



Zdravotně
sociální fakulta
Faculty of Health
and Social Sciences

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Zdravotně sociální fakulta
Ústav radiologie, toxikologie a ochrany obyvatelstva

Bakalářská práce

Historie závažných havárií na jaderných zařízeních

Vypracovala: Kristýna Dražanová
Vedoucí práce: Mgr. Renata Havránková, Ph.D.

České Budějovice 2016

Abstrakt

Bakalářská práce mapuje všechny havárie, které byly stupnicí INES ohodnoceny stupněm 5 a vyšším. Nejedná se pouze o události na jaderných elektrárnách, ale také v závodech na výrobu jaderných zbraní, jejichž výstavba v několika státech jaderným elektrárnám předcházela. Pozornost je v této práci věnována i nešťastné události, která vznikla nepovolanou manipulací se součástí radioterapeutického přístroje obsahující radioizotopy cesia ^{137}Cs .

Pro tuto práci byla stanovena následující výzkumná otázka: Je nejčastější příčinou havárie na jaderných zařízeních selhání lidského faktoru?

Teoretická část bakalářské práce objasňuje obecné pojmy, jako je radioaktivita a ionizující záření. Rozlišuje druhy a zdroje ionizujícího záření a popisuje jeho účinky na lidský organismus. Zabývá se také jadernou bezpečností, jejími orgány a určující legislativou. Charakterizuje stupnici INES, která je mezinárodně používanou stupnicí k hodnocení jaderných událostí. V praktické části je vypracovaný přehled havárií s podrobným popisem jejich průběhu, okolností, které k nim vedly a následků, které zanechaly. Na základě tohoto přehledu byla provedena analýza jednotlivých havárií a následná vzájemná komparace ve smyslu hledání shodných či podobných znaků.

Z výsledků analýzy vyšly v této práci najevo tyto skutečnosti:

Havárie 4. reaktoru jaderné elektrárny v Černobylu byla zapříčiněna závažným a úmyslným porušením bezpečnosti. Reaktor byl v rámci zkoušky uveden do nestabilního stavu poté, co byl jeho výkon snížen hluboko pod jeho bezpečné operační parametry. Při probíhající xenonové otravě byly za účelem opětovného zvýšení reaktivity vytaženy téměř všechny bórové tyče. K automatickému havarijnímu odstavení nedošlo, protože tento systém byl dříve záměrně zablokován.

Havárie jaderné elektrárny Fukušima byla způsobena souhrou vlivů přírodní katastrofy, chybného návrhu elektrárny (příliš nízké vlnolamy a chybné umístění záložních dieselových agregátů) a nedostatků v havarijních plánech elektrárny.

Ke kyštymské havárii v PA Majak došlo z důvodu špatného návrhu chladicího zařízení nádrží na radioaktivní odpad a následného podcenění situace radiochemickým týmem. Předchozí i následná kontaminace Čeljabinské oblasti vyplynula ze selhání morálního charakteru odpovědných osob.

Výzkumný reaktor v Chalk River dovedly k havárii dvě smolná pochybení jeho obsluhy. V důsledku těchto chyb došlo k vytažení příliš vysokého počtu regulačních tyčí, kritickému nárůstu výkonu a ztrátě kontroly nad štěpnou řetězovou reakcí.

Havárie továrny ve Windscale vznikla kvůli množství neuvážených rozhodnutí, enormnímu tlaku politiků na rychlost výroby a soustavnému porušování bezpečnosti. Před havárií obsluha pochybila v procesu vyžíhání reaktoru, který vedl ke vznícení paliva a následnému požáru reaktoru.

Havárie 2. reaktoru elektrárny Three Mile Island byla podmíněna chybou v návrhu reaktoru, přesněji nedostatkem v jeho monitorovacím systému a chybějící instrumentací. Když došlo k technickému selhání komponent reaktoru, nedostávali operátoři od systému adekvátní informace, mimo jiné o hladině vody zbývající v aktivní zóně reaktoru.

Radiační nehoda v Goiânii vznikla v první řadě z důvodu nezabezpečení budovy bývalé kliniky, v které byl zanechán ozařovač obsahující práškový chlorid cesný ^{137}Cs .

V závěru bakalářské práce se podařilo odpovědět na již zmíněnou výzkumnou otázku, která zní: Je nejčastější příčinou havárie na jaderných zařízeních selhání lidského faktoru? Z výsledků, které práce uvádí, lze konstatovat, že selhání lidského faktoru je jednoznačně nejčastější příčinou závažných havárií na jaderných zařízeních.

Klíčová slova: stupnice INES, jaderná elektrárna, jaderný reaktor, havárie, radioaktivní kontaminace

Abstract

The bachelor thesis maps all the accidents assessed by the INES scale level 5 and above. It is not only concerning events at nuclear power plants, but also at nuclear weapons production facilities, whose construction preceded the development of the nuclear power plants in several countries. An attention is paid also to the unfortunate event, which was originated as a result of unauthorized manipulation with a part of the radiotherapy device containing radioactive isotopes of caesium ^{137}Cs .

The present thesis was intended to examine the following research question: Is human failure the most frequent cause of nuclear plant accidents?

The theoretical part of the bachelor thesis explains the general concepts, such as radioactivity and ionizing radiation. It distinguishes the types and sources of ionizing radiations and describes its impact on human body. Next, it deals with the concept of nuclear safety, determined supervising authorities and its governing legislation. It also contains a description of the INES scale, which is an international scale used to assess nuclear incidents and accidents. The practical part of this thesis provides an overview of the accidents with a detailed description of their development, the circumstances that led to them and the consequences left behind. The development of the individual accidents is subsequently analysed with a view to discover the underlying causes, and finally compared in order to find possible identical features or similarities.

The analysis carried out in the study highlighted the following facts:

The disaster of the Chernobyl reactor number four was caused by a serious and intentional security breach. During a test, the reactor was put into an unstable condition after decreasing its output well below its safe operational levels. With xenon poisoning, nearly all boron rods were extracted. Emergency shutdown of the reactor did not occur because the system had been blocked on purpose.

The disaster of the Fukushima nuclear plant was caused by the interplay of the results of a natural disaster, ill design of the plant (low seawalls and wrong placement of emergency diesel generators), and shortcomings in the power plant's contingency plans.

The Kyshtym disaster at the Mayak PA was the result of an ill-designed cooling system of the radioactive waste tanks and the situation being underestimated by the radiochemical team. The previous and subsequent contamination of the Chelyabinsk area was due to a moral failure of the persons responsible.

The disaster of the Chalk River research reactor was the result of two unfortunate staff mistakes. These mistakes led to too many control rods being extracted, a critical output surge, and loss of control over the fission reaction.

The disaster of the Windscale plant occurred due to a number of reckless decisions, enormous political pressure on the speed of production, and systematic security breaches. Before the accident, the operators made a mistake in the annealing process, which led to fuel ignition and fire in the reactor.

The underlying cause of the Three Mile Island reactor number two disaster was an oversight in the reactor design, specifically its information system and lacking instrumentation. When a technical failure of reactor components occurred, the operators did not receive adequate information from the system, including about the amount of water remaining in the reactor's active zone.

The radiation tragedy in Goiânia was primarily caused by the lack of security at a former hospital site, where radiotherapy equipment containing powdered caesium chloride ^{137}Cs had been abandoned.

At the ending, the bachelor thesis succeeded to answer the previously mentioned research question, which is: Is human failure the most frequent cause of nuclear plant accidents? The results of the thesis show that although the degree of seriousness (or intentionality) of the failures involving the different accidents varies, human failure is the ultimate cause of all known serious nuclear accidents.

Keywords: INES scale, nuclear power plant, nuclear reactor, accident, radioactive contamination

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejich internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 3.5.2016

.....

Kristýna Dražanová

Poděkování

Ráda bych na tomto místě poděkovala Mgr. Renatě Havránkové, Ph.D., vedoucí mé bakalářské práce, za cenné rady, trpělivý a vstřícný přístup i veškerý čas, který mi v průběhu zpracování věnovala.

Poděkování patří také mojí rodině, bez jejíž podpory a pochopení by tato práce nevznikla.

Obsah

ÚVOD.....	11
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	13
1.1 Radioaktivita.....	13
1.2 Ionizující záření.....	14
1.2.1 Ochrana před ionizujícím zářením.....	16
1.2.2 Zdroje ionizujícího záření.....	16
1.2.3 Ionizující záření v jaderné energetice.....	17
1.4 Legislativa.....	18
1.5 Jaderná bezpečnost a její orgány.....	20
1.5.1 Státní úřad pro jadernou bezpečnost.....	20
1.5.2 Mezinárodní agentura pro atomovou energii.....	22
1.6 Havarijní připravenost.....	23
1.7 Mimořádné události spojené s únikem radioaktivních látek.....	24
1.7.1 Havárie.....	26
1.8 Vliv havárií na zdraví člověka.....	27
1.9 Mezinárodní stupnice jaderných událostí.....	30
1.9.1 Charakteristika stupnice INES.....	31
2 VÝZKUMNÁ OTÁZKA A METODIKA.....	33
2.1 Výzkumná otázka.....	33
2.2 Metodika.....	33
3 VÝSLEDKY.....	34
3.1 Havárie sedmého stupně.....	34
3.1.1 Černobyl.....	34
3.1.2 Fukušima.....	42
3.2 Havárie šestého stupně.....	49
3.2.1 Majak.....	50

3.3	Havárie pátého stupně.....	54
3.3.1	<i>Chalk River</i>	54
3.3.2	<i>Windscale</i>	56
3.3.3	<i>Three Mile Island</i>	60
3.3.4	<i>Goiânia</i>	63
3.4	Závěrečné shrnutí závažných havárií.....	66
4	DISKUZE	67
4.1.	Černobyl.....	67
4.2	Fukušima.....	68
4.3	Majak	68
4.4	Chalk River	69
4.5	Windscale.....	69
4.6	Three Mile Island.....	70
4.7	Goiânia.....	70
4.8	Komparace výsledků.....	71
4.9	Vyhodnocení výzkumné otázky.....	72
5	ZÁVĚR.....	73
6	LITERATURA	74
7	SEZNAM TABULEK	82
8	SEZNAM OBRÁZKŮ	83

Seznam použitých zkratk

ALARA	<i>As low as reasonably achievable</i> (Tak nízké, jak je rozumně dosažitelné)
BWR	<i>Boiling water reactor</i> (Varný reaktor)
CANDU	<i>Canada deuterium uranium</i> (Kanadský těžkovodní reaktor)
ECCS	<i>Emergency core cooling system</i> (Systém havarijního chlazení aktivní zóny)
HP	Havarijní plán
HPCI	<i>High pressure coolant injection</i> (Vysokotlaké vstřikování chladiva)
IAEA	<i>International atomic energy agency</i> (Mezinárodní agentura pro atomovou energii)
IC	<i>Isolation condenser</i> (Izolační kondenzátor)
ICRP	<i>International commission on radiological protection</i> (Mezinárodní komise pro radiologickou ochranu)
INES	<i>The international nuclear event scale</i> (Mezinárodní stupnice jaderných událostí)
IZ	Ionizující záření
JE	Jaderná elektrárna
JZ	Jaderné zařízení
MU	Mimořádná událost
NRX	<i>National research experimental</i> (Národní vědecký reaktor)
PWR	<i>Pressurized water reactor</i> (Tlakovodní reaktor)
RBMK	<i>Reaktor bolšoj moščnosti kanalnyj</i> (Kanálový reaktor vysokého výkonu)
RCIC	<i>Reactor core isolation cooling</i> (Izolované chlazení jádra reaktoru)
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRO	Státní ústav radiační ochrany
TMI	Three Mile Island

ÚVOD

V letošním roce si svět připomíná výročí obou dosud nejzávažnějších havárií jaderných elektráren. Je to právě 30 let od výbuchu 4. reaktoru černobylské elektrárny a 5 let od katastrofy ve Fukušimě, kdy v důsledku vlny cunami došlo k havárii, jež navždy změnila světový pohled na jadernou energetiku.

Využití štěpné reakce radioaktivních prvků pro získání energie znamenalo v 50. letech minulého století skutečnou revoluci energetiky. Výhodou jaderných elektráren je v první řadě jejich ekologická čistota. Při procesu výroby energie v jaderných reaktorech nedochází ke vzniku CO₂, jako je tomu u uhelných elektráren a emise plyných škodlivin jsou minimální, takže nepřispívají k zátěži životního prostředí. Další výhodou je nesrovnatelně vyšší koncentrace elektrického výkonu v přepočtu na množství spotřebovaného paliva. Jaderná reakce by se však v jistém smyslu dala přirovnat k ohni, o kterém se říká, že je dobrý sluha ale zlý pán. K různým mimořádným událostem na jaderných reaktorech (ať již v energetice, či v jiném odvětví) dochází od doby jejich vynalezení a bude k nim docházet i nadále. Na lidech zůstává především úkol, aby se z těchto událostí poučili do budoucna.

V současné době existuje nezanedbatelné riziko, že by se jaderná elektrárna mohla stát cílem teroristického útoku. Důsledná kontrola zabezpečení je tedy na místě nejen ve smyslu bezpečného procesu výroby elektřiny, ale také ve smyslu zamezení potenciálního útoku.

Tato bakalářská práce má za cíl vyhotovení přehledu havárií, hodnocených škálou INES v rozmezí stupňů 5 až 7. Úkolem následující analýzy jednotlivých havárií je odhalení příčin, které k nim vedly. Závěrečná komparace těchto událostí je zaměřena na nalezení případných shodných znaků a podobností.

Teoretická část práce je pomyslně rozdělena do tří na sebe navazujících částí, přičemž první část objasňuje pojem radioaktivita a popisuje základní veličiny v oblasti dozimetrie a radiační ochrany. Charakterizuje pojem ionizující záření, vysvětluje mechanismy jeho účinku s prostředím a rozděluje jeho druhy. Věnuje se zdrojům

ionizujícího záření a definuje jejich základní rozdělení podle původu. Přírodní zdroje jsou přiblíženy okrajově, těm umělým se práce věnuje blíže. Detailnější popis je věnován zdrojům ionizujícího záření v jaderné energetice, protože ty jsou pro tuto práci nejdůležitější. V této části jsou vysvětleny také tři základní způsoby zabezpečení ochrany před působením ionizujícího záření. V úvodu druhé části je přiblížena základní legislativa související s jadernou bezpečností v České republice, tedy v první řadě se zákonem č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření a několika dalšími právními předpisy, které uvedený zákon doplňují a rozšiřují. Dále definuje a rozlišuje pojmy jaderná bezpečnost a radiační ochrana. Krátce se věnuje také orgánům, jež nad jadernou bezpečností plní dozor, a rozebírá havarijní připravenost a její náležitosti. Třetí část je věnována jaderným haváriím v obecném smyslu. Charakterizuje specifika dělení mimořádných událostí v jaderné bezpečnosti na nehody a havárie. Popisuje, jaký vliv mají ionizující záření a radioaktivní materiály uniklé při haváriích na zdraví obyvatelstva a jaké účinky mohou v organismu způsobit. Poskytuje podrobný popis stupnice INES, která je mezinárodně využívána k hodnocení jaderných nehod a havárií.

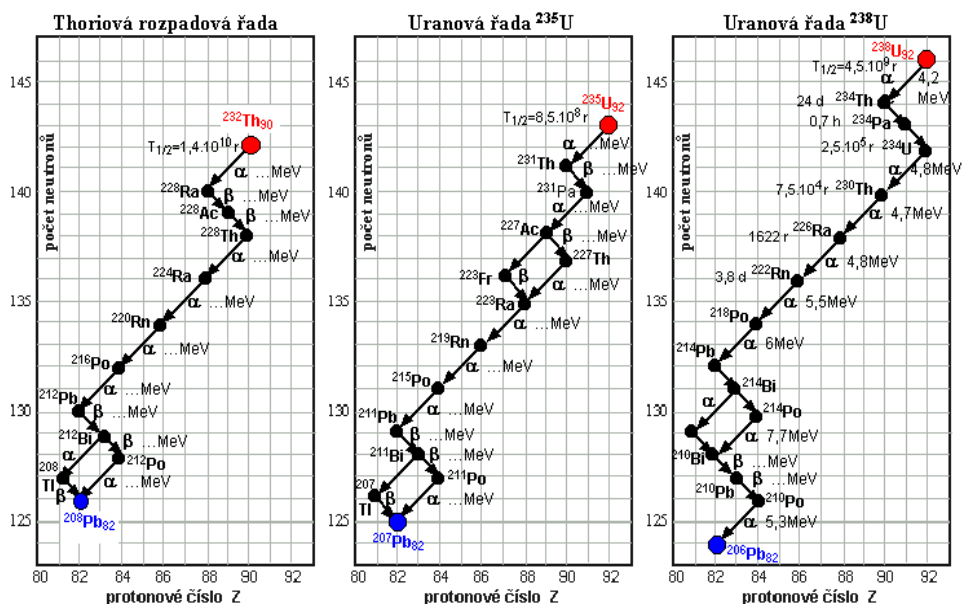
Vypracování praktické části bylo provedeno metodou detailní rešerše literárních pramenů, odborných článků a internetových zdrojů. Poté byl vytvořen přehled havárií a jednotlivé události byly seřazeny chronologicky, sestupně dle hodnocení závažnosti podle INES. K jaderným zařízením byly doplněny základní geograficko-historické informace a k haváriím, kde došlo k poškození jaderného reaktoru, byl vypracován i popis jeho konkrétního typu. U všech havárií byly uvedeny také následky, které vznikly na zařízení, na životním prostředí, zasahujících osobách a obyvatelstvu (pokud takové vznikly).

