktoru v elektrárně Three Mile Island v USA dne 29. 3. 1979. Šlo o souhru náhod v kombinaci se selháním lidského faktoru. Nejprve vypadla dodávka vody do jednoho z parogenerátorů, důsledkem čehož začala stoupat teplota a tlak v primárním okruhu. Bezpečnostní systém automaticky odstavil reaktor. V důsledku zaseknutí ventilu však docházelo k pomalému úniku chladící vody z primárního okruhu. Automaticky se zapojil systém havarijního dochlazování, který měl kompenzovat ztrátu chladící vody. Ten byl však vypnut operátory, kteří byli mylně přesvědčeni o tom, že chladiva je naopak příliš mnoho. V důsledku následného varu vody se ještě více zhoršil její chladící účinek, nedocházelo k cirkulaci chladiva a část aktivní zóny byla poškozena. Radioaktivita v primární zóně a kontejnmentu značně vzrostla. Kontejnment nebyl včas izolován od okolního prostředí a došlo k slabším únikům radioaktivity i mimo prostor

elektrárny. Později operátoři obnovili havarijní chlazení reaktoru a bylo zahájeno odplynění primárního okruhu. Již nedocházelo ke zvyšování teploty, situace se postupně dostávala pod kontrolu. Dopady na zdraví lidí a životní prostředí byly zanedbatelné, přesto se tato havárie stala velmi diskutovanou. To především díky značné medializaci. Této skutečnosti nahrávalo také to, že evakuace osob byla velmi chaotická a v případě skutečného zamoření by mohly být následky tragické. Tato havárie znamenala první impuls k přepracování bezpečnosti stávajících reaktorů a podstatně zpřísnila podmínky výstavby nových reaktorů na území USA (Kavka, 2009).

Nejhorší jaderná havárie v dějinách lidstva se odehrála 26. 4. 1986 na reaktoru RBMK černobylské elektrárny v tehdejší SSSR. Příčinou havárie byla především nebezpečná konstrukce reaktoru a také selhání lidského faktoru. Operátoři před zahájením testu, který měl ověřit setrvačný doběh turbogenerátoru, odpojili všechny automatické ochrany reaktoru. Součástí testu bylo také snížení výkonu reaktoru na nejnižší možnou úroveň. To však v praxi znamenalo, že reaktor se stal nestabilním a zvýšit opětovně jeho výkon na běžnou provozní hodnotu bylo značně problematické. Když se to povedlo, pokračovala obsluha v testu a odpojila druhou turbínu a cirkulační čerpadla. Vlivem růstu teploty se aktivní zóna zaplnila párou a ještě více se tak zvýšila reaktivnost. V aktivní zóně nyní nebyl jediný absorbátor neutronů. Teplota v reaktoru překročila mnohonásobně konstrukční hodnoty, a když se v posledním okamžiku rozhodli operátoři spustit regulační tyče, bylo již pozdě. Teplota dál stoupala, obrovskému tlaku páry neodolala konstrukce reaktoru. Do aktivní zóny se dostal vzduch, který způsobil v kombinaci se vzniklým vodíkem ničivou explozi a následný požár. Havárie si vyžádala mnoho lidských obětí. Bezprostřední příčinou úmrtí byla především akutní nemoc z ozáření způsobená vysokými dávkami záření, kterému byli vystaveni likvidátoři následků havárie. Další životy si vyžádal zvýšený výskyt rakoviny štítné žlázy v oblastech silné kontaminace ze spadu radioaktivního mraku. Lidé, kteří vysoké dávky záření přežili se musejí často vypořádávat s doživotními zdravotními následky (Drábová et al., 2001).

Je zajímavé, že jak se zdá, tak z ekologického hlediska má havárie dva aspekty. Projevuje se negativně např. snižováním populací hmyzu, ale na druhou stranu vzhledem k opuštěnosti „mrtvé zóny“ se zde dnes paradoxně zvyšují počty některých chráněných druhů (Gill, 2010). Dokonce bylo do této oblasti uměle vypouštěno stádo koně Převalského (Mulvey, 2006).

Globálním následkům havárie se věnují četné studie. Je skutečností, že právě tato událost radikálně zasáhla do vývoje jaderných reaktorů a podstatně změnila tehdejší mínění o jejich bezpečnosti. V očích veřejnosti se značně změnil pohled na jadernou energetiku (Drábová, 2006).

Srovnání několika nejzávažnějších havárií jaderných reaktorů ve světě nabízí tabulka (Příloha č. 1).

3 Vliv radioaktivity na živé organismy

3.1 Charakteristika radioaktivního záření

Během nukleární štěpné reakce, která se odehrává v palivu jaderného reaktoru, vznikají kromě užitečné tepelné energie a neutronů také radioaktivní prvky. Ty jsou zdrojem radioaktivního záření. Toto záření, pokud překročí únosné limity, představuje zásadní nebezpečí pro živé organismy. Únik radioaktivních látek z reaktoru je hlavní hrozbou při případné havárii.

Radioaktivní záření dělíme na (Hála, 1998):

α záření je tvořeno letícími jádry helia. Lze jej vychylovat elektromagnetickým polem. Toto záření má silně ionizující účinky, jeho pronikavost je však velmi malá a bývá pohlceno např. listem papíru. Hlavní nebezpečí pro živé organismy nastává při vstupu zdroje záření do organismu. Zejména vdechnutí zářiče a následné působení α záření přímo v plicích je charakteristické pro vnitřní ozáření např. radonem.

β záření tvoří volně letící elektrony nebo pozitrony. Také toto záření lze vychylovat elektromagnetickým polem. Pronikavost β záření je poněkud větší než pronikavost záření α . K odstínění stačí např. tenký kovový plech.

γ záření má povahu elektromagnetického záření. Z uvedených druhů záření má největší pronikavost. Zastaví jej až silná vrstva betonu. Především díky vysoké pronikavosti představuje nejnebezpečnější druh záření.

Neutronové záření lze charakterizovat jako proud rychle letících neutronů. Neutronové záření ionizuje nepřímou. Samo o sobě neionizuje, ale způsobuje vznik ionizujících částic.

3.2 Stručný přehled základních veličin a jednotek

Ionizující záření je poměrně dobře detekovatelné, což umožňuje poměrně přesně vyhodnotit jeho intenzitu a predikovat tak jeho možné účinky na organismy (Hála, 1998). Aby bylo možné určit limity tolerance záření, bylo třeba vytvořit odpovídající fyzikální veličiny, které dokáží toto záření charakterizovat. Jak uvádí Drábová et al. (2001), jsou to zejména:

Rychlost přeměny radioaktivních jader, neboli **aktivita** je definována jako počet jaderných přeměn za jednotku času. Jednotkou aktivity je jeden becquerel (Bq) vyjadřující jednu jadernou přeměnu (rozpad) za sekundu.

S aktivitou přímo souvisí **poločas rozpadu**. Ten vyjadřuje dobu, za kterou z původního počtu radioaktivních jader zbude právě polovina. Poločasy rozpadů jednotlivých látek jsou různé. Některé mohou trvat několik sekund, jiné naopak mnoho milionů let.

Základní veličina charakterizující působení záření na látku se nazývá **dávka**. Lze ji charakterizovat jako množství energie pohlcené v jednotce hmotnosti určité látky. Má jednotku gray (Gy). Jeden gray je energie jednoho joulu absorbovaná jedním kilogramem látky.

Rychlost s jakou je energie látky předávána, lze vyjádřit pomocí veličiny **dávkový příkon**. Jde o přírůstek dávky za jednotku času. Základní jednotkou dávkového příkonu je jeden gray za sekundu.

Biologický účinek záření na tkáň nebo orgány udává tzv. **ekvivalentní dávka**. Jde o součin dávky a radiačního váhového faktoru, který umožňuje vyjádřit biologické účinky daného záření. Jednotkou ekvivalentní dávky je jeden sievert (Sv). Ten je charakterizován jako jeden joule pohlcený v jednom kilogramu látky. Ekvivalentní dávka je neměřitelná veličina. Určuje se z měření dávky a následného výpočtu.

Příkon ekvivalentní dávky se používá v dozimetrii, pro vyjádření působení záření v určitém čase. Jednotkou je sievert za sekundu. V praxi se ale během měření používají spíše milisieverty za hodinu.

3.3 Biologické účinky ionizujícího záření na člověka

Radioaktivita je vlastnost látek, produktů štěpné reakce. Jde o proces samovolné přeměny jader na jádra jiná, během něhož se uvolňuje radioaktivní záření. Toto záření má takovou energii, že je schopno „vyrážet“ elektrony z atomového obalu a tím látku ionizovat. Lze jej proto označit jako ionizující záření (Hála, 1998).

Radioaktivní záření může mít buď přímý účinek, který působí přímo na stavební složky organismu nebo účinek nepřímý, který způsobuje ionizaci vody v buňkách a tvorbu agresivních radikálů (Hála, 1998).

Účinky ionizujícího záření se ve větší či menší míře mohou projevit u všech druhů živých organismů. Závažnost účinků závisí na druhu organismu a velikosti dávky. Navíc se zde uplatňuje fakt, že citlivost na ionizující záření se u každého organismu liší, byť jde o stejný živočišný druh (Hála, 1998). Existuje zde tedy jistá forma individuální odolnosti.

Jak uvádí Hála (1998) z hlediska vztahu dávky a účinku lze rozlišovat dva základní typy účinků:

Stochastické účinky vznikají nahodile a jejich intenzita není ovlivněna dávkou. Rostoucí dávka pouze zvyšuje pravděpodobnost jejich výskytu. Stochastické účinky se proto mohou projevit až za dlouhou dobu po ozáření, aniž by předtím bylo pozorováno nějaké poškození. Mezi stochastické účinky patří leukémie (latentní doba 10-40 let), nádorová onemocnění (latentní doba 5-20 let) nebo vývojové vady u potomstva. V historii se již tyto účinky projevíly

zvýšeným výskytem leukémie u osob které přežily výbuchy jaderných bomb v Hirošimě a Nagasaki nebo podstoupily silnou ozařovací léčbu. Dále byl zaznamenán zvýšený výskyt rakoviny štítné žlázy u dětí na Ukrajině a v Bělorusku, které byly vystaveny spadu radioaktivních izotopů jódu z černobylské havárie a zvýšený výskyt rakoviny plic u horníků pracujících v uranových dolech v důsledku vnitřního ozáření radonem.