1 TEORETICKÁ ČÁST

Jaderná zařízení využívají při své práci štěpné reakce radioaktivních prvků jako je uran ^{238}U nebo plutonium ^{239}Pu . Během této reakce dochází v aktivní zóně reaktoru k vývinu dalších radioaktivních látek ve formě štěpných a aktivačních produktů. Pokud dojde k havárii, tyto látky uniknou. Na úvod práce je třeba definovat, co vyjadřují pojmy radioaktivita a ionizující záření.

1.1 Radioaktivita

Radioaktivita je samovolný rozpad jader atomů, probíhající nezávisle na vnějších podmínkách. Nestabilní nuklid prvku se samovolně přeměňuje na nuklid prvku jiného, přičemž stabilitu nuklidu určuje poměr protonů a neutronů v jádře atomu a doba, za kterou se přemění právě polovina celkového počtu jader. Tato doba se nazývá poločas přeměny ($T_{1/2}$). (Kroupa, 2010) Přírozenou radioaktivitou nazýváme jev, kdy se těžší a nestabilní nuklid mění postupně na nuklidy lehčí až do momentu dosažení stability. Umělá radioaktivita vyžaduje k vyvolání nestability jádra vnější zásah, obvykle jadernou reakci. (Kolektiv autorů, 2011a) Tři přírodní rozpadové řady ilustruje Obrázek 1.



Obrázek 1: Přírodní rozpadové řady (Ullmann, 2005a)

Obor, který se zabývá vlastnostmi ionizujícího záření a mechanismy jeho interakce s prostředím se nazývá dozimetrie. Abychom mohli adekvátně hodnotit mimořádné události v jaderné energetice, jaderném výzkumu, či při využívání zdrojů záření ve zdravotnictví, je nutné znát základní dozimetrické veličiny. Ty jsou uvedeny v následujícím textu.

Aktivita (A) vyjadřuje počet radioaktivních přeměn v látce za jednotku času. Měří se v becquerelech (Bq), avšak v praxi se používají spíše násobky této jednotky, například (kBq). Aktivita radionuklidu se v čase mění a naměřená hodnota nezohledňuje druh záření, jeho energii ani biologický účinek.

Absorbovaná dávka (D) určuje množství energie absorbované jednotkou hmotnosti ozařované látky. Měří v joulech na kilogram ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$), jednotkou je gray (Gy) a v praxi se používá naopak v dílčích jednotkách. Nezohledňuje typ záření ani druh absorbátoru.

Dávkový příkon značí poměr přírůstku dávky za jednotku času a vyjadřuje se v $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$.

Ekvivalentní dávka (H_T) již kromě obdržené dávky zahrnuje také rozdílný vliv konkrétního druhu záření na organismus a jeho rozdílnou energii. Přepočítává se za pomoci radiačního váhového faktoru W_R a její jednotkou je sievert (Sv). Platí, že dávka 1 Sv jakéhokoliv typu záření způsobí stejný biologický účinek jako dávka 1 Gy záření gama. Ekvivalentní dávka je vždy vztažena na konkrétní orgán.

Efektivní dávka (E) je součet ekvivalentních dávek v tkáních a orgánech v těle. Je vztažena na celý organismus a umožňuje vyjádřit jeho radiační zátěž jedinou číselnou hodnotou i při nerovnoměrném ozáření tkání. (Ullmann, 2005b)

1.2 Ionizující záření

Ionizující záření (IZ) vzniká během jaderných procesů. Částice nebo fotony uvolňované z jádra v důsledku přeměny mají schopnost ionizovat atomy prostředí nebo excitovat jejich jádra. Podle způsobu interakce s prostředím se dělí na přímo ionizující a nepřímo ionizující záření.

- **Přímo ionizující záření** - záření alfa a beta.
- **Nepřímo ionizující záření** - záření gama, rentgenové a neutronové.

Alfa záření vzniká zejména při rozpadu těžkých jader, například u uranu či transuranů. Jedná se o rychle letící jádra helia, jejichž dolet ve vzduchu činí několik centimetrů, v tkáních se pohybuje v desítkách nanometrů. K odstínění alfa záření postačí list papíru či oděv. Závažné ohrožení organismu nastává při vnitřní kontaminaci alfa částicemi, vzhledem k jejich vysoké ionizační schopnosti. (Kroupa, 2010)

Beta záření vzniká při přeměně neutronu na proton, elektron a antineutrino, při které je vyzářen elektron nebo pozitron. Částice beta jsou proti alfa částicím menší a lehčí a mají větší dolet, který ve vzduchu činí několik metrů a ve tkáních až 10 milimetrů. V závislosti na jejich energii, množství a době působení mohou způsobit různě závažné popáleniny a v organismu způsobují rychlé nekrotické změny tkáně. (Kroupa, 2010)

Gama záření doprovází radioaktivní přeměnu a přechod jádra z vyššího do nižšího energetického stavu. Většinou tedy vzniká jako doprovodný jev při alfa nebo beta rozpadu. Emituje fotony o velice krátké vlnové délce a nepřímo ionizuje prostředí. Je pronikavější, než záření alfa a beta a k jeho odstínění je zapotřebí použití materiálů s vysokým protonovým číslem, například olovo. Fotony jsou i ve tkáních schopné pronikat do značné hloubky. (Kolektiv autorů, 2011b)

Rentgenové záření je elektromagnetické záření o velice krátkých vlnových délkách. Vzniká v rentgenkách zbrzděním elektronů v těžkých kovech a dělí se na brzdné a charakteristické rentgenové záření. Vyznačuje se podobnými vlastnostmi jako gama záření. Je vysoce pronikavé a odstínit jej lze olovem. (Kolektiv autorů, 2011c)

Neutronové záření je proud pohybujících se neutronů, které se z jader uvolňují při jaderných reakcích. Neutrony nenesou elektrický náboj, interagují pouze s jádry atomů a mají vysokou pronikavost. Intenzivním zdrojem neutronového záření je zejména jaderný reaktor. K odstínění neutronů je zapotřebí volit materiály obsahující vodík (voda, parafin), které je zpomalí v kombinaci s vhodným absorbátorem, nejlépe bórem či kadmíem. (Ullmann, 2005c)

1.2.1 Ochrana před ionizujícím zářením

Cílem základních způsobů ochrany před IZ je co nejefektivnější snížení rizika vzniku deterministických a stochastických účinků. Dávkový ekvivalent ve tkáních a orgánech se odvíjí od intenzity, druhu a energie záření, délky expozice a prostředí mezi zdrojem a ozařovaným. Pro účinnou ochranu před zářením je na místě použít kombinaci tří základních způsobů, které jsou následující (Klener, 2000):

- 1) **Ochrana časem** - Absorbovaná dávka je přímo úměrná době expozice. Z toho vyplývá, že radiační zatížení ozařovaného roste s časem, po který je účinkům ionizujícího záření vystaven. Při mimořádných událostech je možné dosáhnout zkrácení doby v blízkosti zdroje záření střídáním pracovníků, kteří provádějí záchranné a likvidační práce.
- 2) **Ochrana vzdáleností** - Dávkový příkon klesá s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje záření. Pro snížení rizika je tedy nutné se od zářiče zdržovat co nejdále.
- 3) **Ochrana stíněním** - Ionizující záření je třeba absorbovat odpovídajícím materiálem dle druhu a energie záření.

1.2.2 Zdroje ionizujícího záření

Podle svého původu se zdroje IZ dělí na přírodní a umělé. Přírodními zdroji je člověk během svého života ozařován neustále. Téměř 90 % celkové radiační zátěže člověka žijícího na území ČR pochází pouze z přírodního pozadí. Kromě biogenních radionuklidů přítomných v organismu člověka jsme zatíženi zejména působením **radonu, kosmického a terestrálního záření**. (Ullmann, 2005d)

Umělé zdroje IZ se rozdělují do více kategorií, přičemž tou první a nejvýznamnější jsou **lékařské zdroje** záření. Tato kategorie se pak dále dělí na radiodiagnostické a radioterapeutické přístrojové výkony a využívání radionuklidů v rámci nukleární medicíny. (Ullmann, 2005d)

Další kategorií jsou **technické zdroje** záření jako například požární hlásiče, radioaktivní svítící hmoty či vakuové obrazovky.

Jako **jaderné zdroje** záření chápeme záření pocházející z průmyslového využívání radionuklidů. Jedná se zejména o jadernou energetiku a radioaktivní odpady, které v procesu výroby energie „z jádra“ vznikají a které je pak třeba bezpečně ukládat. Do této kategorie patří také kontaminace prostředí způsobená spadem po zkouškách jaderných zbraní, které byly legální až do roku 1963 a kontaminace v důsledku havárií jaderných reaktorů. (Ullmann, 2005d)

Zdroje pocházející z jaderně energetických zařízení jsou pro tuto práci důležité, a proto o nich bude blíže pojednáno v následujícím textu.

1.2.3 Ionizující záření v jaderné energetice

V primárním okruhu reaktoru během výroby energie probíhají procesy vedoucí ke vzniku radionuklidů. Štěpením paliva vznikají štěpné produkty. Aktivační produkty se tvoří v důsledku aktivace neutronů a to v palivu samém, chladiivu i konstrukčním materiálu. Obsah radionuklidů v reaktoru se nazývá inventář reaktoru a je neustále sledován a kontrolován, jelikož jeho složení (např. vysoká objemová aktivita jódu ^{133}I) může značit netěsnost paliva. Inventář reaktoru je závislý na typu paliva a také na stupni jeho vyhoření, přičemž obsah štěpných produktů mnohonásobně převyšuje obsah aktivačních produktů. Způsob uvolňování plynných radionuklidů z primárního okruhu se může lišit v závislosti na typu reaktoru, avšak u tlakovodních reaktorů, jimiž je opatřena elektrárna Temelín i Dukovany, jde o kontinuální proces z důvodu kontroly chemického složení. Radionuklidy se poté vypouští do ovzduší skrz filtrované, nízkoaktivní výpusti, jež jsou monitorovány v souladu s požadavky zákona č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření a o změně a doplnění některých zákonů. Obecně se do životního prostředí dostávají zejména následující produkty (Klener, 2000):

- **Vzácné plyny (zejména krypton ^{85}Kr , xenon ^{133}Xe a argon ^{41}Ar)** - Krypton a xenon se řadí mezi produkty vzešlé ze štěpení paliva, zatímco argon se do

primárního okruhu dostává jako nečistota dusíku. Tyto radioizotopy mají velice krátký poločas přeměny a většinou se stačí rozpadnout již v uhlovém zpoždovacím filtru.

- **Radioizotopy jódu (^{131}I a ^{133}I)** - Jedná se o štěpné produkty s poměrně krátkým poločasem přeměny. Obsah těchto radioizotopů ve výpustích se odvíjí od počtu netěsností v palivu.
- **Radioizotopy uhlíku (^{14}C)** - Vyvíjí se reakcí s kyslíkem v palivu a moderátoru a jako produkt ternárního štěpení.
- **Tritium (^3H)** - Je jediným radioizotopem vodíku, jenž není možné od radioaktivní vody oddělit. V tlakovodním reaktoru vzniká aktivací bóru a ternárním štěpením v palivu. Z elektrárny je vypouštěno skrz kapalně vypusti do vody.

Na tomto místě je nutné zmínit, že za běžného provozu je objem radionuklidů z výpustí jaderných elektráren naprosto zanedbatelný. Na radiační zátěži obyvatel žijících na území ČR se v porovnání s přírodními zdroji záření prakticky nepodílí.

1.4 Legislativa

Základním legislativním pramenem v oblasti jaderné bezpečnosti v České republice je již zmíněný zákon č. 18/1997 Sb. (atomový zákon). § 1 tohoto zákona upravuje:

- „způsob využívání jaderné energie a ionizujícího záření a podmínky vykonávání činností souvisejících s využíváním jaderné energie a činností vedoucích k ozáření,*
- system ochrany osob a životního prostředí před nežádoucími účinky ionizujícího záření,*
- povinnosti při přípravě a provádění zásahů vedoucích ke snížení přírodního ozáření a ozáření v důsledku radiačních nehod,*

- d) *zvláštní požadavky pro zajištění občanskoprávní odpovědnosti za škody v případě jaderných škod,*
- e) *podmínky zajištění bezpečného nakládání s radioaktivními odpady,*
- f) *výkon státní správy a dozoru při využívání jaderné energie, při činnostech vedoucích k ozáření a nad jadernými položkami.“*

Pro komplexní uvedení do problematiky jaderné bezpečnosti budou v této kapitole krátce zmíněny také další právní předpisy, které v oblasti jaderné bezpečnosti a radiační ochrany atomový zákon doplňují a které se tématu této práce bezprostředně dotýkají.

- **Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 106/1998 Sb.**, o zajištění jaderné bezpečnosti a radiační ochrany jaderných zařízení při jejich uvádění do provozu a při jejich provozu.
- **Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 144/1997 Sb.**, o fyzické ochraně jaderných materiálů a jaderných zařízení a o jejich zařazování do jednotlivých kategorií.
- **Vyhláška Státního úřadu pro jadernou č. 146/1997 Sb.**, kterou se stanoví činnosti, které mají bezprostřední vliv na jadernou bezpečnost, a činnosti zvláště důležité z hlediska radiační ochrany, požadavky na kvalifikaci a odbornou přípravu, způsob ověřování zvláštní odborné způsobilosti a udělování oprávnění vybraným pracovníkům a způsob provedení schvalované dokumentace pro povolení k přípravě vybraných pracovníků.
- **Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 195/1999 Sb.**, o požadavcích na jaderná zařízení k zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a havarijní připravenosti.
- **Vyhláška státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307/2002 Sb.**, o radiační ochraně. Vyhláška upravuje způsob a rozsah zajištění radiační ochrany při práci na pracovištích, kde se vykonávají radiační činnosti, stanovuje směrodatné limity ozáření a uvádí podrobnosti ke klasifikaci zdrojů ionizujícího záření.

- **Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 317/2002 Sb.**, o typovém schvalování obalových souborů pro přepravu, skladování a ukládání jaderných materiálů a radioaktivních látek, o typovém schvalování zdrojů ionizujícího záření a o přepravě jaderných materiálů a určených radioaktivních látek.
- **Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 318/2002 Sb.**, o podrobnostech k zajištění havarijní připravenosti jaderných zařízení a pracovišť se zdroji ionizujícího záření a o požadavcích na obsah vnitřního havarijního plánu a havarijního řádu.
- **Nařízení vlády č. 11/1999 Sb.**, o zóně havarijního plánování.

1.5 Jaderná bezpečnost a její orgány

Dle § 2 atomového zákona, je jaderná bezpečnost definována jako *„stav a schopnost jaderného zařízení a osob obsluhujících jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce nebo nedovolenému úniku radioaktivních látek nebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezovat následky nehod“*.

V širších souvislostech jde o schopnost zabezpečit za všech okolností tyto tři základní funkce (Matal, 2011):

- bezpečný průběh odstávky reaktoru při odstavení jaderného bloku;
- odvádění tepla z aktivní zóny reaktoru;
- nedovolení úniku nadlimitního množství radioaktivních látek a ionizujícího záření.