Nestochastické (deterministické) účinky se projevují většinou po jednorázovém ozáření, při překročení určitého prahu dávky. S rostoucí dávkou roste i intenzita těchto účinků. Prahová dávka je taková dávka, která vyvolá dané poškození u 1-5% ozářených osob. Projevem nestochastických účinků jsou:

Akutní nemoc z ozáření (radiační syndrom), který vzniká okamžitým ozářením celého těla vysokými dávkami záření. Nemoc probíhá celkově ve třech fázích. V první fázi se během prvních dnů po ozáření objevuje nevolnost, bolesti, zvracení a závažné změny v krevním obrazu. Druhá fáze je charakteristická částečným ústupem všech počátečních příznaků. Délka druhé fáze závisí na intenzitě ozáření a se silným ozářením se zkracuje. Třetí fáze znamená návrat a prohloubení všech předešlých příznaků ve spojení s dalšími komplikacemi (padání vlasů, vnitřní krvácení, snížení imunity). Nemoc se projevuje u většiny osob po ozáření ekvivalentní dávkou 2 Sv, při ozáření dávkou 6 Sv je 80% pravděpodobnost úmrtí. Při ozáření 10 Sv je pravděpodobnost úmrtí téměř 100%.

Lokální poškození kůže (radiační dermatitida) se vyskytuje podle intenzity ozáření a může mít různé formy od zarudnutí kůže až po hlubší poškození tkáně s obtížnou hojivostí. Prahová dávka je kolem 3 Sv.

K poškození plodu dochází nejčastěji mezi třetím až osmým týdnem, kdy je mimořádně citlivý vůči záření a kdy dochází k tvorbě orgánů. Poškození plodu způsobuje oční defekty, rozštěp patra, mentální retardace, zakrslost. Prahová dávka je pouze 0,05 Sv.

Na poruchy plodnosti vlivem ozáření jsou citlivější muži, u nichž dochází podle velikosti dávky buď k přechodné nebo trvalé aspermii. Ženy jsou méně citlivé a prahová dávka u nich není ostře vymezena.

Zákal oční čočky má dlouhou dobu latence. Prahová dávka je 1,5 - 2 Sv.

3.4 Účinky ionizujícího záření na ostatní organismy

Jak uvádí Hála (1998), reakce na ionizující záření se u jednotlivých organismů liší, rezistence vůči dávce je velice rozdílná.

Odolnost dospělých jedinců hmyzu vůči ionizujícímu záření je mnohonásobně větší, než u obratlovců. Je to dáno tím, že u hmyzu dochází během larválního vývoje především k zvětšování objemu buněk, nikoliv k dělení. Buněčnému dělení však u dospělců podléhají buňky gonád, čímž

se stávají vůči záření citlivější. Ozařování hmyzu nižšími dávkami tedy většinou nevede k jeho úmrtí, ale může hmyz sterilizovat. Tento fakt se využívá při radiačním hubení např. dřevokazného hmyzu, kdy dochází buď k usmrcení jedinců nebo k jejich sterilizaci.

Jednobuněčné organismy jsou vůči záření taktéž velmi odolné. K jejich usmrcení je potřeba dávek v řádu až 10^3 Gy. Zajímavou výjimkou je však bakterie *Deinococcus radiodurans*, která je vůči ionizujícímu záření extrémně odolná. Její přítomnost byla zjištěna dokonce přímo v aktivní zóně jaderných reaktorů. Tato bakterie odolává dávkám záření až 15 000 Gy a je předmětem vědeckých výzkumů (Kunert, 2003).

Rostliny vykazují na ionizující záření poměrně rozmanitou reakci. Účinek závisí na více faktorech. Bylo prokázáno, že při jednorázovém ozáření jsou odolnější pomaleji rostoucí rostliny, naopak během chronického ozařování se odolnost projevila u rostlin které rostou rychleji. Ozařováním semen rostlin dávkami 100 - 1000 Gy dochází k mutacím, čehož se může využívat v praxi k radiačnímu šlechtění (Hála, 1998).

4 Jaderný reaktor

Jaderný reaktor je zařízení, ve kterém je možné uskutečnit řízenou a kontrolovanou řetězovou reakci a udržet ji ve stabilním chodu (Hála, 1998). V naprosté většině případů hovoříme o štěpné jaderné reakci, ale existuje také několik experimentálních reaktorů, ve kterých se uskutečňuje jaderná syntéza. Ty mají ale naprosto odlišnou konstrukci a jde o velmi složitá zařízení. Jejich využití by znamenalo velký převrat v oblasti výroby energie, ale k jejich spolehlivému zprovoznění vede ještě dlouhá cesta (Wagner, 2008b).

Hála (1998) uvádí, že jaderné reaktory lze rozdělit podle účelu jejich použití na reaktory výzkumné (slouží k výzkumu v oblasti vědy a pro školní účely), produkční (výroba radioizotopů a plutonia) a energetické (zdroj energie pro jadernou elektrárnu). Energetické jaderné reaktory jsou nejvýznamnější, a proto se v této práci budu zabývat především jejich bezpečností.

Obecně lze říci, že jaderný reaktor se skládá z několika hlavních komponent.

Palivo jaderného reaktoru představuje směs samovolně štěpitelných izotopů. Nejčastěji jde o ^{235}U nebo ^{239}Pu . V současnosti se běžně používají uranová paliva z přírodního nebo obohaceného uranu. Samotné palivo je chráněno hermetickým obalem z odolné kovové slitiny a tvoří tak palivový element. Z většího počtu palivových elementů se skládá tzv. palivový článek. Těchto článků bývá v reaktoru umístěno velké množství. Palivové články se při odstavení reaktoru v průběhu jeho provozu musí postupně obměňovat. Štěpné produkty totiž snižují reaktivitu, což je nežádoucí jev.

Vyhořelé jaderné palivo se stává pro životní prostředí nebezpečným díky radioaktivnímu záření a jedovatosti štěpných produktů. Jejich podíl činí pouze 3% z celkového množství paliva, přesto představují zásadní hrozbu. Problematika vyhořelého paliva je velmi rozsáhlá. Existuje více metod jak lze s vyhořelým palivem nakládat. Asi nejvhodnější metodou je jeho přepracování ve speciálních reaktorech.

Moderátor se používá v typech reaktorů ve kterých jaderné štěpení probíhá díky tzv. pomalým neutronům. Jeho hlavní funkce spočívá ve zpomalení neutronu, čímž se zvyšuje pravděpodobnost vzniku štěpné reakce. Ideální moderátor by měl co nejvíce zpomalit letící neutron, ale zároveň by ho neměl absorbovat.

Chladící médium cirkuluje a odvádí teplo z aktivní zóny reaktoru. Musí mít dostatečnou tepelnou vodivost, být stálé a neagresivní vůči materiálům se kterými v reaktoru přichází do styku. Dále by nemělo pohlcovat neutrony. U některých typů reaktorů na sebe chladící médium přejímá zároveň funkci moderátoru.

Řídící tyče slouží k regulaci štěpné reakce a tím i výkonu reaktoru. Jsou vyrobeny z materiálu, který absorbuje neutrony. Do aktivní zóny se podle potřeby zasouvají nebo vysouvají. Úplným zasunutím řídicích tyčí se štěpná reakce zastaví.

Reflektor je prostředí obklopující aktivní zónu reaktoru s funkcí odrazu neutronů na atomových jádrech zpět do aktivní zóny. Ztráta neutronů je nežádoucí z důvodu zpomalení štěpné reakce. Podle typu reaktoru se liší také materiál, ze kterého je reflektor vyroben.

Reaktorová nádoba může být vyrobena z ušlechtilé oceli nebo předpjatého betonu (dle typu chladiwa). U některých typů reaktorů tuto nádobu nahrazují tlakové ocelové kanály se samostatným chlazením, ve kterých jsou umístěny palivové články.

Schématický obrázek typického tlakovodního reaktoru s popiskami komponent obsahuje Příloha č. 8.

5 Zabezpečení jaderných reaktorů

Těžko si lze v současné době představit diskusi o provozu jaderného reaktoru aniž by bylo poukazováno na jeho bezpečnostní parametry. Právě jaderné bezpečnosti se dnes pod tíhou obav z nukleárních katastrof podobných černobylské havárii přisuzuje daleko větší význam než v minulosti (Drábová, 2006). To klade patřičné požadavky především na konstrukci jaderných reaktorů. Cílem bezpečnostních opatření je za každou cenu zabránit vzniku situace, resp. havarijního stavu, který by měl za následek nepřijatelný únik radioaktivních látek. V praxi to znamená klást co největší důraz na bezpečnost aktivní zóny reaktoru, kde jsou soustředěny radioaktivní produkty štěpné reakce.

5.1 Bezpečnostní principy jaderných reaktorů

Bezpečnostní principy jaderných reaktorů můžeme rozdělit podle jejich charakteru do několika druhů (IAEA-TECDOC-626, 1991).

Inherentní bezpečnost je taková forma bezpečnosti, která vyplývá ze samotné fyzikální podstaty reaktoru. Je dána vlastnostmi a fyzikálními zákony, které fungují bez lidského přičinění. Z bezpečnostního hlediska by bylo ideální, kdyby byla inherentní bezpečnost jaderného reaktoru maximální. V takovém případě by se eliminovaly důsledky vlivu chyby lidského faktoru nebo selhání přídatných bezpečnostních systémů na minimum.