1.5.1 Státní úřad pro jadernou bezpečnost

Primárním orgánem pro účely státního dozoru při využívání jaderné energie a pro zabezpečení radiační ochrany je v České republice Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB). Byl založen v lednu roku 1993 se sídlem v Praze a v jeho čele stojí předseda,

který je volen vládními představiteli. (Matal, 2011) Působnost SÚJB vymezuje § 3 atomového zákona takto:

- a) *„vykonává státní dozor nad jadernou bezpečností, jadernými položkami, fyzickou ochranou, radiační ochranou, havarijní připraveností a technickou bezpečností vybraných zařízení a kontroluje dodržování povinností podle tohoto zákona,*
- b) *vykonává kontrolu nešíření jaderných zbraní a státní dozor nad jadernými položkami a fyzickou ochranou jaderných materiálů a jaderných zařízení,*
- c) *vydává povolení k výkonu činností podle tohoto zákona a typově schvaluje obalové soubory pro přepravu a skladování jaderných materiálů a radioaktivních látek,*
- d) *schvaluje dokumentaci, programy, seznamy, limity, podmínky, způsob zajištění fyzické ochrany, havarijní řády,*
- e) *stanovuje podmínky, požadavky, limity, mezní hodnoty, nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin, směrné hodnoty, optimalizační meze, referenční úrovně, diagnostické referenční úrovně, zprošťovací úrovně a uvolňovací úrovně,*
- f) *sleduje a posuzuje stav ozáření a usměrňuje ozáření osob,*
- g) *řídí činnost celostátní radiační monitorovací sítě,*
- h) *schvaluje zařazení jaderného zařízení nebo jeho částí a jaderných materiálů do příslušné kategorie z hlediska fyzické ochrany,*
- i) *zajišťuje mezinárodní spolupráci v oboru své působnosti, zejména je nositelem odborné spolupráce s Mezinárodní agenturou pro atomovou energii, a v oboru své působnosti poskytuje informace Evropské komisi,*
- j) *rozhoduje o zajištění nakládání s jadernými položkami, zdroji ionizujícího záření nebo s radioaktivními odpady, s nimiž je nakládáno v rozporu s právními předpisy, nebo kde není odstraňován vzniklý stav.“*

Pro účely státního dohledu nad radiační situací v České republice byla zprovozněna **celostátní radiační monitorovací síť**, která je soustavou měřících míst a technicky a personálně vybavených prostředků. V okolí jaderných elektráren má rozhodující význam v posouzení rozsahu vzniklé radiační události a stanovení prognózy a dalšího vývoje události. Radiační monitorovací síť se dělí na složky stálé, které jsou v nepřetržitém provozu, a složky pohotovostní, které se uvádějí v činnost až v návaznosti na vznik radiační události. Společně se státním úřadem pro jadernou bezpečnost se na provádění monitoringu podílejí provozovatelé jaderných elektráren, ministerstva, popřípadě další smluvní osoby. (Mika, 2010)

1.5.2 Mezinárodní agentura pro atomovou energii

Nadnárodní dohled nad jadernou bezpečností a mírovým využíváním jaderné energie plní International Atomic Energy Agency (IAEA), čili Mezinárodní agentura pro atomovou energii. Podle návrhu Organizace spojených národů byla jako nezávislá organizace založena v červenci roku 1957. Sídli ve Vídni a další regionální kanceláře se nachází v Ženevě, New Yorku, Torontu a Tokiu. (IAEA, 1998) V současné době sdružuje 167 členských států, jež se zavázaly dodržovat její stanovy. Bývalé Československo je členem od jejího založení roku 1957 a Česká republika jako samostatný stát od roku 1993. (IAEA, 2016)

S jadernou bezpečností bezprostředně souvisí **radiační ochrana**, jež znamená systém organizačních a také technických opatření zamezující nepřijatelnému ozáření osob a životního prostředí. Kromě ochrany obyvatel před riziky souvisejícími s využíváním jaderného paliva řeší radiační ochrana také bezpečnou aplikaci IZ ve zdravotnictví. V České republice zabezpečuje radiační ochranu Státní ústav radiační ochrany (SÚRO) při SÚJB a celosvětově tuto problematiku řeší International commission on radiological protection (ICRP), čili Mezinárodní komise radiologické ochrany. Ačkoliv je využívání jaderné energie velice výhodné a efektivní, přináší s sebou i nezanedbatelné riziko zdravotní újmy. Celá koncepce radiační ochrany se proto opírá o tyto základní principy:

- **Princip zdůvodnění**, což znamená, že využívání IZ musí vždy vést k dostatečnému čistému přínosu pro společnost. (SÚRO, 2000)
- **Princip optimalizace ochrany** znamená snahu zachovat stupeň ozáření na co nejnižší hodnotě. Toho musí být dosaženo při současném udržení ekonomičnosti, vzhledem k nákladům vynaloženým na zvyšování ochrany, podle rovnice

$$B = V - (P + X + Y),$$

kde B je čistý přínos, V hrubý přínos, P jsou náklady výroby či činnosti, X jsou vyčleněné náklady na ochranu a Y je újma s činností spojená. Princip optimalizace ochrany je ztotožňován s principem **ALARA** (As low as reasonably achievable – „tak nízké, jak je rozumně dosažitelné“), který vychází z doporučení ICRP 103 vydaného Mezinárodní komisí radiologické ochrany. Doporučení uvedená v této publikaci se postupně integrují do zákonů všech států Evropské unie. (Matal, 2011)

- **Princip dodržení limitů individuálních dávek**, který znamená, že nikdo nesmí být vystaven nepřijatelnému ohrožení a stanovuje garanci maximálního přijatelného obecného rizika vzniku stochastických účinků z důvodu ozáření. (SÚRO, 2000)
- **Princip bezpečnosti zdrojů**, který si klade za cíl snížení pravděpodobnosti vzniku sledu událostí, jež by mohly způsobit nebo zvýšit míru ozáření. Tím je myšleno zejména udržení spolehlivosti operačních systémů a pracovních postupů. (Kuna et. al. 2005)

1.6 Havarijní připravenost

Havarijní připravenost definuje § 2 atomového zákona jako „*schopnost rozpoznat vznik radiační mimořádné situace a při jejím vzniku plnit opatření stanovená havarijními plány*“.

Stěžejním dokumentem havarijní připravenosti jsou havarijní plány, což jsou soubory plánovaných činností a opatření pro případ vzniku mimořádné události (MU).

- **Vnitřní havarijní plán** zpracovává držitel povolení k provozu jaderného zařízení pro použití pro vnitřní prostory pracoviště. Kromě základních údajů o žadateli povolení, rozsahu činnosti a místě provozování obsahuje podrobnou analýzu možných MU, včetně posouzení jejich závažnosti. Dále obsahuje způsoby vyhlášení MU, způsoby omezení ozáření zaměstnanců a dalších osob, zásahové postupy, způsoby ověřování havarijní připravenosti a další náležitosti. Vnitřní havarijní plán schvaluje SÚJB a prochází revizí minimálně jednou za 3 roky. Všichni zaměstnanci zařízení s ním musí být prokazatelně seznámeni. (Vyhláška č. 318/2002 Sb., 2002)
- **Vnější havarijní plán** pro jaderná zařízení se zpracovává v souladu s vyhláškou č. 328/2001 Sb., o některých podrobnostech zabezpečení integrovaného záchranného systému. Stanovuje postupy a činnosti prováděné v případě havárie, jenž rozsahem přesahuje objekt zařízení a vymezuje tzv. zónu havarijního plánování. Klade si za úkol rychlé řešení vzniklé MU a minimalizaci následků s důrazem na ochranu obyvatel a životního prostředí. Dokument zpracovává Hasičský záchranný sbor kraje na základě podkladů poskytnutých žadatelem o povolení k provozu činnosti. Obsahuje část informační, část operativní a plány konkrétních činností. Havarijní připravenost podle vnějšího havarijního plánu se cvičením prověřuje každé 3 roky. (Vyhláška č. 328/2001 Sb., 2001)
- **Zóna havarijního plánování** se vymezuje v oblasti kolem jaderného zařízení na základě nařízení vlády č. 11/1999 Sb., o zóně havarijního plánování. V této oblasti se budou v případě MU realizovat ochranná opatření stanovená vnějším havarijním plánem zařízení. (Nařízení vlády č.11/1999 Sb., 1999)

1.7 Mimořádné události spojené s únikem radioaktivních látek

Mimořádnou událostí je v tomto případě myšlena událost důležitá z hlediska jaderné bezpečnosti nebo radiační ochrany, která vede nebo může vést k nepřijatelnému ozáření zaměstnanců, popřípadě dalších osob nebo k nepřijatelnému uvolnění radioaktivních látek

nebo IZ do prostor jaderného zařízení nebo pracoviště nebo do životního prostředí. (Vyhláška č. 307/2002 Sb., 2002)

Podle § 5 vyhlášky číslo 318/2002 Sb. klasifikujeme MU třemi stupni podle svého rozsahu a závažnosti takto:

- **Mimořádná událost 1. stupně** může vést k nepřipustnému ozáření zaměstnanců nebo nepřipustnému uvolnění radioaktivních látek do prostor jaderného zařízení nebo pracoviště. Vyznačuje se jen lokálním rozsahem a pro její řešení postačují síly a prostředky přítomné směny provozu. Provozovatel jaderného zařízení je ze zákona povinen ohlásit SÚJB vznik MU 1. stupně nejpozději do 24 hodin od doby jejího zjištění.
- **Mimořádná událost 2. stupně** vede nebo může vést k závažnému ozáření zaměstnanců nebo k nepřipustnému uvolnění radioaktivních látek do životního prostředí. Představuje zvýšené radiační riziko vně zařízení, avšak ještě nevyžaduje zavádění neodkladných ochranných opatření. Na jejím odvrácení se podílí zasahující osoby držitele povolení a v případě potřeby další síly a prostředky smluvně zajištěné. Provozovatel jaderného zařízení oznámí MU 2. stupně SÚJB a dotčenému úřadu obce s rozšířenou působností nejpozději do 4 hodin.
- **Mimořádná událost 3. stupně** vede nebo může vést k závažnému uvolnění radioaktivních látek do životního prostředí. Zavádí se neodkladná ochranná opatření a při jejím řešení se postupuje podle vnějšího havarijního plánu. Na likvidaci spolupracují zasahující osoby držitele povolení a další osoby dle HP s veškerými dotčenými orgány. Provozovatel vyrozumí o vzniku MU 3. stupně neprodleně veškeré orgány stanovené HP.

Jako mimořádná událost je označován stav ztráty kontroly nad zářením vedoucí k riziku zvýšené expozice zaměstnanců jaderného zařízení. Pokud k nadlimitnímu ozáření zaměstnanců skutečně dojde, stává se tato událost **radiační nehodou**. V případě úniku radioaktivních látek mimo jaderné zařízení a v takovém rozsahu, kdy je nutné

přistoupit k zavádění opatření na ochranu obyvatelstva a životního prostředí, mluvíme již o **radiační havárii**. (Zákon č. 18/1997 Sb., 1997)

1.7.1 Havárie

Průběh havárie se zpravidla rozděluje do 3 fází, z nichž každá má svá specifika a každá z nich vyžaduje zvláštní opatření. Kroupa (2010) rozděluje fáze takto:

- 1. Předúniková fáze** je doba, kdy obsluha jaderného zařízení již předpokládá, že je havárie pravděpodobně nevyhnutelná. Rozsah potenciálního úniku radioaktivních látek do ovzduší se v tuto chvíli dá zatím jen odhadovat podle dosavadního vývoje situace. Management jaderného zařízení (JZ) však v tuto chvíli dle prognózy dalšího vývoje událostí musí rozhodnout o nutnosti zavedení ochranných opatření. V případě dostatečné časové rezervy do doby skutečného úniku se může jednat ještě o opatření preventivní. Doba trvání předúnikové fáze se pohybuje v řádu několika hodin až několika dnů.
- 2. Úniková fáze** je období, kdy dochází k unikání radioaktivních látek do ovzduší. Díky neustálému monitorování výpustí ventilačních komínů a dávkových příkonů v okolí elektrárny jsou brzy známy údaje o závažnosti úniku. Probíhají neodkladná opatření k ochraně obyvatelstva a životního prostředí, přičemž nebezpečí v této fázi představuje zejména riziko zevního ozáření z radioaktivního oblaku a vnitřní kontaminace inhalovanými radionuklidy. Úniková fáze může trvat několik hodin - krátkodobý únik, či v horším případě několik dnů - dlouhodobý únik.
- 3. Poúniková fáze** je období následných ochranných opatření. Jsou již dostupné celistvé údaje o kontaminaci okolí havarovaného JZ. Největší riziko pro osoby nacházející se v zamořené oblasti v poúnikové fázi havárie spočívá v ingestci radionuklidů v důsledku kontaminace vody a půdy.

Radioaktivním únikem je únik látek z jaderného reaktoru. Může nastat například při porušení primárního okruhu a následnou ztrátou chladiva. V důsledku neustálého vývinu zbytkového tepla v aktivní zóně pak může dojít k porušení hermetičnosti paliva či dokonce k jeho tavení. Radioaktivní látky se tímto způsobem dostanou do hermetického obalu reaktoru a v případě narušení dalších bezpečnostních bariér i do okolí. Nebezpečné látky se v ovzduší dále šíří v závislosti na výšce jejich úniku, výšce jejich tepelného vznosu, sedimentační rychlosti radioaktivních částic a meteorologických podmínkách. (Kroupa, 2010)

Radioaktivní zamoření tvoří směs štěpných produktů, nezreagované jaderné palivo, nově vznikající štěpný materiál a radioaktivní korozní produkty. Radioaktivní kontaminace emituje záření alfa, beta i gama v různém energetickém spektru. Osoby pobývající v kontaminovaném území jsou proto vystaveny jednak nebezpečí celotělového vnějšího ozáření (zejména v důsledku působení gama záření) ale také vnitřní kontaminace radionuklidy. Zamoření způsobené havárií jaderně energetického zařízení bude obsahovat tyto nejvýznamnější radioaktivní izotopy: cesium ^{137}Cs , stroncium ^{90}Sr a jód ^{131}I . V menší míře v něm nalezneme také radioaktivní vzácné plyny. (Mika, 2003)

1.8 Vliv havárií na zdraví člověka

Následující text vysvětluje mechanismus interakce uniklých radioaktivních látek s organismem člověka. Popisuje zevní ozáření a kontaminaci, způsoby jakými může ke kontaminaci dojít a také zdravotní následky, které z ní plynou.

Zevní ozáření charakterizuje § 2 vyhlášky č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně jako ozáření člověka zdroji IZ, které se nachází mimo něj.

Vnější kontaminaci rozumíme přítomnost radionuklidů na povrchu těla či objektu. Radionuklidy nacházející se na nechráněné kůži mohou podle své povahy vést k vysokým dávkám záření a popáleninám. V určitých případech mohou zapříčinit i vnitřní kontaminaci organismu. (Kuna et. al, 2005)

Vnitřní kontaminace nastává v případě, kdy se radionuklid dostane do organismu. Cesty vstupu radionuklidu jsou (Kuna et. al, 2005):

- ingesce;
- inhalace;
- penetrace kůže;
- aplikace radiofarmaka.

Chování radionuklidu v organismu se odvíjí od jeho chemických vlastností. Po vniknutí do těla dochází k distribuci radioaktivní látky v cílových orgánech. Postupně je metabolizována a vyloučena ven z těla. (Kuna et. al, 2005) Některé radionuklidy se však mohou dlouhodobě fixovat v určitých orgánech a jejich vyvázání je velice obtížné. Typickým takovým příkladem je stroncium ^{90}Sr , které se usazuje v kostech nebo jód ^{131}I , jenž se trvale váže ve štítné žláze. Radioizotopy cesia ^{137}Cs a stroncia ^{90}Sr , se kromě schopnosti kumulace v těle vyznačují také velice dlouhým poločasem přeměny, jak dokládá Tabulka 1. Tkáně jsou pak radionuklidem dlouhodobě ozařovány až do okamžiku, kdy nedojde k jeho úplnému rozpadu. (Mika, 2003)

Tabulka 1: Distribuce a poločas přeměny ^{131}I , ^{90}Sr a ^{137}Cs (Mika, 2003)

Radioaktivní látka	Afinita	Poločas přeměny
^{131}I	Štítná žláza	8 dní
^{90}Sr	Kosti	29 let
^{137}Cs	Celé tělo	33 let

Ať již je člověk vystaven vnějšímu ozáření gama fotony, či ozáření vznikne v důsledku kontaminace organismu radionuklidy, může se to na jeho zdravotním stavu nepříznivě projevit vznikem deterministických či stochastických poškození.

Deterministické účinky záření se projeví vždy po překročení prahové dávky. Poškození je úměrné dávce záření a vzniká po vysokých, nejčastěji jednorázových dávkách. Nejnižší prahovou dávkou pro vznik poškození deterministického charakteru je 0,15 Gy. Příklady deterministických účinků vzniklých v důsledku ozáření jsou (SÚJB, 2012):

- akutní nemoc z ozáření;
- akutní lokální změny;
- poškození plodu v těle matky;
- chronická nenádorová poškození;
- poškození fertility.

Různé části lidského organismu se vyznačují rozdílnou citlivostí vůči IZ. Tím vykazují svoji radiosenzitivitu, případně radiorezistenci. Příklad rozdílných prahových dávek pro jednotlivé orgány a tkáně, po kterých vždy dojde k rozvoji deterministických účinků je v Tabulce 2.

Tabulka 2: Radiosenzitivita orgánů (Österreicher, 2003)

Orgán	Projev poškození	Absorbovaná dávka
Varle	Aspermie	0,2 Gy
Kostní dřeň	Útlum krvetvorby	0,7 Gy
Oční čočka	Katarakta	2 Gy
Kůže	Dermatitida	3 Gy
Střevo	Enteritida	8 Gy
Plíce	Pneumotitida	8 Gy
Centrální nervový systém	Afunkce	80 Gy

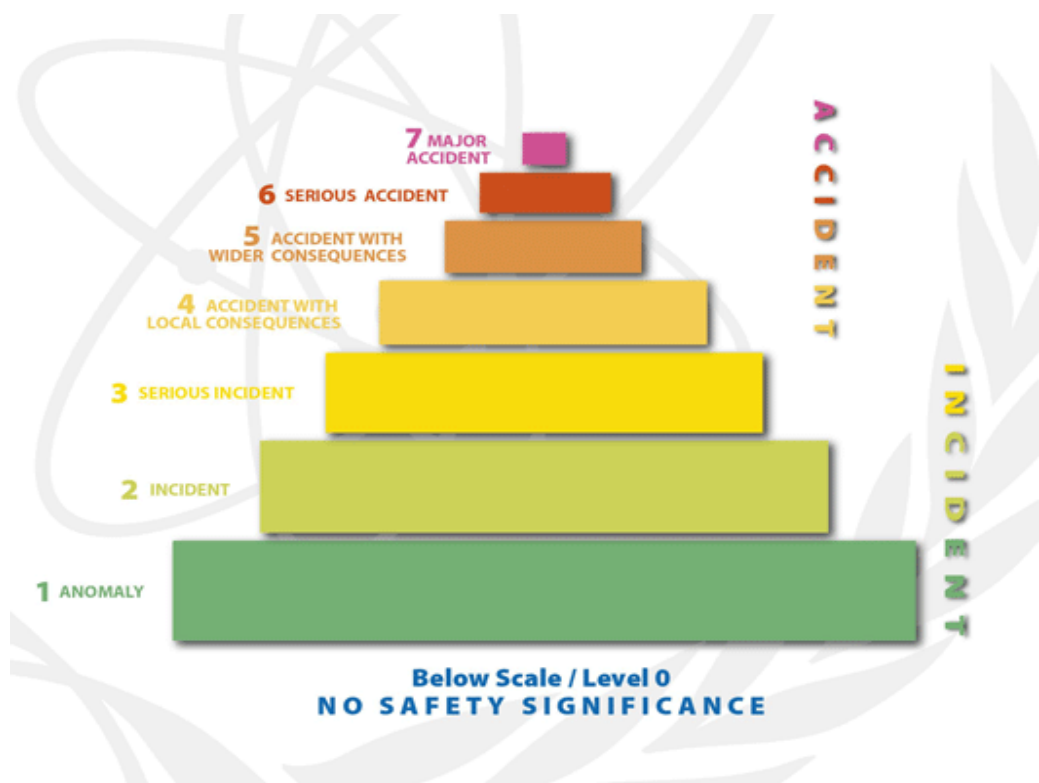
Stochastické účinky se mohou projevit již při malých dávkách, přičemž charakter poškození bývá individuální. Zářením buňky neusmrtí, ale poruší jejich genetickou informaci. Ke změnám dochází až po různě dlouhé době latence, která může být i v řádu desítek let. Do stochastických účinků záření patří (SÚJB, 2012):

- zhoubné nádory;
- leukémie;
- genetické mutace příštích generací.

Pro stochastické účinky je předpokládán bezprahový stav mezi dávkou a účinkem. S rostoucí dávkou tedy vzrůstá pouze pravděpodobnost vzniku poškození, zatímco v případě deterministických účinků rostoucí dávka zvyšuje závažnost již vzniklé zdravotní újmy.

1.9 Mezinárodní stupnice jaderných událostí

Pro posuzování závažnosti jaderných a radiačních nehod a havárií byla v roce 1990 odborníky z IAEA ve spolupráci s Agenturou pro jadernou energii vytvořena stupnice INES (The International Nuclear Event Scale, Obrázek 2) Stupnice umožňuje rychlé a přesné ohodnocení těchto událostí, čímž poskytuje adekvátní informace veřejnosti. Byla navržena s cílem celosvětového sjednocení hodnocení jaderných událostí a předlohou jí byly obdobné stupnice využívané dříve ve Francii a Japonsku. Jejím primárním účelem bylo v počátku pouze hodnocení nehod a havárií jaderných elektráren. Od jejího rozšíření v roce 1992 je plně využitelná ve všech průmyslových civilních zařízeních využívajících IZ. (IAEA, 2013)



Obrázek 2: Stupnice INES (IAEA, ©1998)

1.9.1 Charakteristika stupnice INES

Škála stupnice zahrnuje 7 stupňů závažnosti události. S rostoucím bezpečnostním rizikem události stoupá také stupeň jejího ohodnocení. Události stupně 0 jsou odchylky od běžného stavu a nemají žádné bezpečnostní riziko. Nižší stupně 1 až 3 jsou označeny jako incidenty, čili nehody. Stupně 4 až 7 jsou havárie. Posuzování závažnosti je založeno na 3 kritériích oblasti dopadu jaderné události a jejích účincích, které jsou (Kroupa, 2005):

- 1) **Obyvatelstvo a životní prostředí** - Kritérium hodnotí dopad na životní prostředí, jež je odvozen od množství uniklých radioaktivních látek mimo jaderné zařízení.
- 2) **Zařízení a prostředí jaderné elektrárny** - Posuzuje se především stav aktivní zóny jaderného reaktoru a radiační situace uvnitř elektrárny včetně ozáření pracovníků.

- 3) **Narušení hloubkové ochrany jaderného zařízení** - Kritérium se používá pro události narušující soustavu bezpečnostních systémů zařízení.

Události v jaderných zařízeních se vyhodnocují podle míry škod na technickém zařízení, podle závažnosti úniku nebezpečných látek (nebo míry rizika úniku) a také podle opatření, která je zapotřebí v odpovědi na situaci učinit. Níže je uvedena stručná charakteristika jednotlivých stupňů podle IAEA (2013), včetně příkladu takové události ke každému z nich.

Stupeň 1 - Anomálie: Drobné nedostatky bezpečnostních komponentů. Hloubková ochrana zůstává zachována.

Stupeň 2 - Nehoda: Významné selhání bezpečnostních opatření. Ozáření obyvatele více než 10 mSv a/nebo ozáření pracovníka přesahující stanovený roční limit (např. Atucha 2005).

Stupeň 3 - Závažná nehoda: Ozáření více než desetinásobkem ročního limitu pro pracovníky. Mohou vzniknout non-letální deterministické účinky, jako třeba popáleniny. Jedná se o téměř havarijní stav (např. Vandellos 1989).

Stupeň 4 - Havárie s lokálními účinky: Malý únik radioaktivního materiálu. Není nutná aplikace jiných plánovaných opatření podle havarijního plánu kromě kontroly jídla. Minimálně jedno úmrtí zapříčiněné radiací (např. Tokaimura 1999, Saint-Laurent 1980).

Stupeň 5 - Havárie s účinky na okolí: Omezený únik radioaktivního materiálu. Pravděpodobná bude aplikace plánovaných opatření podle havarijního plánu. Možnost několika úmrtí zapříčiněných radiací (Windscale 1957, Three Mile Island 1979).

Stupeň 6 - Těžká havárie: Velký únik radioaktivního materiálu. Je nutná úplná aplikace plánovaných opatření podle havarijního plánu (Majak, 1957).

Stupeň 7 - Velmi těžká havárie: Závažný únik radioaktivního materiálu s rozsáhlými negativními účinky na zdraví obyvatel a na životní prostředí. Nutné zavedení dlouhodobých nápravných opatření (Černobyl 1986, Fukušima 2011).

2 VÝZKUMNÁ OTÁZKA A METODIKA

2.1 Výzkumná otázka

Je nejčastější příčinou havárie na jaderných zařízeních selhání lidského faktoru?

2.2 Metodika

Vypracování přehledu závažných havárií na jaderných zařízeních předcházelo důkladné studium různých literárních pramenů, odborných článků a internetových zdrojů za účelem pochopení problematiky, sjednocení uvedených informací a odhalení případných nesrovnalostí.

Za pomoci uspořádaných vybraných pramenů byl poté vypracován přehled havárií a jednotlivé události byly seřazeny sestupně dle stupně závažnosti podle INES.

V závislosti na dostupnosti informací byl u jednotlivých havárií popsán jejich podrobný časový průběh se zaměřením na příčinný řetězec událostí, které k havárii vedly. Ke každému jadernému zařízení byly doplněny určité geograficko-historické informace a k haváriím, kde došlo k poškození jaderného reaktoru, byl vypracován i popis konkrétního typu reaktoru. Aby mohl přehled podat čtenáři ucelený a kompletní obraz o rozsahu jednotlivých událostí, byly k haváriím popsány i následky, které vznikly na zařízení, životním prostředí, zasahujících osobách a na obyvatelstvu (pokud takové vznikly).

V závěrečné části výzkumu byla vytvořena tabulka, která stručně shrnuje příčiny a důsledky jednotlivých havárií. Následující diskuze je věnována analýze příčin jednotlivých havárií a jejich vzájemné komparaci s cílem nalezení případných shodných znaků.

3 VÝSLEDKY

Následující strany poskytují podrobný popis všech závažných havárií na jaderných zařízeních, což jsou podle stupnice INES havárie v rozmezí stupňů 5 až 7. Celkem se jedná o sedm případů s velice širokým časovým rozmezím. Nejstarší kyštymská havárie se stala již v prvopočátcích jaderného průmyslu, ačkoliv byla oficiálně přiznána až po 30 letech. Poslední havárie se stala v JE Fukušima na jaře roku 2011.

3.1 Havárie sedmého stupně

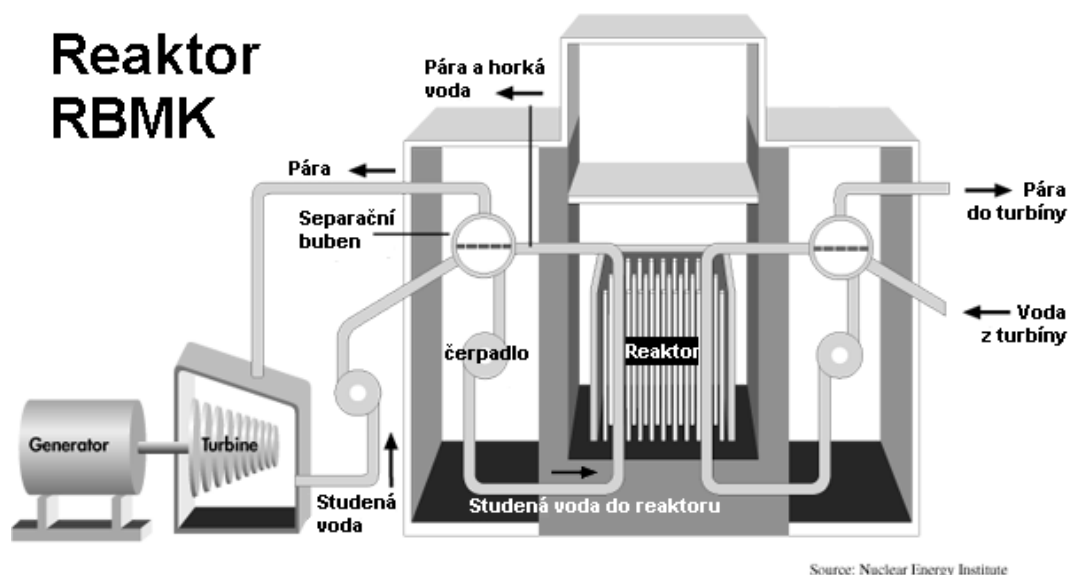
Ve světě byly v minulosti zdokumentovány již dva případy havárie nejvyššího sedmého stupně. První se stala v roce 1986 v černobylské elektrárně na území dnešní Ukrajiny. Druhá havárie se odehrála v japonské elektrárně Fukušima v roce 2011.

3.1.1 Černobyl

Výstavba sovětské jaderné elektrárny V. I. Lenina byla zahájena v květnu roku 1970 poblíž města Černobyl na území dnešní Ukrajiny, 100 km od Kyjeva. Její bloky byly uváděny do provozu postupně v letech 1977-1983, přičemž poslední zůstal nedokončený. Současně s výstavbou JE bylo v těsném kontaktu budováno také město Pripjať, jakožto moderní místo k životu, určené pro rodiny pracovníků elektrárny. Od elektrárny bylo město vzdáleno pouhé 3 km. (MacGregor, 2008)

Všechny čtyři bloky JE Černobyl byly opatřeny reaktorem RBMK (Obrázek 3) a celkový výkon elektrárny činil 4000 MW. Reaktor RBMK (reaktor bolšoj moščnosti kanalnyj) navrhli sovětské inženýři za účelem produkce elektrické energie a současně plutonia ^{239}Pu pro vojenské účely. Do dnešního dne je tento typ reaktoru využíván výhradně na území bývalého SSSR, přičemž první reaktor RBMK byl spuštěn již v roce 1948. Jedná se o grafitem moderovaný a vodou chlazený lehkovodní reaktor, využívající obohacený uran ^{238}U ve formě oxidu. (Lederman, 1996) Zirkoniem obalené palivové články jsou ve formě tyčí zasazeny v jednotlivých kanálcích a obklopeny grafitovým moderátorem. Voda pumpovaná zespolu do aktivní zóny je za vysokého tlaku ohřívána na přibližně 290 °C. Produkt je poté veden do dvou separačních bubnů. Oddělená pára

odtud pokračuje do dvou 500 MW turbín, které roztáčí, a zbylá voda se vrací zpět do reaktoru. Pro dodatečnou kontrolu rychlosti štěpné reakce je reaktor vybaven bórovými tyčemi schopnými pohlcovat neutrony. Kontrolní tyče se ovládají manuálně z řídicí místnosti či automaticky při zaznamenané odchylce. (WNA, 2010) Reaktor disponuje též systémem havarijního chlazení ECCS (Emergency core cooling system) sestávajícího ze samostatné vodní nádrže, hydraulického akumulátoru a čerpadel. Čerpadla ECCS jsou v případě naprosté ztráty energie poháněny výkonem rotoru turbogenerátoru až do doby, kdy funkci převzou diesellové agregáty. (Lederman, 1996)



Obrázek 3: Schéma reaktoru RBMK (Pavřda, 2005a)

Havárie

Na počátku největší jaderné havárie v dějinách byl příkaz hlavního inženýra elektrárny Nikolaje Fomina k provedení „zkoušky turbogenerátoru č. 8 černobylské AES v režimu současného výběhu se zátěží provozních potřeb“. (Pavřda, 2005b) Cı́lem bezpečnostního testu bylo zjistit, zda je turbogenerátor v případě výpadku energie schopný setřvačností zajistit dostatek výkonu alespoň po dobu 40 vteřin, než funkci

naplno převezmou nouzové dieselové agregáty. Měl proběhnout na nejnovějším 4. reaktoru.

Následující stránky poskytují podrobný popis činnosti operátorů v řídicí místnosti čtvrtého bloku elektrárny. Sleduje sled událostí od začátku zkoušky, přes průběh havárie, až po likvidaci tragických následků. Uvedené časové údaje až do okamžiku havárie jsou vypsané podle záznamů diagnostického záznamového softwaru DREG, instalovaného v černobylské JE.

Den první - 25. dubna 1986

01:06 Pro účely testu je zapotřebí, aby reaktor byl na 25-30 % svého tepelného výkonu. Pomalé snižování začíná přibližně hodinu po půlnoci. (SÚJB, 1996)

13:00 Po 12 hodinách dosáhl reaktor snížení tepelného výkonu na 50 % (1 600 MW). Operátoři nyní mohou vypnout jednu ze dvou turbín. Zároveň vyřazují z provozu havarijní systém ECCS, aby nemohl zasáhnout a zmařit tak probíhající test.

14:00 Na žádost dispečinku Ukrajinských energetických závodů o přerušení zkoušky je vydán příkaz k jejímu odkladu. Čtvrtý reaktor nadále pracuje při polovičním výkonu a s vypnutým ECCS, ačkoliv je to proti předpisům. Bez tohoto zdržení by zkouška proběhla dle plánu během denní směny. (WNA, 2009)

16:00 Nastupuje odpolední směna, která byla seznámena s veškerými náležitostmi zkoušky. Ta je však pozastavena. (Kostka, 2001)

23:10 Operátoři po 9 hodinách mohou začít s dalším snižováním výkonu reaktoru.

Den druhý - 26. dubna

00:00 Tepelný výkon je v tuto chvíli na hodnotě 700 MW a přichází střídání směn. Reaktor čtvrtého bloku mají nyní ve svých rukách muži, jež nebyli na takový test připraveni. V řídicí místnosti jsou přítomni **Anatolij Djatlov** (zástupce hlavního inženýra JE), **Alexandr Akimov** (vedoucí operátor čtvrtého bloku), **Leonid Toptunov** (starší

inženýr odpovědný za řízení reaktoru a regulaci výkonu) a **Boris Stoljarčuk** (vrchní inženýr regulační jednotky).

00:31 Při výkonu 500 MW operátoři namítají, že se již dostali pod dovolený limit výkonu. Zástupce hlavního inženýra Djatlov přikazuje další snižování na 200 MW.