Příkladem inherentní bezpečnosti může být vlastnost lehkovodních reaktorů. Zde by díky fyzikálním zákonům vycházejícím z podstaty paliva, chladiva a moderátoru, teoreticky nemělo dojít ke katastrofickému zvýšení výkonu reaktoru ani při selhání všech bezpečnostních systémů. Voda v reaktoru plní funkci chladicí i moderační. Při ztrátě chladiva by došlo k zvýšení teploty v aktivní zóně a tím i ke změně kapalně vody na páru, ve které jsou molekuly příliš vzdálené na to, aby byly schopny účinně zpomalovat (moderovat) neutrony. To způsobí pokles počtu „pomalých“ neutronů schopných udržovat štěpnou reakci, která se tím zpomalí až úplně zastaví. Také palivo svým složením přispívá k inherentní bezpečnosti. Například izotop ^{238}U , který je pasivní, ale většinou složkou jaderného paliva sám pohlcuje neutrony, přičemž tato schopnost s teplotou stoupá. O takovýchto reaktorech se říká, že mají samoregulační schopnost. Jejich teplotní koeficient reaktivity je záporný (Hála, 1998; Škola, 2006).

Opakem může být reaktor s kladným teplotním koeficientem reaktivity. To znamená, že při úniku chladiva může dojít k nežádoucímu zvyšování výkonu reaktoru (typické pro reaktory RBMK). Inherentní bezpečnost takových reaktorů je naopak velmi nízká (Hála, 1998).

Pasivní bezpečnost je forma bezpečnosti, která funguje na fyzikálních principech nezávislých na vnější dodávce energie. Na rozdíl od inherentní bezpečnosti je pasivní bezpečnost vytvářena uměle a fyzikálních principů pouze využívají pro svou funkčnost.

Aktivní bezpečnost je taková forma bezpečnosti, která je uměle vytvářená za účelem eliminace nebezpečí nebo následků havárie. Na rozdíl od pasivní bezpečnosti potřebuje ke svému fungování většinou vnější zdroj energie.

5.2 Hlubková ochrana

Princip hloubkové ochrany zahrnuje podle dokumentu INSAG-12 (1999) celkovou strategii pro bezpečnostní opatření JE. Cílem je vytvoření dostatečného počtu ochranných bariér, které snižují pravděpodobnost vzniku havárie nebo případně zmírňují její následky. Hlubková ochrana je tvořena dvěma hlavními strategiemi. Jsou to prevence a zmírnění následků havárie.

Prevence je základním předpokladem k tomu, aby havárie vůbec nevznikla. Zahrnuje všechny ochranné prostředky, které mají za cíl odvrácení situací, které by mohly vést k havárii. K těmto prostředkům se řadí bezpečnostní systémy, ale také např. patřičné proškolení personálu.

V případě selhání preventivních opatření zůstávají v záloze prostředky ke zmírnění následků havárie, jakými jsou technické systémy a organizační opatření.

5.2.1 Bezpečnostní systémy

Bezpečnostní systémy vyhodnocují informace z čidel a v případě ohrožení reaktoru dokáží zabránit jeho poškození nebo havárii. Pracují nezávisle na obsluze, čímž snižují vliv lidského faktoru a také čas potřebný k vyřešení situace. Musí pracovat tak, aby bezpodmínečně a vždy zajistily ochranný zásah, pokud by ho bylo zapotřebí. Zároveň však nesmí způsobovat zbytečné zásahy, což sice na snížení bezpečnosti nemá podstatný vliv, ale je to pro provozovatele zařízení značně neekonomické.

Bezpečnostní systémy lze rozdělit podle toho, jaký druh bezpečnostních principů využívají. A to na systémy pasivní a aktivní (IAEA-TECDOC-626, 1991).

Příkladem prvku pasivního bezpečnostního systému v jaderném reaktoru jsou havarijní tyče, které jsou za normální situace vysunuty nad aktivní zónou reaktoru, kde visí na elektromagnetech. V okamžiku přerušení proudu do elektromagnetů gravitačně padají do aktivní zóny, a následně zastavují štěpnou reakci. Je zde záruka vysoké spolehlivosti bezpečnostního systému tohoto typu (Škola, 2006).

Aktivní bezpečnostní systémy jsou poměrně složité a informace získávají z několika různých zdrojů (např. čidel). Mají za úkol reagovat jako první ze systémů ochrany reaktoru. Musí dokázat vyhodnotit vzniklou situaci a podle toho zasáhnout. Takovým zásahem může být např. rychlé nebo pomalé odstavení reaktoru nebo snížení výkonu. V praxi bývají aktivní bezpečnostní systémy několikrát zálohovány.

Jelikož jsou bezpečnostní systémy velmi důležitou složkou bezpečnosti, která může tvořit poslední hráz před vznikem havárie reaktoru, je třeba zajistit jejich funkčnost a spolehlivost. Pro zvýšení spolehlivosti bezpečnostních systémů se v praxi využívá nejrůznějších metod a zásad, jako jsou zálohování (znásobení stejného druhu zabezpečení), diverzita (použití různých druhů zabezpečení) a separace (prostorové oddělení bezpečnostních prvků včetně zdrojů jejich napájení) (INSAG-12, 1999).

5.2.2 Fyzické bariéry

Pokud dojde k selhání preventivních opatření, nastupuje strategie zmírnění následků havárie. Ta je v praxi představována principem několika fyzických bariér. Tento princip slouží k udržení nebezpečných radioaktivních látek uvnitř palivových komponentů a v případě havárie reaktoru nebo reaktorového systému zamezuje jejich úniku do životního prostředí. Mezi radioaktivními látkami a životním prostředím stojí podle dokumentu INSAG-12 (1999) zejména tyto bariéry:

- *První bariérou* je pevná struktura samotného paliva.
- *Druhou bariérou* je hermetické uzavření paliva v palivových obalech z odolných materiálů (speciální slitiny kovů, karbidy).
- *Třetí bariérou* je konstrukce reaktorového obalu a primárního okruhu z odolného kovu navržená pro konkrétní typ reaktoru tak, aby byla schopna odolávat vysokým tlakům a teplotám.
- *Čtvrtou bariérou* je ochranná obálka reaktoru, neboli kontejnment. Jeho hlavními úkoly jsou zadržení následků případné havárie v reaktorové budově a ochrana reaktoru před atakou z vnějšku (teroristický útok, pád letadla, přírodní katastrofy atd.). Kontejnment bývá konstruován ze silné vrstvy železobetonu s ocelovým pláštěm. Hermeticky odděluje reaktor od okolního prostředí a někdy se v něm udržuje stálý podtlak kvůli kompenzaci tlaku způsobené případnou havárií a lepší možnosti likvidace úniku radioaktivity mimo reaktor.

Zobrazení fyzických bariér je znázorněno na obrázku (Příloha č. 9).

5.2.3 Havarijní připravenost

Pro případ jakékoliv havárie s únikem radioaktivních látek musejí být vypracovány havarijní plány, které usnadňují a podstatně zrychlují eliminaci následků havárie. Existují havarijní plány vnitřní a vnější (SÚJB, 2000).

Havarijní plány vnitřní řeší eliminaci havárie, která vznikla a byla udržena na území jaderného zařízení a neohrožuje okolní životní prostředí.

Vnější havarijní plány se zabývají řešením situace při nadlimitním úniku radioaktivity mimo reaktorovou budovu. Zahrnují především plán na ochranu obyvatelstva v zóně havarijního plánování.

Pro každé zařízení se musejí vypracovávat individuální plány beroucí v potaz všechny možné podmínky, které by mohly mít vliv na šíření havárie resp. radioaktivních látek. Při velké havárii jaderného reaktoru je třeba určit kudy se může radioaktivní materiál šířit. K tomuto účelu existují studie, které musejí být vypracovány pro každé jaderné zařízení zvlášť s ohledem na jeho typ, vlastnosti, umístění atd. Hlavním zdrojem šíření radioaktivních látek do životního prostředí bývá především vzduch. Další možnost distribuce představují vodní toky, což je dáno faktem, že jaderné elektrárny se stavějí v bezprostřední blízkosti povrchových zdrojů vody (voda jako chladiivo). Pomocí simulačních programů se vypočítává rozsah možného zamoření. Vždy záleží na konkrétním charakteru havárie (Kratochvílová, 2002).

Pro sjednocení srovnávání stupně vážnosti havárie na jaderném zařízení byla zavedena v roce 1990 stupnice INES – Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí. Zahrnuje osm stupňů závažnosti možných událostí, přičemž stupně od 1 do 3 se klasifikují jako nehody, stupně od 4 do 7 se klasifikují jako havárie a stupeň 0 jako běžné provozní situace (INES, 2001).

0. stupeň: Situace, při kterých nejsou překročeny bezpečnostní limity.
1. stupeň: Odchylna od běžné provozního režimu, ale se zbývající hloubkovou ochranou.
2. stupeň: Porucha s významným selháním bezpečnostních opatření, ale se zbývající dostatečnou hloubkovou ochranou.
3. stupeň: Vážná porucha s únikem radioaktivity nad povolené limity.
4. stupeň: Havárie s účinky na jaderné zařízení. Částečně poškozená aktivní zóna reaktoru, menší úniky radioaktivity do životního prostředí. (Jaslovské Bohunice)
5. stupeň: Havárie s účinky na okolí. Únik štěpných produktů mimo prostor elektrárny. (Windscale a Three Mile Island)
6. stupeň: Závažná havárie. Větší únik radioaktivity do životního prostředí. Je nutno použít havarijních plánů k eliminaci zdravotních následků.

7. stupeň: Velká havárie s únikem značného množství radioaktivních látek do životního prostředí. Vliv havárie mnohokrát přesahuje nejbližší prostor elektrárny a znamená velké zdravotní riziko. Dlouhodobé následky pro životní prostředí. Doposud jediná havárie odpovídající tomuto stupni byla havárie v Černobylu.

6. Hodnocení bezpečnosti jaderných reaktorů

Pro hodnocení bezpečnosti jaderných reaktorů se využívají tzv. pravděpodobnostní bezpečnostní metody (**PSA**). Pomocí těchto metod lze provádět systematické a komplexní hodnocení bezpečnosti provozu pozorovaného celku (jaderné elektrárny). Jde o metody, které zkoumají bezpečnost jednotlivých částí systému a jejich podíl na celkové bezpečnosti reaktoru. Provádějí se opakovaně vždy po určitém časové období nebo pokud dojde k určitým konstrukčním změnám. Při jejich vyhodnocování se berou v úvahu různé nestandardní situace, které by teoreticky mohly nastat. Na základě výsledků těchto analýz jsou vypracovávány havarijní instrukce a stanovovány priority při zlepšení zabezpečení jaderné elektrárny. Pravděpodobnostní metody PSA mají podle dokumentu IAEA-TECDOC-1200 (2001) tři úrovně:

- **První úroveň PSA** se zabývá událostmi, které by mohly vést k poškození aktivní zóny reaktoru.
- **Druhá úroveň PSA** hodnotí odezvu kontejnmentu na havarijní scénáře z první úrovně.
- **Třetí úroveň PSA** hodnotí následky úniku radioaktivity mimo prostory JE.

6.1 Četnost poškození aktivní zóny

Ze studie PSA první úrovně se stanovuje mimo jiné četnost poškození aktivní zóny **CDF** (Core Damage Frequency). Je to ukazatel, který znázorňuje pravděpodobnost výskytu nehody, při které by došlo k poškození aktivní zóny jaderného reaktoru. Jeho jednotkou je jedna událost za rok. Ukazatel CDF je používán mezinárodně. Roční hodnota CDF u reaktoru by neměla překročit 10^{-4} událost/rok (Vrba, 2002).

Jak uvádí Matějka (2000) evoluční vývoj soudobých typů reaktorů je také charakteristický zvyšováním bezpečnosti. Současný trend spočívá ve snižování CDF alespoň na 10^{-5} událost/rok. Z toho vyplývá, že pravděpodobnost poškození aktivní zóny reaktoru by byla 1 : 100 000 během jednoho roku.

Revoluční vývoj se týká především zcela nových reaktorů IV. generace, které mají vysokou inherentní a pasivní bezpečnost. Zde je reálné, aby se podařilo díky této přirozené bezpečnosti snížit četnost poškození aktivní zóny reaktoru řádově na 10^{-7} událost/rok. U takto koncipovaných reaktorů by pak bezpečnostní systémy zajišťovaly především zabezpečení reaktoru před vnějšími vlivy (Matějka, 2000).

Pravděpodobnost úniku radioaktivních látek do životního prostředí následkem havárie bývá v praxi ještě o několik řádů menší, než pravděpodobnost poškození aktivní zóny. Je to dáno zejména přítomností dalších fyzických bariér, především kontejnmentu.

7 Jaderný dozor

Aby bylo možné sjednotit kontrolu nad bezpečností mírových jaderných zařízení, byla v roce 1957 založena Mezinárodní agentura pro atomovou energii IAEA (International Atomic Energy Agency). Ta dnes sdružuje 151 členských států. Na půdě této agentury vznikla řada mezinárodních úmluv týkajících se bezpečnostních standardů a opatření, ale také havarijní připravenosti a odpovědnosti za jadernou havárii (IAEA, c2003).

Z úmluvy o jaderné bezpečnosti vydané IAEA v roce 1994 vyplývá, že jaderná bezpečnost musí být důsledně kontrolována státními úřady a o jejím stavu musejí být podávány zprávy (*Convention on Nuclear Safety*, 1994). Jaderný dozor v jednotlivých zemích se individuálně liší. V České republice tuto úlohu plní Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB). Při zajišťování bezpečnosti a havarijní připravenosti se vychází především z doporučení IAEA. Po černobylské havárii byla také založena Světová organizace provozovatelů jaderných zařízení WANO (World Association of Nuclear Operators). Její členové si vzájemně předávají zkušenosti s cílem zlepšit bezpečnost jaderných reaktorů.

Státní úřady s patřičnou kompetencí také stanoví limity výpustí radioaktivních látek do životního prostředí. Výše těchto limitů představují zdraví neškodné množství stanovené tak, aby nedocházelo k překročení efektivní dávky pro obyvatelstvo 0,1 mSv/rok pro ozáření z umělých zdrojů (Marek, 2000). Jak vyplývá z grafu (Příloha č. 3), ozáření z přirozeného přírodního pozadí je podstatně vyšší než limit pro ozáření z umělých zdrojů. Hlavní podíl na přírodním ozáření má radon, jehož zvýšené koncentrace představují zdravotní riziko.

8 Faktory ovlivňující bezpečnost jaderného reaktoru

Při zabezpečování a konstrukci jaderných reaktorů se musejí brát v úvahu nejrůznější faktory, které by mohly mít negativní vliv na bezpečnost provozu reaktoru. Působení těchto faktorů je třeba eliminovat. Lze je rozdělit na vnitřní a vnější (JB-1.2, 2010).

Vnitřní faktory zahrnují situace, ke kterým může dojít uvnitř reaktorové budovy. Jsou to zejména požáry, úniky látek, poruchy konstrukčních částí, padající a narážející břemena, nepříznivé provozní stavy, abnormální stavy a havárie.

Poněkud specifickým vnitřním faktorem je také stárnutí konstrukčních materiálů.

Vnější faktory zahrnují situace přicházející z venkovního prostředí. Může to být zemětřesení, extrémní podmínky počasí, povodně, elektromagnetické interference, ohrožení od okolních průmyslových objektů (např. výbuch plynovodu), ale také možnost pádu letadla na reaktorovou budovu a sabotáž (Jurkas, 1995). Zejména hrozba útoku na jaderný reaktor teroristy nebo během válečného konfliktu jsou dnes velmi diskutovaná bezpečnostní témata, obzvláště po zkušenostech z 11. září 2001 (Berry, 2001).

Při výstavbě jaderného reaktoru je třeba brát v potaz především přírodní a geografické podmínky a podle toho i upravit projekt. Z bezpečnostního hlediska je proto třeba posuzovat každý reaktor individuálně.

8.1 Stárnutí jaderných reaktorů

Podle Froggatta (2005) se u soudobých fungujících typů reaktorů výrazněji projevuje faktor stárnutí jako důsledek snahy provozovatelů co nejvíce prodloužit životnost jaderné elektrárny a zvýšit tak její ekonomickou návratnost. Při prodlužování životnosti nad rámec původního projektu může mít stárnutí negativní vliv na bezpečnost jaderného reaktoru. Je to dáno především určitou ztrátou kvality materiálu, ze kterého jsou vyrobeny komponenty důležité pro bezpečný chod zařízení. Problémem je také to, že projevy stárnutí lze poměrně obtížně monitorovat, protože probíhají ve vnitřní struktuře materiálu. Této problematice se v současnosti věnuje poměrně intenzivní výzkum (Technický deník, 2009).

Proces stárnutí materiálů má několik příčin. Jsou to ozáření (zejména v aktivní zóně reaktoru), tepelné namáhání, koroze a mechanické opotřebení. Tyto vlivy se mezi sebou mohou nejrůzněji kombinovat. Proto je při prodlužování životnosti třeba zajistit management stárnutí, který zabezpečí dostatečná opatření k monitorování a kontrole tohoto nežádoucího procesu.

Jak vyplývá z grafu (Příloha č. 4), většina ze současných fungujících jaderných reaktorů je více jak 20 let v provozu. Sedmnáct reaktorů dokonce překračuje hranici 40 let.

9 Typy jaderných reaktorů a jejich bezpečnost

Jaderné reaktory můžeme obecně rozdělit podle jejich fyzikálních vlastností, účelu, použitého moderátoru a chladiva. Jaderné reaktory lze také dělit podle stupně jejich vývoje do několika generací. Rozhodl jsem se pro toto dělení, protože v sobě také zahrnuje bezpečnostní požadavky. Přehled generací v jaderné energetice je znázorněn na obrázku (Příloha č. 10). Schématické nákresy jednotlivých typů reaktorů jsou uvedeny v přílohách č. 11-22.

9.1 Reaktory I. generace

Jde o první typy jaderných reaktorů především z padesátých a šedesátých let dvacátého století. Často se stavěly jako prototypy a jejich účelem bylo ověřit schopnost jaderného reaktoru dodávat energii pro výrobu elektřiny. Konstrukčně vycházely z vojenských reaktorů používaných k pohonu jaderných ponorek a pro výrobu plutonia (Froggatt, 2005).

Charakteristické pro tyto reaktory byly poměrně značné bezpečnostní nedostatky jako zejména nedostatečný systém havarijního chlazení a absence sekundárního kontejnmentu. Další nevýhodou je, že nízká hustota energie se kterou reaktory pracují, je suplována větší velikostí aktivní zóny, což je z hlediska bezpečnosti nežádoucí (Froggatt, 2005).

Typickým reaktorem představujícím I. generaci je reaktor **Magnox GCR** (Gas Cooled Reactor) vyvinutý ve Velké Británii. Jde o plynem chlazený a grafitem moderovaný reaktor, kde se jako palivo používá přírodní uran. V průběhu času byl tento typ bezpečnostně modernizován a uveden pod označením **AGR** (Advanced Gas Reactor). Palivem reaktorů AGR je obohacený uran (Denk, 1992).

Poslední staré reaktory typu Magnox v současné době fungují ve dvou britských JE a v nejbližší době budou odstaveny (PRIS, 2000).

9.2 Reaktory II. generace

Do II. generace patří většina všech v současnosti provozovaných jaderných reaktorů. Během jejich vývoje byly využity zkušenosti s provozem reaktorů I. generace a došlo k dalším inovačním změnám. Vznikají především v 70. a 80. letech 20. století (Wagner, 2010).