00:38 Reaktor utrpěl prudký pokles tepelného výkonu na 30 MW. To mohlo být způsobeno vinou operátora, který nevydal příkaz k udržení výkonu na konstantní hodnotě, nebo též systémem, který v tomto úkolu selhal. (Ryzí, 2012) Při tak nízkém tepelném výkonu dochází v aktivní zóně k masivnímu zvýšení koncentrace xenonu ^{135}Xe (xenon se tvoří jako zbytkový produkt jódu ^{135}I a vyznačuje se vysokou schopností absorbovat neutrony, čímž prakticky „otravuje“ štěpnou reakci). (Pinchuk, 2014). V takové situaci mělo dojít k okamžitému odstavení reaktoru, Djatlov však nařídil vytažení regulačních tyčí z aktivní zóny za účelem opětovného získání výkonu. Ten se však z důvodu xenonové otravy zvýšil o pouhých 7 %. Přes značnou nevoli operátorů Toptunova a Akimova jsou vytaženy další regulační tyče a v aktivní zóně jich zůstává 6 z celkového počtu 211. (OECD-NEA, 2002)

01:10 Stav reaktoru vykazuje stabilních 200 MW tepelného výkonu. Poplašný signál značící nebezpečně nízkou hladinu vody v bubnech separátoru je vypnut a ignorován. Havarijní odstavení reaktoru je zablokováno.

01:22 Inženýr regulační jednotky Stoljarčuk zapíná dvě záložní čerpadla vody pro zajištění dostatečného chlazení po skončení zkoušky, což má za následek nárůst páry a tlaku v aktivní zóně.

01:23:35 I přes značně nestabilní stav reaktoru nyní začíná samotný test. Operátor uzavírá přívod páry na turbínu a následně se odstavují 4 z 8 cirkulačních čerpadel. Automatický havarijní systém by v této fázi reaktor ještě stále mohl odstavit, byl však úmyslně odpojen. Snížený průtok chladiva způsobuje vznik dutin (parních bublinek), což má za následek prudké zvýšení reaktivity za současné produkce páry, tepla a tlaku. Xenon je v této fázi již vypálen a množství neutronů stoupá. (Pinchuk, 2014) Obrovský tlak v aktivní zóně reaktoru začíná nadzvedávat 350 kg vážící uzávěry palivových tyčí. Tepelný výkon dosahuje 1 600 MW. (Ryzí, 2012)

01:23:40 Obsluha je kritickou situací přinucena stisknout záchranné tlačítko AZ-5, které má zajistit opětovné zasunutí všech regulačních tyčí. Špičky bórových tyčí jsou však vyrobeny z grafitu, který při vsunutí nárůst výkonu ještě podpořil. Tento fakt nepředstavuje v běžných provozních podmínkách reaktoru žádné bezpečnostní riziko. Čtvrtý reaktor černobylské JE se ale nacházel v takovém stavu, že to pro něj znamenalo v podstatě poslední ránu. Vlivem tepla navíc došlo k deformaci palivových kanálů a některé tyče se nemohly dostat do požadované polohy. (Pinchuk, 2014)

01:24 Tlak v trubkách trhá potrubí. Následná exploze páry nadzvedne 1 000 t těžké ocelové víko reaktoru, zničí střechu reaktorové budovy a radioaktivní látky začínají unikat do atmosféry. Do aktivní zóny nyní vniká vzduch, kde za dostatečné koncentrace kyslíku vzplane grafit. Zirkoniový potah palivových tyčí reaguje s párou, která se rozkládá na kyslík a vodík. Druhá (vodíková) exploze rozmetá 700 t hořícího grafitu po okolí. Trosky vyvržené z reaktoru dopadají na střechu třetího reaktorového sálu a zapalují střechu turbínové haly. (Porkát, 2011) První obětí černobylské havárie byl operátor cirkulačních čerpadel Valerij Choděmčuk, jenž zahynul v okamžiku výbuchu. Jeho tělo nebylo nikdy vyproštěno.

01:26 Požární poplach uvádí v pohotovost podnikovou hasičskou jednotku. Bojují s plameny na střeše elektrárny bez odpovídající ochrany nebo dozimetrů. Operátoři ve své nevědomosti o rozsahu havárie stále podnikají pokusy o stabilizaci situace. Posílají například pracovníky do turbínové haly ručně otevírat uzávěry chladících čerpadel, jiné zase posílají do centrální haly otočit rukojeti systému pro manuální spouštění zaseklých kontrolních tyčí. Muži, kteří vstoupili do reaktorového sálu, viděli zkázu na vlastní oči. Víko reaktoru bylo odklopené a nakřivo zaseknuté v šachtě reaktoru, z otvoru šlehal oheň. I přes tato opakovaná svědectví pracovníků trval inženýr Djatlov na tom, že je reaktor neporušený.

02:30 Ředitel elektrárny Brjuchanov přijíždí do podzemního bunkru pod administrativní budovou JE. (Paul, 2013) Telefonem informuje Moskvu o hodnotě radiace naměřené přístroji v řídicím sálu JE, která činí 3,6 rem (dřívější jednotka ekvivalentní dávky), přestože věděl, že to byla nejvyšší možná hodnota, kterou tyto

přístroje dokázaly zaznamenat. Skutečná hodnota byla 15 000 rem, čili zhruba 150 Sv! I on byl stále přesvědčený, že reaktor je v pořádku. (Kostka, 2001)

06:35 Veškerý oheň kromě požáru samotného reaktoru je uhašen. V průběhu noci na místo havárie postupně dorazily hasičské posily z Pripjati, Černobylu, Polesskoe a Kyjeva. Až do rána s ohněm bojovalo 37 jednotek o celkovém počtu 186 mužů. Mnozí z nich v následujících týdnech a měsících zemřeli na následky ozáření, stejně tak jako množství pracovníků elektrárny. (Paul, 2013) První záběry zničeného bloku (Obrázek 4) dokládají závažnost situace.



Obrázek 4: Letecký pohled na havarovaný 4. reaktor (Orlove, 2014 /© Kostin, 1986)

Později toho dne byl v důsledku havárie ustanoven vládní výbor v čele s akademikem V. Legasovem, uznávaným fyzikem. V odpoledních hodinách se uskutečnila také první letecká obhlídka reaktoru, který stále hořel. Obyvatelé města Pripjat', kteří byli stále ponecháni v nevědomosti, strávili celou slunečnou sobotu venku. Nikdo je neinformoval o nebezpečí a dětem nebyl podán jodid draselný. (Murphy, 2006)

Den třetí - 27. dubna

O půlnoci začaly do Pripjati přijíždět první autobusy. Zatím jen čekaly na pokyn k evakuaci. Ráno začaly armádní helikoptéry do hořícího reaktoru shazovat písek, kyselinu boritou a olovo. Teprve ve dvě hodiny odpoledne (37 hodin po havárii) byla vyhlášena evakuace 43 tisíc obyvatel města. S sebou si podle nařízení vzali jen nejnnutnější potřeby na 2 nebo 3 dny. (Paul, 2013)

Cesta k likvidaci havárie

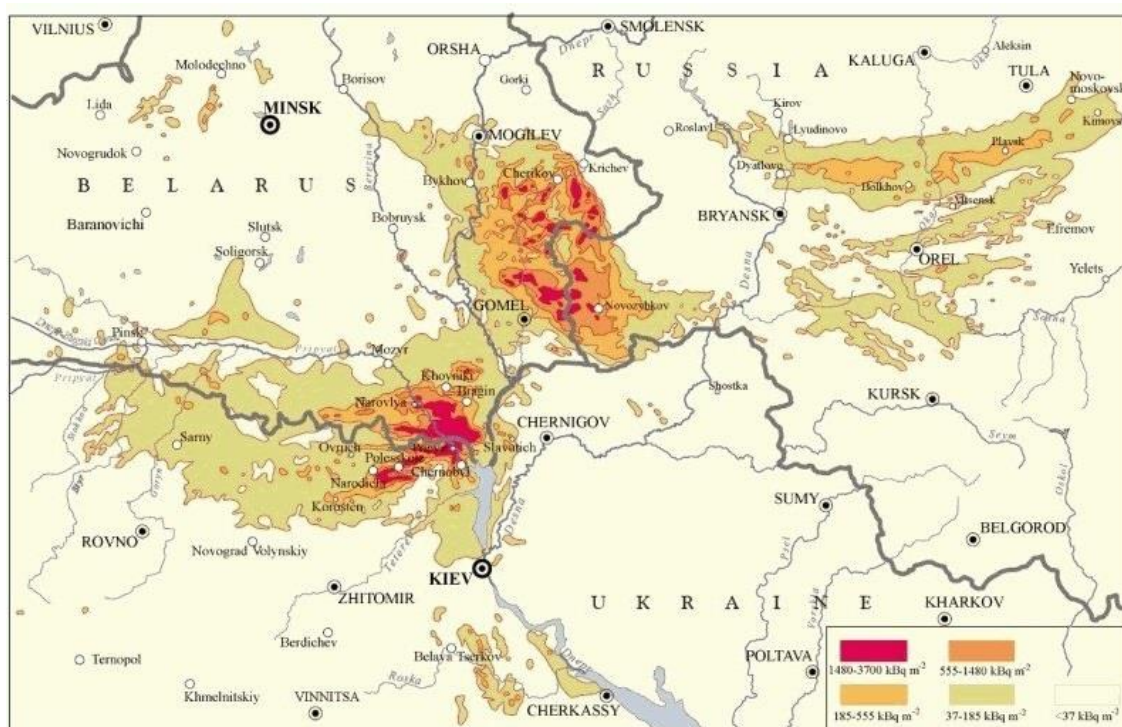
Během následujících dní byly z helikoptér shozeny tisíce tun písku, trosky reaktoru se podařilo uhasit po 10 dnech. Z 30 km okruhu kolem JE bylo postupně evakuováno dalších 116 tisíc lidí. Vzhledem k riziku propálení betonového dna reaktoru a následnému kontaktu paliva s vodou, která se pod ním nacházela, mohlo dojít k další masivní explozi. Dobrovolníkům se za cenu vlastních životů tuto vodu podařilo odčerpat. (Murphy, 2006) Horníci poté pod elektrárnou vyhloubili 150 metrů dlouhý tunel, do kterého bylo umístěno chladicí zařízení na bázi kapalného dusíku. Tím byla zabezpečena ochrana podzemních vod před kontaminací.

Prvomájové oslavy v Kyjevě proběhly bez jakýchkoliv opatření. Generální tajemník ústředního výboru Komunistické strany Sovětského svazu M. Gorbačov učinil první oficiální projev před národem až 18 dní po havárii, do té doby se informace tajily. Do zóny následně přijelo více než půl milionu likvidátorů. Omyli vodou kontaminované domy a ulice, bourali celé vesnice a stříleli kontaminovanou zvěř. V létě začala stavba sarkofágu z betonu a oceli. Více než 3 500 lidí, takzvaných biorobotů, muselo uklidit střechu 3. bloku od radioaktivního grafitu, protože technika v takových podmínkách vypovídala službu. Sarkofág byl dokončen koncem října roku 1986. (Murphy, 2006)

V současné době je budován nový sarkofág, jehož dokončení je plánováno na rok 2017.

Následky havárie

Akutní radiační syndrom se rozvinul u 134 osob, které se podílely na likvidaci havárie. Z tohoto počtu se jich 28 nedožilo ani konce roku a dalších 19 zemřelo do konce roku 2004. Přibližně 530 tisíc likvidátorů obdrželo dávku v rozmezí 0,02-0,5 Gy a z tohoto důvodu v jejich případě nelze vyloučit riziko pozdních stochastických účinků. U ukrajinských, běloruských a ruských dětí bylo ke konci roku 2005 evidováno více než 6 tisíc případů rakoviny štítné žlázy a dá se předpokládat, že toto číslo ještě po mnoho let poroste. (UNSCEAR, 2012) Přibližně 200 tisíc km² Evropy bylo kontaminováno cesiem ¹³⁷Cs, zejména na území dnešní Ukrajiny a Běloruska. (Obrázek 5) Ze svých domovů muselo odejít celkem 340 tisíc lidí. Množství osob do dnešních dnů trpí psychickými problémy, sužuje je strach a úzkost. Havarovaný reaktor obklopuje oplocená třicetikilometrová „zakázaná zóna“. Ekonomické ztráty způsobené havárií dosahují řádu miliard dolarů. (Balonov, 2006)



Obrázek 5: Mapa depozice cesia ¹³⁷Cs (UNSCEAR, 2012)

3.1.2 Fukušima

Japonská jaderná elektrárna Fukušima Daiiči se nachází na východním pobřeží ostrova Honšú, asi 250 km od Tokia. První fukušimský reaktor vyrobila americká firma General Electrics v roce 1971 a byl zprovozněn jako pátý jaderný reaktor na území Japonska. Tehdy měl výkon 439 MW. Vlastníkem a provozovatelem je společnost TEPCO (Tokyo Electric Power Company). (TEPCO, ©1995) Před havárií elektrárna disponovala šesti reaktory typu BWR (Boiling water reactor) o souhrnném výkonu 4 696 MW v rozvržení, jaké je uvedeno v Tabulce 3.

Tabulka 3: Reaktory ve JE Fukušima (Wagner, 2015)

Počet reaktorů	Typ reaktoru	Elektrický výkon
1	BWR – 3	460 MW
4	BWR – 4	784 MW
1	BWR – 5	1100 MW

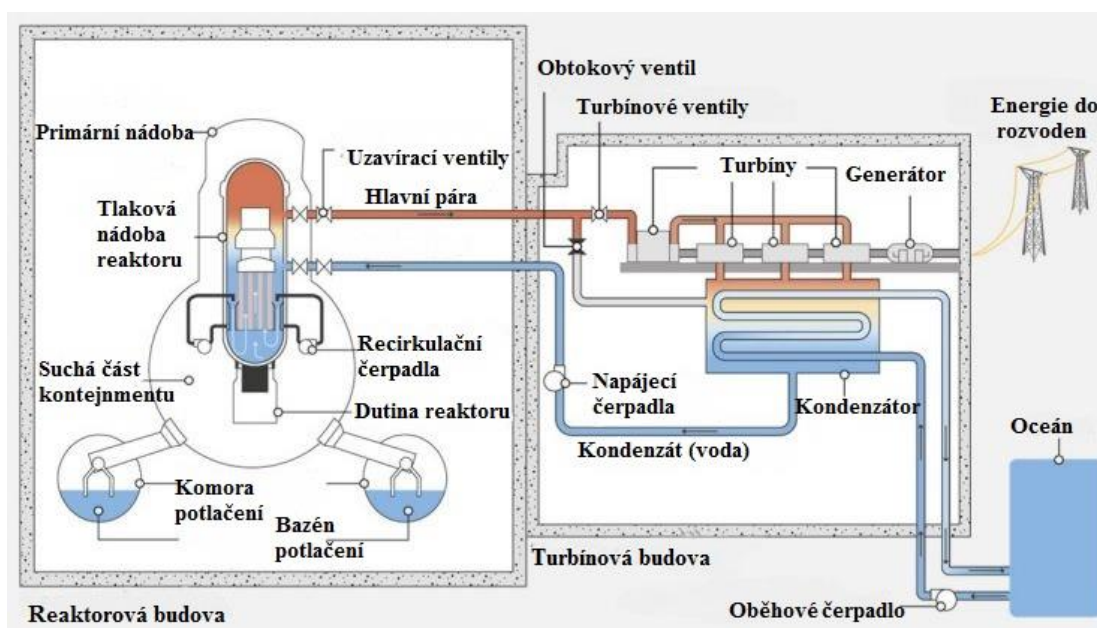
V okamžiku havárie byly v provozu tři bloky elektrárny a ve třech probíhala plánovaná odstávka z důvodu údržby. (Wagner, 2015)

Fukušimské varné reaktory (Obrázek 6) používají kontejnment typu MARK I. Tento kontejnment sestává ze dvou částí. V suché, tedy primární, části kontejnmentu (Drywell) se nachází reaktorová nádoba a chladicí okruhy. Mokrý část (Wetwell) je tvaru toroidu a do poloviny výšky je naplněna vodou určenou k chlazení. Jako palivo je v aktivní zóně reaktoru využíván obohacený uran ^{238}U .

Voda nacházející se v tlakové nádobě reaktoru je obrovským teplem aktivní zóny přiváděna k bodu varu při 285°C . Pára, která v tomto procesu vzniká, je pak odvedena potrubím do turbíny a odtud dále do kondenzátoru. Zde je za pomoci mořské vody zchlazena, přivedena zpět do kapalného stavu a vrací se do reaktorové nádoby. Při odstavení reaktoru je pára vedena mimo turbínu do kondenzátoru, kde se chladí až do

doby, kdy voda přestane vyvíjet páru. Dochladí se pomocí systému odvodu zbytkového tepla ve výměníku.