Nejrozšířenějším provozovaným typem reaktorů II. generace jsou tlakovodní reaktory **PWR** (Pressurized Water Reactors). Původně se tyto reaktory používaly k pohonu jaderných ponorek. To se projevilo především na jejich konstrukci. Ve srovnání s ostatními typy mají

menší rozměry, ale vysokou energetickou produkci při zachování bezpečnostních požadavků. Jako palivo se používá obohacený uran, chladičem a zároveň moderátorem je zde lehká (obyčejná) voda. Sjednocení funkcí moderace a chlazení má pozitivní vliv na inherentní bezpečnost, jelikož s úbytkem chladiča klesá i rychlost štěpné reakce. Vzhledem k vysokému provoznímu tlaku a teplotě uvnitř reaktorové nádoby, musí být věnována patřičná pozornost konstrukčním materiálům a technickému provedení reaktoru a všech jeho komponent. Obdobou typu PWR je reaktor VVER pracující na stejných principech, ale vyvinutý v tehdejší SSSR (Froggatt 2005; Hála 1998).

Varné reaktory **BWR** (Boiling Water Reactor) představují v současnosti druhý nejrozšířenější typ. Byl vyvinutý z reaktorů PWR a jako chladiča využívá opět lehkou vodu. Hlavním rozdílem oproti typu PWR je skutečnost, že pára vzniká přímo v reaktoru. Konstrukce BWR je jednodušší než u PWR. Bezpečnostní nevýhodou těchto reaktorů je fakt, že pára z primárního okruhu přímo pohání turbínu. To zvyšuje účinnost ale do jisté míry také rizikovitost. Regulační tyče se do reaktoru zasouvají proti gravitaci, čímž vzniká potřeba dalších funkčních bezpečnostních systémů. Reaktorová zařízení jsou však vystavena menšímu tlaku než u typu PWR (Froggatt, 2005).

Těžkovodní reaktory **PHWR** (Pressurized Heavy Water Reactor) jsou známé také pod kanadským označením **CANDU** (CANada Deuterium Uranium). Cílem vývoje reaktorů CANDU byla snaha Kanady vyhnout se nákladnému obohacování uranu. Proto byl tento typ konstruován tak, aby bylo možné používat přírodní uran jako palivo. Moderátorem je těžká voda, která však vyžaduje zvláštní chladicí okruh, protože s rostoucí teplotou ztrácí své moderační vlastnosti. Chladičem reaktoru je také těžká voda proudící kolem palivových článků, která má vlastní okruh nezávislý na moderátoru. Bezpečnostní nevýhodou tohoto typu reaktoru je zejména kladný teplotní koeficient reaktivity (při ztrátě chladiča dochází ke zvyšování tepelného výkonu reaktoru) a degradace materiálu vlivem radioaktivního záření (křehnutí tlakových kanálů chladicího okruhu reaktoru). Reaktor má dva havarijní odstavné systémy. Regulační tyče se spouštějí gravitačně, navíc v aktivní zóně bývá několik vstřikovačů absorbátoru neutronů. V průběhu let se tento typ reaktoru vylepšoval, zejména po bezpečnostní stránce (Denk, 1992; Froggatt, 2005).

Vodografitové reaktory typu **RBMK** (Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj) resp. **LWGR** (Light-Water-cooled Graphite-moderated Reactor) neblaze prosluly díky černobylské havárii. Tento typ reaktorů byl používán výhradně na území SSSR. Již v roce 1954 jím byla vybavena první jaderná elektrárna v Obninsku. Reaktor využívá jako palivo přírodní nebo slabě obohacený uran. Palivové tyče jsou uloženy v tlakových kanálech, kterými proudí chladiča (obyčejná voda). Zásadními bezpečnostními problémy reaktorů RBMK je kladný tepelný koeficient aktivní zóny

způsobený přítomností grafitového moderátoru, který moderuje štěpnou reakci i při úbytku chladiva a zvyšuje tak tepelný výkon reaktoru. Značné množství grafitu v aktivní zóně je nebezpečné z hlediska možného požáru reaktoru. Velké rozměry aktivní zóny a vysoký počet tlakových trubic zvyšuje pravděpodobnost výskytu „slabého místa“. Ze zkušeností z černobylské havárie vyplynulo, že reaktor se projevil při nízkém výkonu jako nestabilní a výkon v reaktoru nebyl rozložen rovnoměrně. Vliv chyby lidského faktoru zde nebyl dostatečně eliminován, protože aktivní bezpečnostní systémy bylo možné vypnout. Navíc reaktor neměl tlakový kontejnment. Prakticky každý z těchto bezpečnostních nedostatků se projevil naplno během havárie. Po této havárii došlo k zastavení výzkumu a rozvoje těchto typů reaktorů. Stávající reaktory RBMK prošly po černobylské havárii bezpečnostní modernizací, spočívající především ve změnách v konstrukci kontrolních tyčí a zvýšením jejich počtu na úkor palivových článků v aktivní zóně (snížení výkonu je kompenzováno použitím více obohaceného uranu jako paliva). Dále došlo k modernizaci řídicích systémů a k úpravám znemožňujícím vypnutí automatických ochranných systémů (Froggatt, 2005; Lederman, 1996).

Rychlé množivé reaktory **FBR** (Fast Breeder Reactor) spotřebovávají silně obohacené palivo s obsahem 20 – 50% štěpitelného izotopu oxidu plutoničitého a uraničitého. Neobsahují moderátor, takže pracují s tzv. rychlými neutrony, které dokáží efektivně přeměňovat neštěpitelnou složku paliva na využitelné štěpitelné izotopy. Oproti ostatním jaderným reaktorům operují rychlé jaderné reaktory s mnohem větší hustotou neutronů. Zásadní výhodou těchto reaktorů je fakt, že při správné konfiguraci umožňují vyprodukovat více štěpitelných izotopů, než sami spotřebují. Teplota v primárním okruhu je mnohem větší než u běžných reaktorů s pomalými neutrony. Jako chladivo se používá roztavený sodík, což má své výhody v oblasti bezpečnosti (menší tlak v primárním okruhu, tepelná odolnost) ale také nevýhody (reaktivita s kyslíkem a vodou, tuhnutí při odstavení reaktoru). Za hlavní výhodu sodíkového chlazení se považuje jeho výborná tepelná vodivost, která umožňuje dostatečné havarijní chlazení v případě výpadku čerpadel. Z principů FBR vycházejí i nejnovější reaktory IV. generace. Dosud fungující reaktory FBR jsou spíše prototypy s bezpečnostními vlastnostmi na úrovni reaktorů II. generace (Wagner, 2010).

9.3 Reaktory III. generace

Jde o modely vycházející konstrukčně z úspěšně fungujících reaktorů II. generace a doplňují je zejména novými bezpečnostními prvky. Snaží se o standardizaci konstrukce pro každý typ reaktorů a tím i snížení nákladů, lepší dostupnost, delší dobu životnosti, zvýšení

efektivity a minimalizaci vlivu na životní prostředí. Impulsem pro tyto inovace byla z velké části černobylská havárie. Reaktory III. generace vznikají od 90. let minulého století.

Na třetí generaci blíže navazuje generace III+, s vylepšenou pasivní bezpečností a dalšími inovacemi. Hranice v rozdělení reaktorů III. generace není zcela zřetelná (Froggatt, 2005; Wagner 2008).

Evropský tlakovodní reaktor **EPR** (European Pressurized Water Reactor) je výsledkem evolučního vývoje francouzských a německých tlakovodních reaktorů. Zlepšení přichází v oblasti nižších investičních nákladů, vyšší využitelnosti paliva a bezpečnosti. Oproti stávajícím tlakovodním reaktorům II. generace dochází ke zjednodušení bezpečnostních systémů, zahrnující na sobě nezávislé subsystémy, dále pak ke zdokonalení kontejnmentu a záchytného systému aktivní zóny. Ten znemožňuje šíření radioaktivity, pokud by došlo k nejhorší možné havárii, tj. roztavení aktivní zóny. Nebezpečí výskytů výbušné směsi vodíku a kyslíku v kontejnmentu je katalyticky eliminováno směšovači (Froggatt, 2005).

Reaktor s kuličkovým ložem **HTGR** (High Temperature Gas Cooled Reactor) je vysokoteplotní, plynem chlazený reaktor. Bývá označován také zkratkou **PBMR** (Pebble Bed Modular Reactor). Palivem je obohacený uran. Ten je hermeticky uzavřený v odolných, vrstvených kuličkách vsazených do koule s grafitovým jádrem (moderátor), která je potažena tvrzeným karbonem pro zvýšení odolnosti. Takovéto originální řešení koncepce palivových elementů velmi zvyšuje inherentní bezpečnost, avšak také náklady na výrobu. Palivové kuličky pomalu cirkulují ze zásobníků přes aktivní zónu reaktoru, přičemž jsou chlazeny heliem. Tento systém umožnil oproti jiným reaktorům snížit velikost aktivní zóny a zmenšit hustotu energie v reaktoru. Z důvodu jiného řešení konstrukce palivových elementů a tím i jejich vysoké odolnosti, se u tohoto typu reaktoru nepočítá s výstavbou kontejnmentu. Projekt předpokládá, že z fyzikální podstaty reaktoru k roztavení aktivní zóny nemůže dojít. Maximální teplota paliva při ztrátě chlazení je totiž mnohem menší, než garantovaná odolnost palivových kuliček (Denk, 1992; Froggatt, 2005).

Další typy reaktorů třetí generace jsou prakticky modernizovanou verzí již prověřených technologií, které splňují bezpečnostní požadavky na reaktory třetí generace. Reaktory **APWR** (Advanced Pressure Water Reactor) jsou vylepšenými typy tlakových lehkovodních reaktorů PWR. Zahrnují zejména více prvků pasivní bezpečnosti. Mezi APWR lze zařadit také reaktory s marketingovým označením **AP600** a **AP1000** od americké firmy Westinghouse. Vývojový posun zaznamenaly také varné reaktory v podobě nových typů vyvíjených pod různými obchodními názvy jako **ABWR** (Advanced Boiling Water Reactor) nebo **ESBWR** (Economic Simplified Boiling Water Reactor). Rozdíly jsou především v konstrukci a výkonu. Společným

jmenovatelem je zlepšení bezpečnosti, modernizace řídicích systémů, digitalizace a zjednodušení výstavby (Froggatt, 2005; Matějka 2000).

9.4 Reaktory IV. generace

Impuls ke vzniku „Mezinárodního fóra pro 4. generaci“ (GIF - Generation IV. International Forum) vzešel v roce 1999 z USA jako reakce na potřebu energetického rozvoje, energetické soběstačnosti a snahy o snižování skleníkových plynů (zejména CO₂). Cílem GIF je motivovat země s nejrozvinutějšími jadernými technologiemi k vývoji zcela nové generace reaktorů. Vychází se z mnohaleté zkušenosti s jadernou energetikou jak v pozitivním, tak negativním smyslu. Bylo stanoveno několik hlavních požadavků na reaktory IV. generace jako je bezpečnost a spolehlivost, ekonomická přijatelnost, odolnost proti vojenskému zneužití, produkce minima jaderného odpadu a trvalá udržitelnost výroby energie. K zásadní změně oproti kterýmkoliv jiným generacím dochází ve smyslu celkového pohledu na palivový cyklus (Froggatt, 2005).

Z mnoha prvotních návrhů, které přicházely v úvahu, bylo vybráno šest reaktorových systémů, které nejvíce splňovaly již uvedené požadavky GIF. Systémy musejí být nejprve prototypově ověřeny a až poté se bude moci uvažovat také o průmyslovém využití. Předpokládá se, že testovací provoz těchto reaktorů bude uskutečňován až po roce 2020 (Wagner 2008c).

Plynem chlazený rychlý reaktorový systém **GFR** (The Gas Fast Reactor) vychází z řady reaktorů využívajících plyny, nejčastěji helium, jako chladivo. Jelikož jde o reaktor v němž dochází ke štěpné reakci vlivem rychlých neutronů, odpadá nutnost jejich zpomalování a tím pádem zde není použit moderátor. Rychlé reaktory obecně potřebují pro svůj provoz vysoce obohacené palivo v odpovídající struktuře. U typů GFR se využívá jako paliva keramických kompozitů z uranu a plutonia ve tvaru kuliček nebo hranolů. Palivový cyklus je uzavřený, což znamená, že vyhořelé palivo je recyklováno přímo na území elektrárny, čímž se minimalizuje nebezpečí spojené s transportem radioaktivního materiálu. Rychlé reaktory mají také tzv. „množivý efekt“ díky němuž vzniká působením neutronů z neštěpitelné části paliva palivo, které lze štěpit a využívat. Vysoká výstupní teplota helia (až 900°C) a jednookruhový chladicí cyklus reaktoru zvyšují účinnost přeměny energie, ale zároveň kladou podstatné nároky na konstrukční řešení a výběr speciálně odolných materiálů (Froggatt, 2005; GIF, 2008).

Rychlý olovem chlazený reaktorový systém **LFR** (Lead-cooled Fast Reactor) využívá jako chladiva taveniny kovu (olovo nebo slitina olova a bismutu), pracuje s rychlým proudem neutronů a má uzavřený palivový cyklus. Palivo musí být upraveno tak, aby odolávalo vysoké teplotě. V plánu je poměrně široké rozpětí výkonu a použití reaktoru i jako menšího zdroje energie pro malé energetické sítě, ovšem s velmi dlouhou dobou provozu bez nutnosti výměny

paliva (až desítky let). Počítá se s tovární výrobou reaktorů, jejichž instalace a provoz na konkrétním místě by byl možný, aniž by pronajímatel měl přístup k jadernému palivu. To může do jisté míry eliminovat nebezpečí vojenského zneužití reaktoru. Reaktory LFR jsou hodnoceny pozitivně jak po stránce udržitelnosti a životnosti, tak po stránce zvýšené inherentní bezpečnosti. Opět je zde třeba dořešit otázky použití konstrukčních materiálů s podmínkou dobré odolnosti vůči teplotě (Froggat, 2005; GIF, 2008).

Reaktorový systém s roztavenou solí **MSR** (Molten Salt Reactor) představuje množství řešení, lišících se v použitém palivu, chladiivu i spektru neutronů (pomalé nebo rychlé). Využívá taveniny fluoridů uranu, sodíku a zirkonia (chladiivo) a grafitu (moderátor). Použití taveniny solí je výhodné z hlediska chemické inertnosti a nízkého tlaku par, což snižuje konstrukční problémy včetně koroze aktivní zóny reaktoru. Palivo je rozpuštěno v soli, takže jeho vojenská zneužitelnost se tím značně komplikuje. Inherentní bezpečnost je zajištěna zejména nouzovým vypouštěním paliva, pasivním chlazením a nízkou koncentrací nestabilních produktů štěpení. Doplnování paliva, jeho recyklace a odstraňování štěpných produktů by bylo možné provádět za provozu. Před spuštěním prvních reaktorů tohoto typu je třeba dořešit zejména otázky spojené s dlouhodobějším chováním taveniny vůči konstrukčním materiálům, rozpustností štěpných produktů v tavenině a výběrem vhodných materiálů a konstrukcí (Froggat, 2005).

Sodíkem chlazený rychlý reaktorový systém **SFR** (Sodium-Cooled Fast Reactors) je rychlý reaktor s uzavřeným palivovým cyklem, kde se jako chladiivo využívá tekutý sodík. S tímto systémem jsou poměrně dobré zkušenosti, jak ukazuje provoz rychlých reaktorů ve světě, které využívají podobný princip. Existují dvě varianty pro použití paliva, je to směs MOX (palivo skládající se ze dvou nebo více štěpných nuklidů, většinou uranu a plutonia) nebo slitinové palivo (slitina uranu, plutonia, zirkonia a vedlejších aktinidů). Spektrum rychlých neutronů umožňuje produkci plutonia ze samovolně neštěpitelného uranu 238 , což je ekonomicky výhodné, ale může způsobovat problémy z hlediska zneužitelnosti. Chlazení sodíkem má výhodu především v nízké korozivitě aktivní zóny a velké tepelné vodivosti. Oba tyto faktory zvyšují bezpečnost reaktoru, přesto je třeba dořešit některé bezpečnostní a provozní nedostatky jako např. nižší pasivní bezpečnost (Froggat, 2005; GIF, 2008).

Superkritický vodou chlazený reaktorový systém **SCWR** (Supercritical Water Reactor) využívá jako chladiiva i moderátoru lehkou (normální) vodu o vysoké teplotě a tlaku. Reaktor pracuje s fyzikálními podmínkami, které jsou nad termodynamickým kritickým bodem vody (více jak $374,15^{\circ}\text{C}$ a $22,12\text{ MPa}$). V takovém případě je voda ve stavu jedné fáze a má částečně vlastnosti kapaliny i plynu. Důsledkem vysoké teploty chladiiva je lepší efektivita přeměny tepelné energie a tím podstatné zvýšení účinnosti. Reaktor využívá jeden chladicí okruh. Jako palivo je možné použít obohacený uran ve formě oxidu pokrytý speciálně odolnými kovovými

slitinami. Výhodou při konstrukcích reaktorů tohoto typu jsou poměrně velké zkušenosti s varnými reaktory BWR, z jejichž konstrukce se vychází. Jelikož se v aktivní zóně nemění fáze chladiva (na rozdíl od BWR), odpadá tím instalace některých komponent a systém se tak stává kompaktnější a bezpečnější. Vzhledem k prostředí superkritické vody musejí být kladeny zvláštní požadavky na odolnost konstrukčních materiálů reaktorové nádoby a tlakového potrubí, včetně palivových komponent. Voda se v těchto fyzikálních podmínkách chová velmi korozivně k některým materiálům, navíc zde zároveň působí ozáření. Proto bude výběr vhodných konstrukčních materiálů bezpečnostní prioritou během příprav na realizaci prvních reaktorů tohoto typu (Froggat, 2005; GIF, 2008).

Vysokoteplotní reaktorový systém **VHTR** (Very High Temperature Reactor) je založen na jaderné reakci s využitím pomalých neutronů. Moderátorem by byl uhlík a chladivem helium. Palivo by představovaly teplotě odolné koule s karbidovými vrstvami a málo obohacným uranem. Počítá se s otevřeným palivovým cyklem, což znamená nutnost vypořádat se adekvátně s vyhořelým palivem (uskladnění nebo přepracování). Reaktor by pracoval s velmi vysokou teplotou (nad 1000°C) zaručující vysokou účinnost přeměny tepelné energie při jednookruhovém chlazení reaktoru. Do budoucna se s těmito typy reaktorů počítá jako se zdrojem energie pro syntézu vodíku. Konstrukční materiály budou muset odpovídat svými vlastnostmi nárokům na provoz za vysokých teplot (odolnost minimálně 1800°C). Bezpečnostní vlastnosti reaktorů VHTR jsou však v celku příznivé (Froggat, 2005; GIF, 2008).

10 Současný trend vývoje jaderných reaktorů

Z grafu (Příloha č. 5) je zřejmá jasná stagnace v období po černobylské havárii. Na druhou stranu křivka výkonu prozrazuje mírné navýšení. Je to zapříčiněno především tím, že nové typy reaktorů, které se v posledních letech instalují, mají z pravidla vyšší výkon než typy starší.

Jak je vidět z grafu počtu reaktorů v provozu (Příloha č. 6), tak v současnosti je v provozu nejvíce reaktorů tlakovodních PWR, které zároveň dominují i mezi reaktory ve výstavbě (Příloha č. 7). Lze tedy očekávat, že i v budoucnu budou mít tlakovodní reaktory dominantní zastoupení.