Při nutnosti havarijního chlazení jsou reaktory opatřeny navíc systémy izolovaného dochlazování aktivní zóny. V případě výpadku elektrické energie je elektrárna zajištěna diesellovými turbogenerátory a bateriemi, které jsou schopny zajistit energii pro chlazení reaktoru po dobu zhruba 8 hodin. (Wagner, 2015)



Obrázek 6: Schéma reaktoru BWR v JE Fukušima (IAEA, 2015)

Havárie

Den první - 11. března 2011

14:46 Severovýchod ostrova Honšú zasáhlo mimořádně silné zemětřesení. Jednalo se o páté největší přístrojově zaznamenané zemětřesení na světě. Velikost momentového magnituda činila 9,0 a prvotní otřes trval více než 2 minuty. (IAEA, 2015) Několik následujících otřesů bylo již mírnějších, přesto některé dosáhly magnituda o síle 7,9. (Wagner, 2015) V souladu s havarijním plánem dochází k automatickému odstavení reaktorů. V aktivní zóně se však i po přerušení štěpné řetězové reakce vyvíjí zbytkové teplo a reaktor je nutné nadále chladit. (IAEA, 2015)

15:27 První vlna cunami dosahovala výšky 4 m a pro elektrárnu žádné riziko nepředstavovala, protože bezpečnostní vlnolamy byly navrženy tak, aby odrazily vlny do výšky 5,7 m.

15:35 Přišla hlavní vlna vysoká 15 m a zaplavila areál elektrárny (Obrázek 7). Voda zničila čerpadla mořské vody a také dieselové generátory umístěné ve strojovně pod úrovní terénu. Jediný generátor (pro blok číslo 6) zůstal v provozu a zajišťoval chlazení jeho reaktoru. (IAEA, 2015) Dva muži, kteří se v tu chvíli ve strojovně nacházeli, nestihli uniknout. Záplavová vlna poškodila rozvody a zdroje stejnosměrného proudu pro bloky 1, 2 a 4. Výpadek elektřiny způsobil, že operátoři přišli o možnost sledovat stav reaktorů. Ve společné řídicí místnosti pro blok 1 a 2 byla tato ztráta totální. V řídicí místnosti pro blok 3 a 4 zůstalo několik akumulátorů funkčních a pracovníci tak mohli sledovat alespoň hodnoty tlaku a vodní hladiny ve třetím reaktoru. (Wagner, 2015). Čtvrtý blok byl v odstávce a vyhořelé palivo se nacházelo v chladícím bazénu. Pro operátory tedy pro tuto chvíli nebyl prioritou. Podle zprávy IAEA (2015) později vyšlo najevo, že v elektrárně neexistovaly žádné instrukce, jak se zachovat při absolutní ztrátě záložních energetických systémů.



Obrázek 7: Zaplavený areál JE Fukušima Daiiči (TEPCO, 2011)

16:00 Na bloku 3 se podařilo obnovit havarijní chlazení RCIC (Reactor core isolation coolant system). Nejkritičtější situace nyní nastává na bloku 1. Jeho havarijní chlazení operátoři ještě před příchodem cunami vypli. Systém IC (Isolation condenser) ochlazoval totiž aktivní zónu tak rychle, že se obávali poškození reaktoru. Nynější obavy z kritického poklesu vody v reaktoru proto byly zcela na místě. Nemohli to ale ověřit. Za pomoci autobaterií z autobusů, které se jim podařilo nalézt a zapojit, se dozvěděli, že hladina vody v reaktoru skutečně poklesla. Rozhodli se začít do reaktoru vstříkovat vodu z vnějšku. Aby tak mohli učinit, musel by se nejdříve snížit tlak páry uvnitř. Toho lze docílit vypuštěním páry do ovzduší skrz havarijní ventily. Bez elektrické energie by se však ventily musely otevřít ručně. K takové manipulaci neměli zaměstnanci elektrárny zpracované žádné návody.

18:00 Radiace v prvním bloku byla nad stupnicí měřitelnosti osobních dozimetrů. O několik hodin později byl již pro kritické hodnoty vstup do budovy reaktoru zakázán. (Wagner, 2015)

19:03 Japonská vláda vyhlásila stav jaderné nouze.

21:23 Byla vyhlášena plošná evakuace obyvatelstva v okruhu 3 km kolem elektrárny. (IAEA, 2015)

Den druhý - 12. března

0:49 Tlak v reaktoru 1. bloku již dvojnásobně přesahoval limitní hodnoty. Aby se tlak snížil, rozhodl ředitel elektrárny Masao Yošida o uvolnění páry z kontejnmentu. V tu chvíli se však již pára uvolňovala samovolně. Unikala skrz suchou část kontejnmentu přímo do budovy bloku a byla silně radioaktivní. (Wagner, 2015)

04:00 Díky poklesu tlaku v reaktoru 1. bloku bylo nyní možné začít s alternativním způsobem chlazení pomocí hadice hasičské stříkačky. Po více než 5 hodin byl reaktor chlazen přerušovaně s přestávkami na doplnění vody v cisterně. Poté se již zajistilo nepřetržité chlazení přímo z požární nádrže.

09:00 Pracovníci se začali snažit o manuální otevření ventilu havarijního vypouštění páry. V naprosté tmě a v již silně zamořených prostorách 1. reaktorové budovy to pro ně bylo velice problematické. Ventilace přes komoru potlačení (Wetwell) byla úspěšně zahájena po více než 5 hodinách, bylo **14:30**.

14:53 Voda chladící 1. reaktor byla téměř vyčerpána. Další chlazení měla zajistit mořská voda ze zaplavené části bloku 3. O půl hodiny později bylo vše připraveno.

15:36 Na servisním podlaží 1. bloku došlo k explozi nahromaděného vodíku. Pět zaměstnanců utrpělo zranění, nikdo nepřišel o život. Výbuch poškodil provizorní vedení elektrické energie i hadice, které měly reaktor chladit mořskou vodou.

18:25 Evakuační zóna byla z rozhodnutí vlády rozšířena na 20 km okruh.

19:04 Po téměř 4 hodinách bez chlazení, se do reaktoru v 1. bloku elektrárny začala pumpovat mořská voda. Později do ní byla přidána příměs kyseliny borité. (IAEA, 2015)

Den třetí - 13. března

02:42 Operátoři 3. reaktorového bloku se rozhodli vypnout tou dobou již selhávající systém havarijního chlazení HPCI (High pressure coolant injection system). Měli v úmyslu nahradit jej chlazením z vnějšku, stejně jako u 1. bloku. Tlak požárních čerpadel byl příliš nízký a bylo tedy nejprve třeba snížit tlak v aktivní zóně reaktoru. Přepouštěcí ventily však z řídicí místnosti nešly ovládat, ačkoliv podle světelné signalizace se zdály být funkční. Systémy RCIC ani HPCI se pak již obnovit nepodařilo.

06:00 Masao Yošida informuje Tokio, že pracovníci ztratili schopnost chlazení reaktoru číslo 3. (IAEA, 2015)

09:00 Podle zpětného odhadu provozovatele elektrárny - firmy TEPCO, byl toto přesný čas, kdy se začala obnažovat aktivní zóna 3. reaktoru. Pracovníci se mezitím stále snažili otevřít havarijní ventily a snížit tlak, což se jim nakonec podařilo. Dávkové příkony kolem hranic elektrárny prudce vzrostly. (Lochbaum, 2014) Během ventilace se navíc propojeným systémem 3. a 4. bloku dostával do 4. bloku vodík. (Wagner, 2015)

09:25 Po více než 4 hodinách bez chlazení se do 3. bloku z vnějšku začala pumpovat technická voda s kyselinou boritou. V **13:12** byla vyčerpána a nahrazena vodou mořskou. (IAEA, 2015)

Den čtvrtý - 14. března

11:01 V reaktorové budově 3. bloku elektrárny explodoval nahromaděný vodík. Výbuch zcela zdevastoval budovu 3. bloku (Obrázek 8), zranil 11 zaměstnanců elektrárny, zničil dvě stříkačky alternativního chlazení a navíc poškodil havarijní ventily 2. bloku. (IAEA, 2015) Vzhledem k výraznému zhoršení radiační situace schválila japonská vláda zvýšení povoleného limitu pracovníků ze 100 mSv na 250 mSv, aby potřební odborníci mohli v elektrárně zůstat. (Wagner, 2015)



Obrázek 8: Třetí blok JE Fukušima po výbuchu vodíku (TEPCO, 2013)

13:25 Havarijní chlazení RCIC u 2. bloku elektrárny selhalo. Hladina vody začala okamžitě klesat a tlak páry uvnitř naopak stoupl. Operátoři s tímto scénářem dopředu

počítali a zčásti na něj i byli připraveni. Výbuch 3. bloku však poškodil cestu připravenou pro dodávku vody do 2. bloku.

17:00 Podle analýzy TEPCO začalo v tento čas obnažování aktivní zóny reaktoru na 2. bloku. O 2 hodiny a 20 minut později se palivo začalo tavit.

19:54 Proběhl pokus pumpovat mořskou vodu do 2. reaktoru, přestože se nepodařilo otevřít přepouštěcí ventily. Tlak páry byl však příliš vysoký a vstřikování vody znemožnil. (Wagner, 2015)

Den pátý - 15. března

06:14 Nastal výbuch na 2. bloku elektrárny, který měl za následek prudký pokles tlaku v komoře potlačení. Vzhledem k důvodnému podezření z poškození reaktoru a následnému nekontrolovatelného úniku radiace, byl vydán příkaz k dočasné evakuaci pracovníků elektrárny. Vzápětí došlo k výbuchu na 4. bloku. (IAEA, 2015) Tento výbuch byl neočekávaný a pracovníky vyděsil. Vzhledem k tomu, že se 4. reaktor nacházel v odstávce, byl jeho stav považován za stabilní. Panovaly obavy, že výbuch souvisel s vyhořelým palivem umístěným v bazénu, který taktéž nebyl chlazen. Později vyšlo najevo, že za explozi v 4. bloku mohl vodík, který tam pronikl propojeným ventilačním systémem z 3. bloku. (Wagner, 2015)

07:00 Zhruba 650 pracovníků bylo evakuováno do bezpečných prostor sousední elektrárny Fukušima Daini, která již dosáhla stavu studeného odstavení. Ve Fukušimě Daiiči zůstalo cca 70 mužů včetně ředitele Masao Yošidy. (IAEA, 2015) Již kolem poledne se však někteří evakuovaní pracovníci začali vracet zpět. (Wagner, 2015)

09:00 Z 2. bloku reaktorové budovy stoupal hustý dým (pára). Dávkový příkon na hlavní bráně elektrárny činil téměř 12 mSv/h, což je nejvyšší naměřená hodnota od začátku krize v elektrárně. O dvě hodiny později byl pokyn k ukrytí vydán pro obyvatele v 20 a 30 km okruhu kolem elektrárny. (IAEA, 2015)

Po 15. březnu 2011 se vývoj událostí v JE Fukušima již dále nezhoršoval a 22. března se podařilo všechny bloky připojit zpět k elektrické síti. Poškozené reaktory byly

kontinuálně chlazeny a za enormního úsilí všech zasahujících osob, dosáhly všechny stavu studeného odstavení ke dni 16. prosince 2011. Přes poškozené konstrukce reaktorových budov byly vystavěny náhradní kryty. Dekontaminace fukušimské prefektury začala velice brzo po havárii a již na podzim roku 2011 mohla vláda přistoupit k odvolání omezení v pásmu mezi 20 až 30 km od JE. Další intenzivní dekontaminace pokračuje. (Wagner, 2015)

Následky havárie

Ve JE Fukušima zahynuli během havárie 2 pracovníci. Jejich smrt však nesouvisela s únikem radiace, ale s vlnou cunami, která je zastihla v suterénu 4. bloku. U dvou pracovníků byla zjištěna vysoká vnitřní kontaminace (efektivní dávka přes 600 mSv). Zdravotní dopady na obyvatelstvo jsou minimální, zejména díky včasné evakuaci. Sociální a psychologické následky evakuovaných osob (bylo jich cca 80 tisíc) jsou však značné, což samozřejmě souvisí i s předcházejícím katastrofálním zemětřesením a cunami, při kterém přišlo o život více než 18 tisíc lidí. Došlo k opakované kontaminaci Tichého oceánu způsobené úniky radioaktivní vody z nádrží. (Wagner, 2015)

V reakci na obavy veřejnosti ohledně jaderné bezpečnosti byla v Japonsku dočasně zastavena výroba energie v jaderných elektrárnách. Diskuze ohledně bezpečnosti výroby energie z jádra se rozhořely i v řadě dalších zemí napříč kontinenty. Přistoupilo se ke zvyšování požadavků na jadernou bezpečnost, prováděly se stress testy JE. Některé země upustily od plánů na jejich výstavbu (např. Bolívie, Kuba, Venezuela), jiné jadernou energetiku stejně jako Japonsko pozastavily. V Německu byl jaderný program ukončen trvale. (Schwartz, 2014)

3.2 Havárie šestého stupně

V minulosti došlo jen k jedné havárii, jež byla na stupnici INES ohodnocena druhým nejvyšším stupněm. Stala se v roce 1957 v závodě Majak v čeljabinské oblasti v bývalém SSSR a je pojmenovaná jako „kyštymská havárie“ podle města Kyšтым, což bylo nejbližší město zanesené v tehdejších mapách.

3.2.1 Majak

Přepřacovatelský závod Majak (PA Majak) byl pod pracovním názvem „komplex 817“ postaven v roce 1948. Následně byl do provozu uveden první reaktor pro výrobu plutonia ^{239}Pu do jaderných hlavic a radiochemické a metalurgické zařízení. Celý komplex společně s nově vybudovaným uzavřeným městem Čeljabinsk-40 (dnešní Ozjorsk) byl postaven v podzemním tunelu, přibližně 15 km východně od městečka Kyštym, 1 200 km od Moskvy. Vznikal v rámci závodů v jaderném zbrojení a z toho důvodu ve značném spěchu a samozřejmě v přísném utajení. Na jeho stavbě se podílelo cca 70 tisíc vězňů z gulagů a byl dokončen ve velice krátké době. První sovětská jaderná zbraň byla vyrobena právě v Majaku a to po 13 měsících od spuštění prvního reaktoru. (Malko, 2009) Letecký pohled na nadzemní stavby komplexu a jezera Kyzyltaš (v pozadí) a Karačaj, o kterých bude práce pojednávat, je na Obrázku 9.



Obrázek 9: Přepřacovatelský závod Majak (Wikimapia, 2011)

Havárie

Kyštymská havárie se stala 29. září 1957. Na počátku 50. let 20. století se zdejší jaderný odpad začal skladovat ve speciálních nádržích. Nádrže byly vyrobené z nerezové oceli a byly vloženy do betonových prohlubní v zemi, přičemž každá z nich měla objem 300 m³. Nedostatek těchto nádrží spočíval v tom, že jejich chladicí systém byl umístěn na vnitřní straně a v případě poruchy by byla oprava problematická. V důsledku působení radioaktivních solí došlo v roce 1956 u jedné nádrže ke korozi železných trubek chladicího systému a ten byl vyřazen z provozu. Dle posouzení radiochemického týmu však tento výpadek nemohl ovlivnit bezpečné skladování a po celý následující rok nedošlo k nápravě. V nádrži však došlo k vypaření vody a s tím související koncentraci a ohřevu vysoce výbušných nitrátů a acetátů. Byla to pravděpodobně jiskra z poškozeného ovládacího zařízení, jež spustila chemickou reakci, která vedla k výbuchu o síle až 10 t trinitrotoluenu. Vedla ke kompletní destrukci jedné nádrže a vážnému poškození dvou dalších. (Malko, 2009)