Z bezpečnostního hlediska jde o reaktory s dobrou mírou inherentní bezpečnosti, které jsou zároveň poměrně ekonomicky dostupné. Obecně platí, že nejnovější typy těchto reaktorů (III. generace) mají až o několik řádů menší míru ukazatele pravděpodobnosti poškození aktivní zóny, než typy starší (kapitola 6.1). Jejich rozšíření je dáno také poptávkou z rozvojových zemí. Velká část z nich se v současnosti staví na území Číny. V České republice je plánována výstavba dvou nových tlakovodních reaktorů III. generace v JE Temelín (Wagner, 2009).

Varné reaktory BWR jsou zastoupeny zejména v USA a Japonsku. Z konstrukčního hlediska mají větší účinnost, ale o něco nižší bezpečnost než preferované PWR (Froggatt, 2005).

Těžkovodní reaktory PHWR jsou rozšířené zejména v Kanadě. Nové dva reaktory se staví v Argentině a Indii (PRIS, 2000).

Plynem chlazené reaktory GCR dosluhují ve Velké Británii. Nové zatím nejsou stavěny a pravděpodobně budou nahrazovány jinými typy reaktorů (PRIS, 2000).

Reaktory RBMK v současnosti fungují pouze na území Ruska. Ačkoliv tento typ reaktorů nechvalně proslul havárií v Černobyli, přesto v současnosti probíhá dostavba jednoho reaktoru RBMK v elektrárně Kursk. Výstavba tohoto reaktoru byla zahájena ještě před Černobylem a později pozastavena z finančních důvodů. Reaktor během výstavby prošel bezpečnostní modernizací s cílem odstranit slabá místa, která vedla k černobylské havárii (Lederman, 1996).

Rychlé reaktory FBR jsou celkově v minoritním zastoupení. Nově se staví jeden reaktor tohoto typu v Rusku a druhý v Indii (PRIS, 2000). Indický reaktor je specifický tím, že je plánován také pro přeměnu thoria 232 na uran 233, což se jeví po mnoha stránkách jako zajímavá palivová koncepce (Wagner, 2010). Pro budoucnost jaderné energetiky jsou zkušenosti s rychlými reaktory velmi důležité, protože koncept reaktorů IV. generace počítá s principem rychlých reaktorů.

11 Vývoj bezpečnostních požadavků

Podle Matějky (2000) lze charakterizovat tři vývojová období jaderných elektráren. Jsou to stávající jaderné elektrárny, zdokonalené elektrárny, které navazují na získané zkušenosti a zahrnují nové bezpečnostní tendence a zcela nové typy reaktorů s vysokým stupněm inherentní a pasivní bezpečnosti. V současnosti se vývoj jaderných reaktorů postupně dostává do druhého období.

Budoucí projekty lze z bezpečnostního hlediska posuzovat podle přístupu k roztavení aktivní zóny. To je považováno za vůbec nejtěžší možnou havárii reaktoru (INES, 2001). U reaktorů s možností roztavení aktivní zóny je třeba nadále zajišťovat propracovanou hloubkovou ochranu. Cílem je snižování pravděpodobnosti poškození aktivní zóny na bezpečnostně přípustnou míru, což lze označit za evoluční vývoj. Naopak jako revoluční se označuje vývoj nových typů jaderných reaktorů IV. generace s vysokým stupněm inherentní bezpečnosti.

Jak uvádí Matějka (2000), další posuzování projektů je dáno ekonomickými aspekty. Projekt se hodnotí na základě vypracovaných pravděpodobnostních analýz. Míru přípustného rizika lze určit tak, že se porovnávají náklady na zdokonalení bezpečnostních systémů a ztráty spojené se vznikem případné havárie.

Obecně lze říci, že při vývoji budoucí typů tlakovodních reaktorů bude kladen důraz na prosazování pasivních bezpečnostních systémů a zvyšování spolehlivosti aktivních bezpečnostních systémů. Podle Matějky (2000) se usiluje o to, aby konstrukce budoucích jaderných elektráren zcela vylučovala možnost havárie 4. až 7. stupně stupnice INES.

Vzhledem k prověřenosti, přijatelné bezpečnosti a relativní cenové dostupnosti se budou pravděpodobně reaktory PWR prosazovat i nadále.

Reaktory IV. generace by přinesly revoluční změnu jak ve zvýšení bezpečnosti, tak v řešení palivového cyklu. Na jejich vývoji je však třeba ještě delší dobu pracovat. Zejména se bude muset dořešit mnoho konstrukčních otázek týkajících se odolnosti použitých materiálů. V současnosti se z ekonomického hlediska nevyplácejí. Vycházejí příliš draze především po stránce konstrukce a náročnosti na úpravu paliva (Wagner, 2008c). Přesto představují poměrně realizovatelnou energetickou naději pro budoucnost.

12 Závěr

Otázka bezpečnosti jaderných reaktorů se stala nejvíce diskutovanou po černobylské havárii. Proto tato událost tvoří mezník ve vývoji bezpečnosti reaktorů. Bylo potvrzeno, že nelze provozovat jaderný reaktor, aniž by nebyla dostatečně vyřešena otázka jeho bezpečnosti. Jaderná energetika dostává v očích široké veřejnosti pomyslnou podmínku, že ji bude možné dál využívat pouze za předpokladu, že se nebude opakovat Černobyl. Jsou zpřísněny bezpečnostní nároky a u nově vyvíjených reaktorů je dostatečná míra bezpečnosti jedním ze základních požadavků. Zdokonalují se bezpečnostní systémy a důraz je kladen především na vývoj reaktorů s vysokou inherentní bezpečností.

Na druhé straně proti bezpečnostním zájmům mohou stát zájmy ekonomické. Lidstvo je dnes schopno vyrobit reaktory s velmi vysokou mírou bezpečnosti, která by uspokojila i ty největší skeptiky. Problém je však v jejich příliš vysoké ceně. Provozovatelé jaderných reaktorů logicky hledají nejpříznivější poměr bezpečnosti a ceny. Proto se v současnosti upřednostňují projekty, které minimalizují riziko na přijatelnou míru ale zároveň jsou ekonomicky dostupné.

Důležité je nedopustit, aby ekonomické zájmy převážily nad požadavky bezpečnosti. Je totiž snadné vyrobit velmi levný, ovšem také velmi nebezpečný jaderný reaktor. Následky takového jednání mohou být tragické. Proto je zájem veřejnosti o problematiku bezpečnosti jaderných reaktorů velmi důležitý a funguje v tomto případě jako významný kontrolní faktor. Zároveň je ale třeba se vyvarovat zbytečných předsudků a hysterii.

Provoz jaderných reaktorů je a bude vždy svým způsobem rizikovou záležitostí. Ovšem pokud se k těmto technologiím bude přistupovat s respektem a pokorou, nepředstavují hrozbu ale výhodný zdroj energie.

13 Seznam použitých zdrojů

Attitudes towards radioactive waste. In *Special Eurobarometer 297* [online]. European Commission, June 2008 [cit. 2010-05-22]. Dostupné z WWW: <http://ec.europa.eu/public_opinion/archives/ebs/ebs_297_en.pdf>.

BERRY, Nicholas. 2001. *Center for Defense Information* [online]. 2001 [cit. 2010-05-18]. Keeping Nuclear Power Plants Safe from Terrorists. Dostupné z WWW: <<http://www.cdi.org/terrorism/nuclear-plants.cfm>>.

Convention on Nuclear Safety. 1994. Vienna : IAEA, 5 July 1994. 10 s. Dostupný také z WWW: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/Others/inf449.shtml>>.

DENK, M.; KAČENA, L. 1992. *Jaderné reaktory*. 1992. Praha : ČEZ a.s., 1992. 27 s.

DRÁBOVÁ, Dana. 2006. Jaderná energetika před černobylskou havárií a po ní. *Vesmír*. Březen 2006, 85, s. 137-139.

DRÁBOVÁ, Dana, et al. *Patnáct let od havárie Černobylu : důsledky a poučení* [online]. Praha : SÚJB, 2001 [cit. 2010-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.sujb.cz/docs/15let_od_havarie_Cernobylu.pdf>.

VRBA, Miroslav. 2002. Uplatnění principu reciprocity "po rakousku". *Energetika* [online]. 2002, 2, [cit. 2010-05-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.energetik.cz/hlavni3.html?m1=/energetika/2002.html>>.

FROGGATT, Antony. 2005. *Jaderná energie: Mýtus a skutečnost : Bezpečnostní rizika jaderných reaktorů* [online]. Praha : Heinrich Böll Foundation, 2005 [cit. 2010-05-17]. Dostupné z WWW: <http://www.calla.cz/data/energetika/seminare/eaje/myth_reality/froggatt.pdf>.

GIF/RSWG/2007/002. 2008. *Basis for the Safety Approach for Design & Assessment of Generation IV Nuclear Systems*. [s.l.] : OECD Nuclear Energy agency, 2008. 91 s. Dostupné z WWW: <http://www.gen-4.org/Technology/horizontal/documents/Basis_for_the_Safety_Approach_for_Design_Assessment_of_Generation_IV_Nuclear_Systems_000.pdf>.

GILL, Victoria. 2009. *Chernobyl 'shows insect decline'* [online]. 18 March 2009 [cit. 2010-05-13]. BBC NEWS. Dostupné z WWW: <<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7949314.stm>>.

HÁLA, Jiří. 1998. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie..* Brno : Konvoj, 1998. 311 s.

IAEA : *International Atomic Energy Agency* [online]. c2003 [cit. 2010-05-06]. Dostupné z WWW: <<http://www.iaea.org/>>.

IAEA-TECDOC-626. 1991. *Safety related terms for advanced nuclear plants INTERNATIONAL ATOMIC*. Vienna (Austria) : IAEA, 1991. 23 s. Dostupné z WWW: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_626_web.pdf>.

IAEA-TECDOC-1200. 2001. *Applications of probabilistic safety assessment (PSA) for nuclear power plants*. Vienna (Austria) : IAEA, 2001. 104 s. Dostupné z WWW: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1200_prn.pdf>.