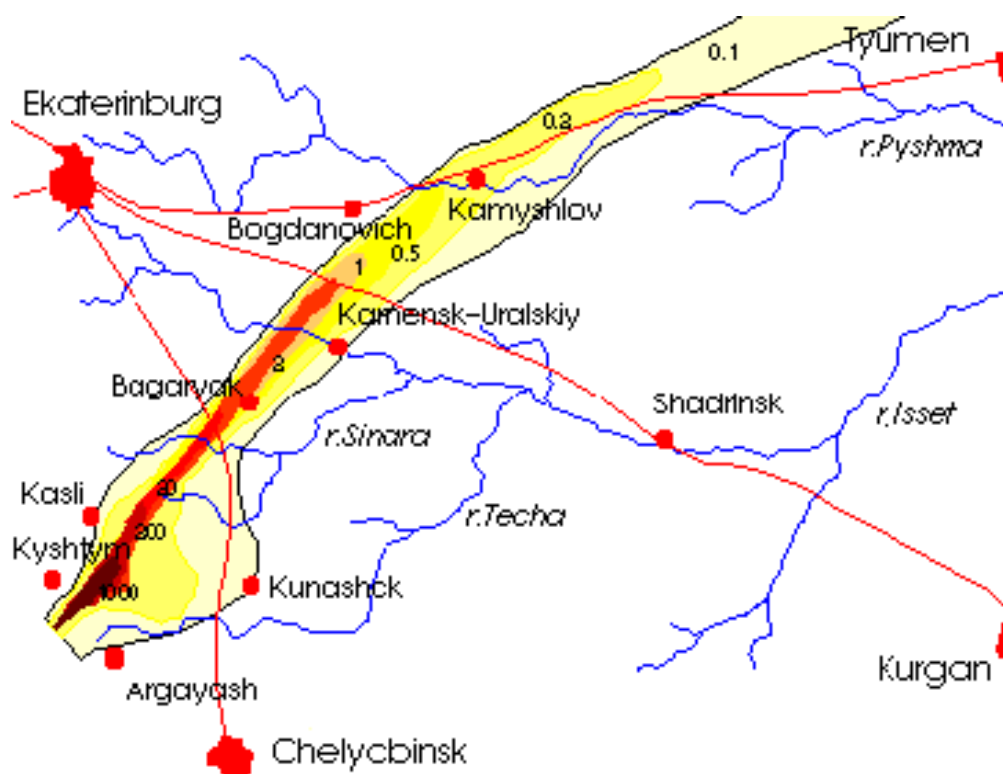
Již před touto havárií však v PA Majak docházelo k soustavné a trestuhodné kontaminaci životního prostředí. Všechny grafitové reaktory v komplexu byly chlazeny otevřeným cyklem. Voda k chlazení se odebírala z jezera Kyzyltaš a poté, co prošla reaktorem, byla do něj vypuštěna zpět. Tímto jezerem protéká řeka Teča, která byla v té době hlavní a mnohdy jediný zdroj pitné vody pro 124 tisíc lidí po jejím proudu. V průběhu let 1949-1952 byly do této řeky vypuštěny radioaktivní látky o celkové aktivitě přibližně 10¹⁷ Bq. Aniž by měli ponětí o rizicích, obyvatelé tuto vodu pili, zalévali s ní své plodiny, konzumovali ryby, které chytili, prali si zde prádlo a v létě se v řece koupali. Rozsáhlé záplavy na jaře roku 1951 navíc vedly k radioaktivnímu zamoření okolí řeky, přičemž tyto nívné půdy byly hojně využívány pro pasení dobytka a pěstování zeleniny. Oficiální zákaz jakéhokoliv využívání vody z řeky byl vydán až v roce 1953 a pro postižené lidi byly vykopány studny. Vodu z Teči však v omezeném měřítku využívali dál. (IAEA, 2003)

Další havárie se stala v roce 1967. Větrná eroze tehdy roznesla do širokého okolí prach z vyschlého jezera Karačaj, jež bylo dlouhodobě využíváno jako venkovní úložiště

tekutého radioaktivního odpadu a tím došlo k další rozsáhlé kontaminaci okolních polí, lesů, jezer a pastvin. (Pereltsvaig, 2014)

Následky havárií

V důsledku exploze nádrže v roce 1957 byly uvolněny látky o aktivitě 74 tisíc TBq z kterých přibližně 90 % zamořilo nejbližší prostředí továrny, zbytek vystoupal do výše a byl unášen větrem do značné vzdálenosti směrem na severovýchod. Toto zamoření vešlo ve známost jako Východouralská radioaktivní stopa (Obrázek 10). Kontaminovaná plocha činí téměř 20 tisíc km² s depozicí stroncia ⁹⁰Sr o aktivitě vyšší než 3,7 kBq.m⁻². Havárie zasáhla 270 tisíc obyvatel v 217 vesnicích a osadách, z nichž pouze 10 tisíc bylo evakuováno a to navíc se značnou prodlevou. (Standring, 2014)



Obrázek 10: Východouralská radioaktivní stopa – EURT (Kulish, 2001)

Po proudu řeky Teča se v době vypouštění radioaktivních látek nacházelo 41 vesnic o celkové populaci čítající 20 tisíc lidí. Mezi lety 1953-1960 bylo 20 vesnic srovnáno se zemí a 7,5 tisíc obyvatel přesídleno. Ti, kteří byli ponecháni svému osudu, však po generace dál vstřebávali radioizotopy (povětšinou stroncium ^{90}Sr a cesium ^{137}Cs) z vody, půdy, masa i mléka. Několik různých studií sledovalo vývoj zdravotního stavu obyvatel jedné z vesnic, jež nebyla nikdy evakuována – Musljumovo. Kurucová (2002) uvádí, že od roku 1950 se zde objevil:

- 41% nárůst výskytu leukémie;
- 31% nárůst chorob srdce a oběhového systému;
- 25% nárůst výskytu vrozených vývojových vad novorozenců;
- 21% nárůst výskytu nádorových onemocnění;
- čtyřnásobně vyšší výskyt případů astmatu a karcinomu kůže.

V roce 1997 trpělo v Musljumově 137 lidí chronickou nemocí z ozáření. Z celkového počtu 47 narozených dětí se jich toho roku 30 narodilo s patologickými změnami. Každé páté dítě trpí chronickou chorobou dýchacího ústrojí nebo kardiovaskulárním onemocněním. Místní lékaři odhadují, že polovina žen je neplodná. (Kurucová, 2002)

V Majaku se nadále zpracovává vyhořelé palivo ze sedmi ruských jaderných elektráren. Z každé zpracované tuny paliva vzniká až 200 t odpadu o různém složení. Roku 2005 byl výkonný ředitel závodu PA Majak Vitaly Sadovnikov uznán vinným, že mezi lety 2001-2004 nechal do řeky vypustit několik desítek milionů kubíků radioaktivního odpadu. Vzápětí byl amnestován. Podle slov soudu se řeka Teča v některých částech dá podle stupně zamoření kvalifikovat jako tekutý radioaktivní odpad. Ruská vláda i nadále odmítá financovat přesídlení obyvatel z kontaminované oblasti. (Slivyak, 2014)

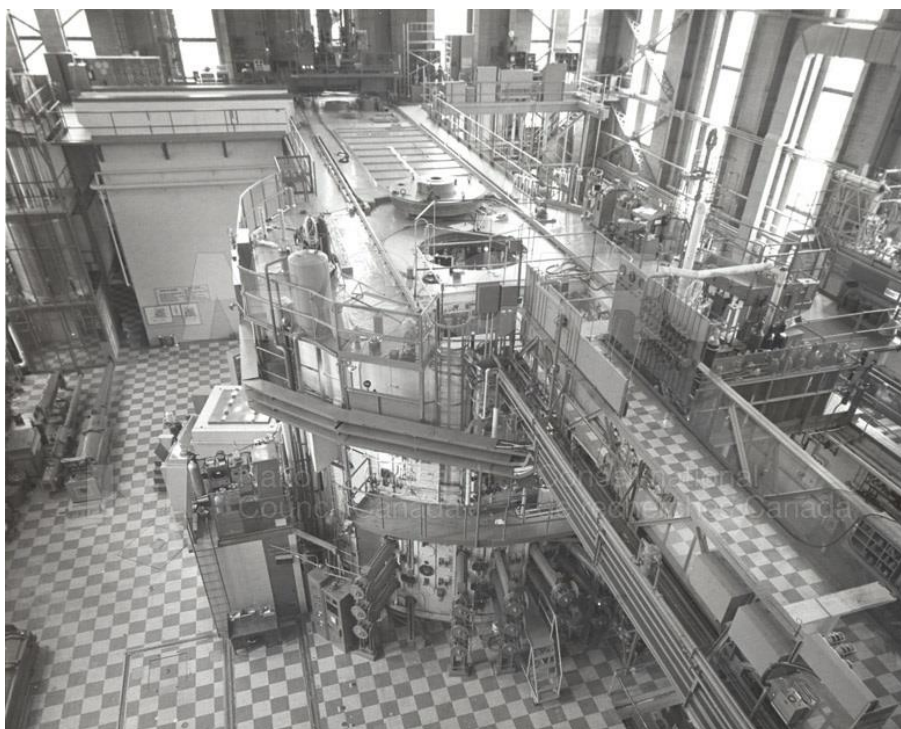
3.3 Havárie pátého stupně

Do dnešního dne byly na světě zdokumentovány 4 havárie, jenž svým rozsahem odpovídají stupni 5 podle INES, přičemž 3 události se udály na americkém kontinentu a jedna v Evropě.

3.3.1 *Chalk River*

Laboratoře Chalk River vzešly ze spolupráce kanadských, amerických a britských vědců při projektu vývoje atomové bomby uprostřed 2. světové války. Byly vybudovány na řece Ottawa, zhruba 200 km od stejnojmenného města a svůj první experimentální reaktor uvedly do provozu již v roce 1945. (Jedicke, 1989) Jako vědecký institut fungují laboratoře do současnosti a svojí zásluhu mají i na zrodu kanadského reaktoru typu CANDU (Canada deuterium uranium). Jedním ze zdejších pracovníků byl také nositel Nobelovy ceny za fyziku, Bertram Brockhouse. (Puchnar, 2015)

Reaktor NRX (National research experimental, Obrázek 11) byl v Chalk River uveden do provozu v červenci roku 1947 a při svém výkonu 42 MW se jednalo o jeden z nejvýkonějších vědeckých reaktorů vůbec. Reaktor je usazen vertikálně v hliníkovém válci o průměru asi 8 m a výšce 3 m, zvaném calandrium. Calandrium obsahuje 175 trubek naplněných až 14 tisíci litry těžké vody a helia. Těžká voda je moderátorem řetězové reakce a helium zabezpečuje prevenci chemické reakce se vzduchem. Do trubek calandria se v rámci vědeckých zkoumání mohly horním přístupem zasouvat tyče o různých materiálech, přičemž 12 trubek vždy obsahovalo bórové regulační tyče (8 samostatně ovladatelných a 4 v tzv. ochranném souboru). Zbylé trubky byly plněny palivem z přírodního uranu ^{238}U . Chlazení zabezpečovalo až 250 l vody z řeky, proudící mezi trubkami. (Jedicke, 1989)



Obrázek 11: Reaktor NRX (NRC, 2000)

Havárie

K částečnému roztavení aktivní zóny reaktoru došlo 12. prosince 1952. Byla to první závažná jaderná havárie v historii.

Reaktor měl toho dne pozměněné parametry chladicího systému z důvodu plánovaného vědeckého pokusu. Několik trubek bylo od systému odpojeno a jedna byla chlazená pouze vzduchem. Reaktor byl teprve ve stadiu náběhu, když jeden z pracovníků v suterénu omylem otevřel 3 nebo 4 ventily, ovládané pneumatickým systémem regulačních tyčí, což mělo za následek pokles tlaku vzduchu a tyče byly vytaženy z reaktoru. Tento stav byl okamžitě signalizován červenými světly obsluhy reaktoru v řídicí místnosti. Vedoucí operátor nejprve telefonicky nařídil nápravu, načež sám odešel do suterénu, aby ventily zkontroloval. Tyče se daly do pohybu a snížily se dostatečně na to, aby červená světla zhasla, ale vlivem nezjištěné mechanické závady se nezasunuly zcela. Další chybu poté udělal vedoucí, když telefonicky chybně instruoval operátora. Ten v důsledku toho zmáčkl špatné tlačítko a místo opětovného utěsnění tyčí do pneumatického systému došlo

k vyjmutí ochranného souboru. Ve chvíli, kdy se výkon reaktoru každé 2 sekundy zdvojnásoboval, si operátoři uvědomili svoji chybu a ihned aktivovali zpětné zasunutí ochranného souboru. Ten však nebyl utěsněn v pneumatickém systému, který zabezpečoval rychlou odezvu a výsledek byl takový, že ze 4 tyčí dosedla na místo jediná a navíc příliš pomalu. Chlazení v pozměněném režimu nemělo na prudce narůstající výkon, který nyní dosahoval 80 MW, žádný vliv, proto se obsluha rozhodla vypustit těžkou vodu z calandria. Situace vyústila v popraskání trubek, vývin vodíku a nevyhnutelnou explozi, jež posunula víko reaktoru. (Jedicke, 1989)

Následky havárie

Při havárii nebyl nikdo usmrcen. Někteří z pracovníků byli sice vystaveni radiaci, ale nebyla provedena žádná studie, která by zhodnotila jejich dlouhodobé zdravotní následky. Dekontaminace trvala řadu měsíců. Dozimetrické složky osob, které se na ni podílely, byly ztraceny při požáru o 4 roky později. (Jedicke, 1989)

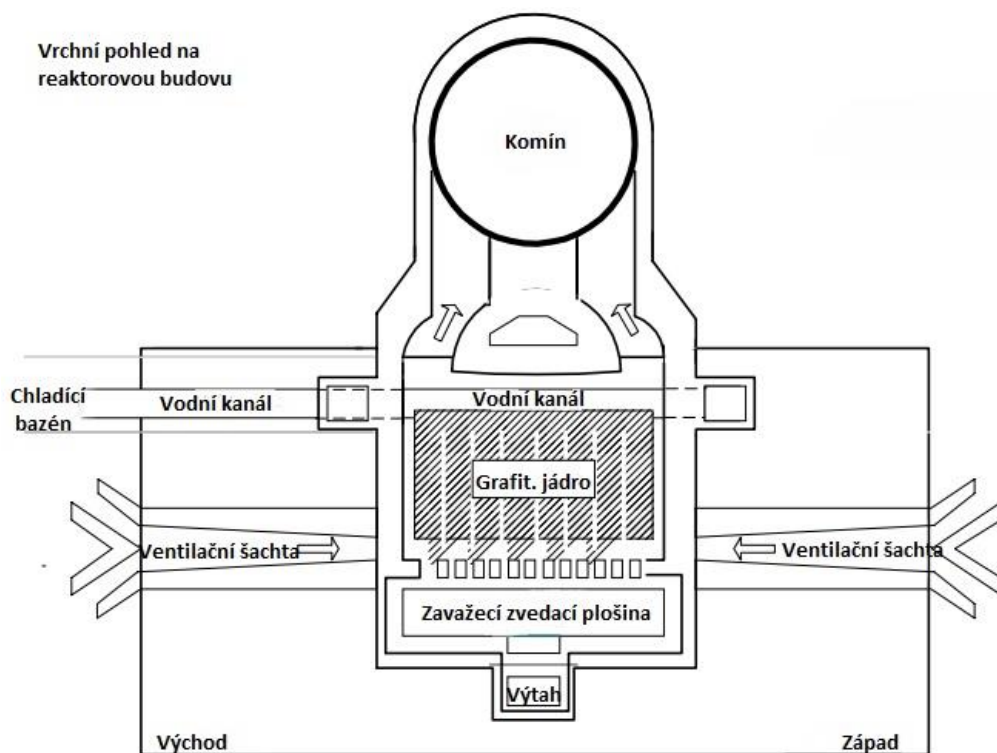
Na reaktoru došlo k částečnému roztavení aktivní zóny a do suterénu reaktorové budovy uniklo asi 4 500 l kontaminované vody. Celkový únik radionuklidů se rovnal 370 TBq. (Puchnar, 2015)

3.3.2 Windscale

Celý projekt britského zařízení na produkci plutonia ^{239}Pu vznikl v atmosféře politického napětí. V zoufalé snaze vyrovnat se americkým inženýrům, kteří již jadernou bombu sestrojili, vyrostla roku 1951 na dohled od městečka Seaside továrna Windscale s dvěma reaktory. Britská vláda doufala, že když se jim podaří na americké politiky udělat dojem výrobou vlastní atomové zbraně, docílí pak obnovení jaderné spolupráce, jež byla ze strany USA v roce 1946 ukončena. (Aspinall, 2007)

Nestabilní poválečná situace hraje v celém případě velice důležitou roli a je zapotřebí zdůraznit, že veškeré dění ve Windscale probíhalo za enormního politického tlaku na inženýry i pracovníky.

Reaktor „Pile 1“ (Obrázek 12) byl vzduchem chlazený reaktor, sestávající z více než 4 800 masivních grafitových bloků. Grafitem, který sloužil jako moderátor, procházelo 3 444 horizontálních palivových kanálů a 909 izotopových kanálů. Regulaci zajišťovalo 24 bórových tyčí. Celou aktivní zónu reaktoru pak obaloval biologický štít z oceli a betonu. Dovnitř každého palivového kanálu bylo z jedné strany reaktoru zaváženo 21 uranových článků v hliníkových žebrovaných kazetách. Na druhé straně po rozpadu uranu ^{238}U vypadávaly do vodního potrubí, odkud putovaly do chladicího bazénu a dále ke zpracování a extrakci vzniklého plutonia ^{239}Pu . (Pomfret, 2000) Chladící funkci zastávaly obrovské větráky, které hnaly vzduch skrz reaktor a 120 m vysoké komíny ven do ovzduší. Až na naléhání inženýra Johna Cockcrofta byly do těchto komínů na poslední chvíli nainstalovány filtry, které měly zamezit, aby se radioaktivní částice dostaly do životního prostředí. (Wakeford, 2007) Dnes továrna nese jméno Sellafield a zaměřuje se na zpracování vyhořelého paliva z britských JE.