INES - *The International Nuclear Event Scale*. 2001. Vienna (Austria) : IAEA, 2001. 93 s. Dostupné z WWW: <<http://www-news.iaea.org/news/inesmanual/INES2001.pdf>>.

INSAG-12. 1999. *Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants*. Vienna (Austria) : IAEA, 1999. 105 s. Dostupné z WWW: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P082_scr.pdf>.

JB-1.2. 2010. *Periodické hodnocení bezpečnosti : bezpečnostní návod*. [s.l.] : SÚJB, 2010. 32 s. Dostupné z WWW: <http://www.sujb.cz/docs/Periodicke_hodnoceni_bezpecnosti_BN_JB_1.2_Draft.pdf>.

JURKAS, Josef. 1995. Seismická odolnost elektrických zařízení jaderných elektráren. *Elektro*. 1995, 12, s. 446-447.

KAVKA, Martin. 2009. *POŽÁRY.cz* [online]. 20.06.2009 [cit. 2010-05-01]. Nehody a katastrofy jaderných elektráren. Dostupné z WWW: <http://www.pozary.cz/rubriky/historie/nehody-a-katastrofy-jadernych-elektren-ii-dil-jaslovske-bohunice-a-dalsi_18238.html>.

KRATOCHVÍLOVÁ, Dana. 2002. *Havarijní plánování : Havarijní plány dle současné legislativy*. Ostrava : Vysoká škola báňská, Fakulta bezpečnostního inženýrství, 2002. 80 s. Dostupné z WWW: <<http://www.fbi.vsb.cz/shared/uploadedfiles/fbi/Havarijni-planovani-II.pdf>>.

KUNERT, Jiří. 2003. Proč *Deinococcus radiodurans* odolává ionizujícímu záření. *Vesmír*. Březen 2003, 82, s. 176.

LEDERMAN, Luis. 1996. Safety of RBMK reactors: Setting the technical framework. *IAEA Bulletin*. 1996, 1, s. 10-17. Dostupný také z WWW: <<http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull381/38102741017.pdf>>.

MAREK, Jiří. 2000. *Jaderná energie*. [s.l.] : ČEZ, 2000. 72 s.

MATĚJKA, Karel; ZEMAN, Jaroslav; HEŘMANSKÝ, Bedřich. Vývoj požadavků na bezpečnost nových jaderných reaktorů. *Školská fyzika*. 2000, 2, s. 28-40. Dostupný také z WWW: <<http://stag.zcu.cz/fel/kee/JE-nuclear/bezpecnost.pdf>>.

MULVEY, Stephen. 2006. *BBC News* [online]. 20 April 2006 [cit. 2010-05-08]. Wildlife defies Chernobyl radiation. Dostupné z WWW: <<http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/4923342.stm>>.

NEA - Nuclear Energy Agency [online]. 2010 [cit. 2010-05-01]. Facts and figures. Dostupné z WWW: <<http://www.nea.fr/general/facts/>>.

NRC [online]. 2007 [cit. 2010-05-05]. Images. Dostupné z WWW: <<http://www.nrc.gov/reactors/operating/ops-experience/vessel-head-degradation/images.html>>.

PRIS : Power Reactor Information System [online]. 2000 [cit. 2010-05-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.iaea.or.at/programmes/a2/>>.

Pro Atom web [online]. 2007 [cit. 2010-05-25]. Dostupné z WWW: <<http://proatom.luksoft.cz/>>.

SCHNEIDER, Mycle. 2009. *Status and Trends of the World Nuclear Industry in 2009* [online]. Toronto (Canada) : Mycle Schneider Consulting, 2009 [cit. 2010-05-20]. Dostupné z WWW: <http://iicph.org/file_download/31/world-nuclear-mycle-schneider-iicph-talk-2009.pdf>.

SÚJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost [online]. 2000 [cit. 2010-05-06]. Dostupné z WWW: <<http://www.sujb.cz/>>.

ŠKOLA, Ivo. 2006. Přírozená bezpečnost jaderných elektráren. *Třetí pól*. Duben 2006, 2, s. 10-11.

SURO - Státní ústav radiační ochrany [online]. 2000 [cit. 2010-05-05]. Přírodní radioaktivita a problematika radonu. Dostupné z WWW: <<http://www.suro.cz/cz/prirodnioz>>.

Technický týdeník [online]. 3. 12. 2009 [cit. 2010-05-09]. Nové laboratoře prozkoumají stárnutí materiálu reaktorů. Dostupné z WWW: <http://www.technicky-tydenik.cz/tech_zpravy.php?id=4148>.

The History of Nuclear Energy. 1994. Washington : U.S. Department of Energy, 1994. 28 s. Dostupné z WWW: <<http://nuclear.energy.gov/pdfFiles/History.pdf>>.

VANĚK, Václav. 2008. *Bez jádra to nepůjde* [online]. [s.l.] : ČEZ, 2008 [cit. 2010-05-06]. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/bezjadratonepujde-2.doc>>.

WAGNER, Vladimír. 2008a. *Reaktory III. generace* [online]. 4.5.2008 [cit. 2010-05-04]. Objective Source E-Learning. Dostupné z WWW: <<http://www.osel.cz/index.php?clanek=3531>>.

WAGNER, Vladimír. 2008b. *Kdy se bude jaderná fúze využívat pro výrobu energie?* [online]. 3.12.2008 [cit. 2010-05-24]. Objective Source E-Learning. Dostupné z WWW: <<http://www.osel.cz/index.php?clanek=4120>>.

WAGNER, Vladimír. 2008c. *Reaktory IV generace* [online]. 3.12.2008 [cit. 2010-05-04]. Objective Source E-Learning. Dostupné z WWW: <<http://www.osel.cz/index.php?obsah=6&clanek=3568>>.

WAGNER, Vladimír. 2009. *Nové reaktory pro Temelín* [online]. 2009 [cit. 2010-04-01]. Objective Source E-Learning. Dostupné z WWW: <<http://www.osel.cz/index.php?clanek=4716>>.

WAGNER, Vladimír. 2010. *Rok 2010 - zlomový pro rychlé reaktory* [online]. 12.2.2010 [cit. 2010-05-04]. Objective Source E-Learning. Dostupné z WWW: <<http://www.osel.cz/index.php?clanek=4120>>.

Windscale fire. 2009. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 29. August 2009, last modified on 20. April 2010 [cit. 2010-05-01]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Windscale_fire>.

WNA [online]. 2010 [cit. 2010-05-05]. Safety of Nuclear Power Reactors. Dostupné z WWW: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf06.html>>

14 Seznam použitých zkratek

ABWR	Advanced Boiling Water Reactor
AGR	Advanced Gas Reactor
APWR	Advanced Pressure Water Reactor
AZ	Aktivní zóna
BWR	Boiling Water Reactor
CANDU	CANada Deuterium Uranium
CDF	Core damage frequency
CP	Chicago Pile
EBR	Experimental Breeder Reactor
EPR	European Pressurized Water Reactor
ESBWR	Economic Simplified Boiling Water Reactor
GCR	Gas Cooled Reactor
GFR	The Gas Fast Reactor
GIF	Generation IV. International Forum
HTGR	High Temperature Gas Cooled Reactor
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICPR	International Commission for Radiological Protection
INES	The International Nuclear Event Scale
JE	Jaderná elektrárna
LFR	Lead-cooled Fast Reactor
LWGR	Light-Water-cooled Graphite-moderated Reactor
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
MSR	Molten Salt Reactor
NRX	National Research Experimental
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PBMR	The Pebble Bed Modular Reactor
PHWR	Pressurized Heavy Water Reactor
PSA	Probabilistic safety assessments
PWR	Pressurized Water Reactors

RBMK	Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj
SCWR	Supercritical Water Reactor
SFR	Sodium-Cooled Fast Reactors
SL	Stationary Low
VHTR	Very High Temperature Reactor
VVER	Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor
WANO	World Association of Nuclear Operators

15 Seznam příloh

Příloha č. 1: Závažné havárie jaderných reaktorů (tabulka)

Příloha č. 2: Průzkum tolerance jaderné energetiky mezi občany Evropské unie v letech 2005 a 2008

Příloha č. 3: Podíl jednotlivých zdrojů záření na celkovém ozáření obyvatelstva

Příloha č. 4: Stáří v současnosti ve světě fungujících reaktorů s vyznačenými mezníky havárií

Příloha č. 5: Počet ve světě fungujících reaktorů během let 1954 – 2009 a jejich instalovaný výkon

Příloha č. 6: Počty fungujících reaktorů ve světě podle typu. Stav k 6. 5. 2010

Příloha č. 7: Počty reaktorů ve výstavbě ve světě podle typu. Stav k 6. 5. 2010

Příloha č. 8: Průřez typickým tlakovodním reaktorem

Příloha č. 9: Příklad několika ochranných fyzických bariér

Příloha č. 10: Přehled jednotlivých generací jaderných reaktorů

Příloha č. 11: Schéma tlakovodního reaktoru PWR resp. VVER

Příloha č. 12: Schéma varného reaktoru BWR

Příloha č. 13: Schéma těžkovodního reaktoru PHWR resp. CANDU

Příloha č. 14: Schéma grafitového reaktoru RBMK resp. RWGR

Příloha č. 15: Schéma rychlého množivého reaktoru FBR

Příloha č. 16: Schéma vysokoteplotního reaktoru HTGR

Příloha č. 17: Schéma rychlého reaktoru chlazeného plynem FBR

Příloha č. 18: Schéma rychlého olovem chlazeného reaktoru LFR

Příloha č. 19: Schéma reaktoru s roztavenou solí MSR

Příloha č. 20: Schéma rychlého sodíkem chlazeného reaktoru LFR

Příloha č. 21: Schéma superkritického vodou chlazeného reaktoru SCWR

Příloha č. 22: Schéma vysokoteplotního reaktoru VHTR