Obrázek 12: Schéma reaktoru ve Windscale (Pomfret, 2000)

Havárie

Již od začátku výroby se pracovníci ve Windscale potýkali s nedostatečnou rychlostí produkce plutonia ^{239}Pu pro jadernou hlavici. Aby zvýšili reaktivitu paliva, rozhodli se zredukovat hliníkové opláštění uranových článků (Obrázek 13) částečným ořezem žebrování, čímž zmenšili plochu, ke které se dostává chladnější vzduch. Modifikace byla úspěšná, produkce se zvýšila a Britové tak v říjnu roku 1952 úspěšně otestovali svoji první atomovou bombu. Spojené státy o několik týdnů později otestovaly asi 10x silnější bombu – vodíkovou. Aby se tomu Velká Británie vyrovnala, nařídil premiér W. Churchill tajně výrobu vodíkové bomby. K jejímu sestrojení bylo nutné začít vyrábět navíc tritium ^3H , na to však reaktory nebyly navrženy. V roce 1956 byl za tímto účelem vystavěn nový reaktor „Calder Hall“, který byl zároveň prvním britským reaktorem vyrábějícím elektrickou energii. (Aspinall, 2007)



Obrázek 13: Hliníková palivová kazeta (Aspinall, 2007)

Ve starších reaktorech se mezitím začaly zasekávat palivové kazety v kanálech, jiné po vystrčení z aktivní zóny nedopadly do vodního kanálu ale do ventilační šachty, kde oxidovaly. Filtry v komínkách nedokázaly zachytit radioaktivní plyny a tím docházelo ke kontaminaci životního prostředí již dlouho před požárem reaktoru v roce 1957. Někteří pracovníci na vysoké hodnoty radiace naměřené v okolí upozorňovali, byli však vládou umlčeni. Po neúspěšném testu první britské vodíkové bomby došlo k nařízení zvýšení

výroby tritia ^3H o 500 %. Kazety byly opět modifikovány. Nyní obsahovaly obohacený uran ^{238}U a lithium-magnesium, což mělo produkci podpořit. Takto upravené kazety byly velice náchylné k přehřátí, o čemž se vědělo, ale rychlost výroby byla pro politiky přednější než bezpečnost. Další britská bomba (Orange Harold) nebyla sice skutečně vodíková, ale dosáhla stejné síly a média i Spojené státy se podařilo obelhat, že vodíkovou bombou skutečně je. (Aspinall, 2007)

Před požárem reaktoru č. 1, který vypukl 10. října 1957, byl prováděn žíhací proces s cílem uvolnění Wignerovy energie, což je energie, která se v grafitu hromadí v důsledku poruch krystalické mřížky působením neutronového pole. Grafit se při vypnutých ventilátorech ohřívá nad 250°C , což mřížku roztáhne natolik, aby se molekuly vrátily do svých poloh za současného uvolnění energie. Z důvodu chybné instrumentace byl proveden 2x za sebou, což způsobilo vznícení jednoho z kanálů. (Matlack, 2007) Pracovníci neměli o ohni tušení a ve snaze zchladit reaktor zapnuli větrák, což byla osudná chyba. Náhlý přísun kyslíku způsobil okamžité rozšíření ohně a radioaktivní látky byly komínem hnány do ovzduší. Hořelo 11 t paliva při teplotě $1\ 300^\circ\text{C}$ a havarijní plán pro takovou událost nebyl zpracován. Obyvatelé města Seascale nedostali žádné varování. Riskantní pokus o hašení vodou zůstal bez efektu, oheň zmizel až po zamezení přístupu vzduchu. (Aspinall, 2007)

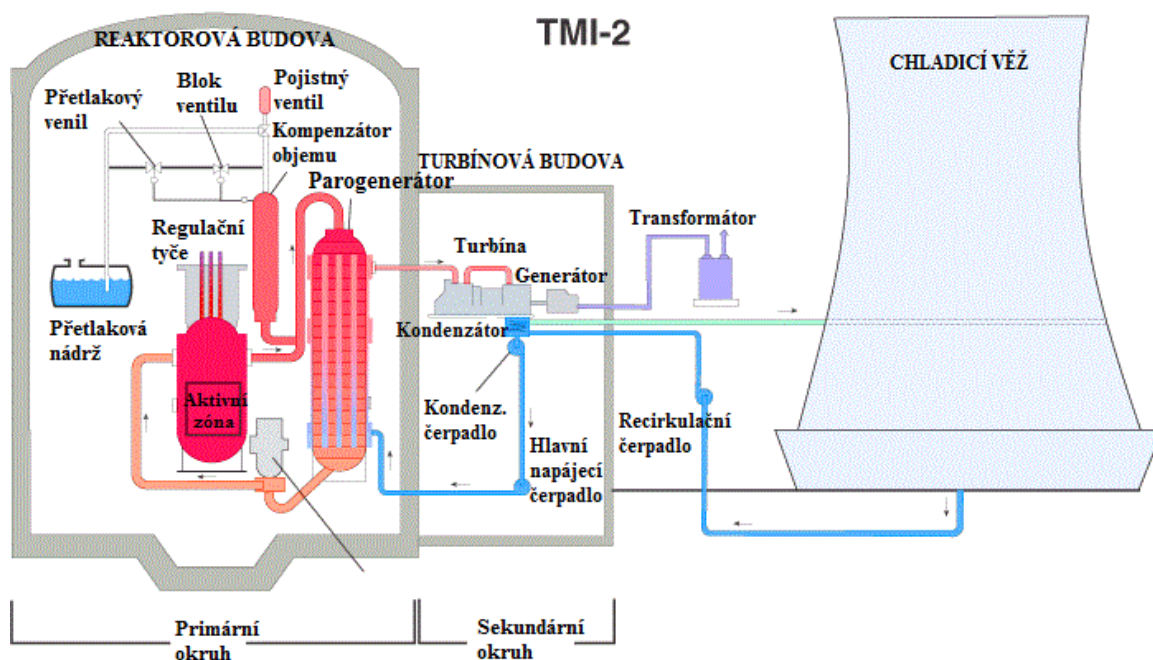
Následky havárie

Požár, který se dlouho nedařilo uhasit, zničil asi 8 % paliva. Do ovzduší uniklo více než 13 tisíc TBq radioaktivních látek, zejména jód ^{131}I . Obyvatelé v okolí továrny obdrželi dávky mezi 4-60 mSv. (Tůma, 2000) V okolí $500\ \text{km}^2$ platil v následujícím měsíci zákaz konzumace mléka, aby se zabránilo riziku rozvoji rakoviny štítné žlázy, zejména u dětí. Ještě dnes se v půdě na některých místech dá naměřit kontaminace cesia ^{137}Cs . V současné době probíhají na starých reaktorech demontážní a dekontaminační práce. Úplná likvidace se nečeká dříve, než v roce 2060. (Matlack, 2007)

3.3.3 Three Mile Island

Jaderná elektrárna Three Mile Island byla vybudována na ostrově na řece Susquehanna, 16 km jižně od Harrisburgu, hlavního města státu Pennsylvánie ve Spojených státech amerických. (IAEA, 2012) Byla opatřena 2 reaktory typu PWR (pressurized water reactor). První reaktor o výkonu 800 MW, nazvaný TMI-1, začal dodávat energii v roce 1974. Havárie z roku 1979 postihla reaktor TMI-2, což byl 900 MW reaktor, který byl do provozu uveden v teprve v prosinci předcházejícího roku. V okamžiku havárie, byl tedy zcela nový. (WNA, 2001)

Reaktor TMI-2 (Obrázek 14) v sobě kombinoval efektivitu vysokých operačních teplot za současné bezpečnosti uzavřeného tlakového systému. Vzhledem ke konstantnímu tlaku vody okolo 150 atmosfér, se teplota vody uvnitř okruhu může vyšplhat i přes 300°C, aniž by došlo k jejímu varu. Chladicí čerpadla pumpují horkou vodu z aktivní zóny do parogenerátoru, ve které se z vody oddělí pára. Ta je následně odvedena do turbíny pohánějící generátor elektrické energie. Celý reaktor je zasazen v masivním cylindrickém kontejnmentu z oceli a betonu. (Saygin, 2013)



Obrázek 14: Schéma reaktoru TMI-2 (WNA, 2001)

Havárie

Ve 4 hodiny ráno dne 28. března 1979 došlo vlivem mechanické nebo elektrické závady k výpadku napájecích čerpadel parogenerátoru, takže teplota v aktivní zóně začala růst. Havarijní systém automaticky odstavil reaktor i turbínu. V ten moment začal prudce narůstat tlak v primárním okruhu, proto se otevřel přetlakový ventil kompenzátoru objemu. Tento ventil se měl zavřít ihned po poklesu tlaku a podle indikátoru v řídicí místnosti se tak i stalo, jenže ve skutečnosti se zasekl v otevřené poloze. (U.S. NRC, 2013)

Operátoři neměli ani tušení, že do přetlakové nádrže dál stříká voda rychlostí 60 t za hodinu (z celkových 200 t primárního chladiva). Systém jim navíc neposkytoval žádné informace o hladině vody v aktivní zóně, takže když se spustil alarm a začala blikat červená světla, nevěděli, co se děje. Systém havarijního napájení parogenerátoru sice naběhl tak jak měl, ale kvůli chybné údržbě byly ventily mezi čerpadly a parogenerátorem uzavřeny. Během 2 minut nastala absolutní ztráta chlazení, dalších 8 minut uběhlo, než operátoři identifikovali problém a ventil otevřeli a dalších 25 minut trvalo, než se chladicí systém v sekundárním okruhu stabilizoval. Ztráta chladiva skrz ventil kompenzátoru objemu ale pokračovala a tlak prudce klesl. V tuto chvíli se automaticky spustil systém havarijního chlazení aktivní zóny (HPCI) přivádějící studenou vodu do primárního okruhu a hladina vody v kompenzátoru objemu rychle vzrostla. Po 5 minutách byl tento systém manuálně vyřazen z činnosti – operátoři stále nevěděli, že ventil je otevřený a měli strach, aby vody nebylo moc. (IAEA, 2012) Byli trénováni, že hladina vody v kompenzátoru objemu, je jediným ukazatelem hladiny vody v aktivní zóně a protože hladina rostla, byli přesvědčeni, že je všude vody dostatek. Opak byl ale pravdou a voda se začala vařit. Pumpování směsi páry a vody způsobilo, že chladicí čerpadla začala silně vibrovat. Aby nedošlo k jejich poškození, byly operátory vyřazen z provozu. (WNA, 2001)

Od této chvíle nebyla přiváděna žádná voda do aktivní zóny reaktoru a ta byla při teplotě 1 300°C obnažena. Zirkoniové opláštění palivových tyčí popraskalo a začalo

reagovat s párou za vzniku vodíku. Tavení paliva navíc způsobilo kontaminaci zbylého chladiva uvolněnými štěpnými produkty. (IAEA, 2012)

V 6:22 byl konečně uzavřen ventil kompenzátoru objemu, což ukončilo ztrátu chladiva. Nicméně, množství páry v chladicím systému blokovalo její průtok reaktorem. Odpoledne byl opětovně spuštěn systém HPCI ve snaze o zvýšení tlaku a kondenzaci parních dutin, což se podařilo, a v 19:50 bylo v bezpečnou činnost uvedeno i jedno chladicí čerpadlo. V 20:00 byla havárie oficiálně u konce, avšak strach z exploze „vodíkové bubliny“, která se v aktivní zóně vyvinula chemickou reakcí, nutil operátory ještě v následujících dnech periodicky otevírat ventil kompenzátoru objemu. Ze stejného důvodu navíc guvernér Richard L. Thornburgh vyhlásil evakuaci dětí a těhotných žen z blízkého okolí elektrárny. Později vyšlo najevo, že k výbuchu vzhledem k nedostatku kyslíku v systému reálně dojít nemohlo.

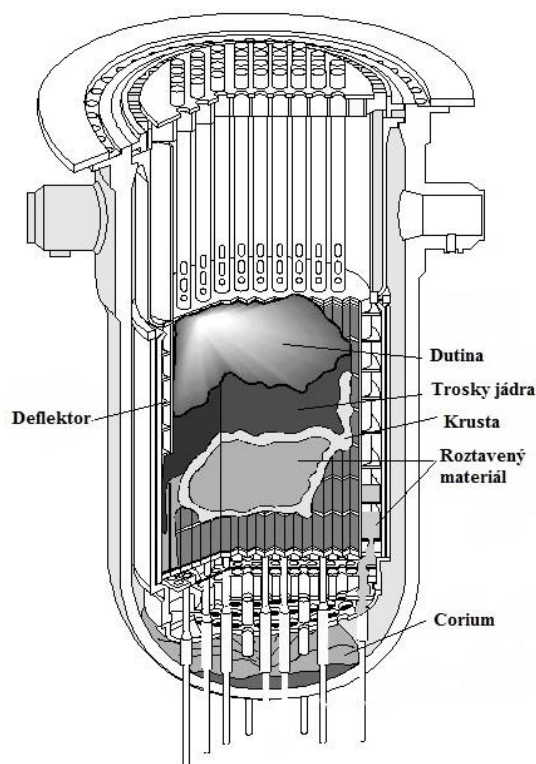
Následky havárie

Při havárii nepřišel nikdo o život. Ministerstvo zdravotnictví státu Pennsylvánie provedlo detailní studii radiologických následků havárie TMI-2. Po 18 let udržovalo registr více než 30 tisíc lidí žijících v okruhu 5 mil od JE v době havárie. Prokázal nulový zdravotní dopad na obyvatelstvo a v roce 1997 byl ukončen. Z psychologického hlediska byl zdravotní dopad pochopitelně značný. (WNA, 2001)

Různými organizacemi byly odebrány tisíce vzorků vzduchu, vody, mléka, plodin i půdy. Obsah radionuklidů, který by mohl mít s havárií souvislost, byl však zanedbatelný. (U.S. NRC, 2013)

Reaktor byl zničen. Vnitřní záběry z roku 1985 ukázaly, že 45 % paliva bylo společně s obložním a dalšími strukturami roztaveno, za vzniku 62 t vážícího coria (radioaktivní lávy). Zhruba 20 t coria se protavilo až ke dnu tlakové nádoby (Obrázek 15). (IAEA, 2012) V rámci likvidačních prací byla voda z okruhu odčerpána, dekontaminována a vypařena. Radioaktivní odpad byl vyvezen a uložen, zbytky paliva taktéž. Po vypršení provozní licence TMI-1, který je stále v provozu se přistoupí ke konečné likvidaci obou bloků.

Havárie v JE Three Mile Island zásadně změnila americký jaderný průmysl. Probudila ve společnosti strach a nedůvěru vůči jaderné energetice. Následná analýza havárie vedla k rozsáhlým bezpečnostním a organizačním změnám na amerických JE. (U.S. NRC, 2013)



Obrázek 15: Konečný stav reaktoru TMI-2 po havárii (IAEA, 2012)

3.3.4 Goiânia

Goiânia je město o celkové populaci okolo 1 milionu lidí, nacházející se ve střední Brazílii. Závažná radiační nehoda se stala v chudinské části města s velice omezenou mírou vzdělanosti na podzim roku 1987.

Havárie

Okolo 13. září roku 1987 byl z opuštěné kliniky ve městě Goiânia dvěma muži odcizen nezabezpečený zářič obsahující práškový chlorid cesný o celkové aktivitě

50,9 TBq. Oba muži začali brzy zvracet, předpokládali však, že je to způsobeno špatným jídlem. Jeden z nich začal později trpět i průjmem, závratí a otokem ruky (radiální popálenina vzniklá při demontáži kapsle s radioizotopy cesia ^{137}Cs z ozařovače). Vyhledal nemocnici, odkud byl po diagnostikování alergické reakce odeslán domů. Druhému muži se mezitím podařilo kapsli rozmontovat a její části prodat majiteli místního šrotiště. Ten k sobě domů společně se svou ženou v následujících dnech postupně zval různé příbuzné a sousedy, aby si i oni mohli prohlédnout nádherné modré světlo, jež kapsle vydávala. Někteří z nich si dokonce brali trochu prášku z kapsle s sebou domů, chlubili se dalším příbuzným. Když žena majitele šrotiště začala zvracet a mít průjem, byla i jí diagnostikována alergická reakce. Z jiného města se o ni přijela starat její matka. Poté se (kontaminovaná) vrátila domů. Po několik následujících dní s kapslí a radioaktivním práškem, který obsahovala, manipulovalo množství lidí, včetně jednoho dítěte. Dne 26. září byla z kliniky ukradena a odnesena další část ozařovače, konkrétně jeho 300 kg vážící stínící obal. (IAEA, 1988)

Možnost, že by za obrovské zdravotní problémy narůstajícího počtu lidí mohl stát prášek z kapsle, přišla jako první na mysl manželce majitele šrotiště. Zbytky kapsle tedy transportovala přes město autobusem na pracoviště zdravotního dohledu, kde ho položila na stůl s tvrzením, že „zabíjí její rodinu“. Všichni nemocni, kteří byli přijati do nemocnice, byli zprvu léčeni s podezřením na nějakou tropickou nemoc. Jeden z lékařů nakonec pojal podezření, že by mohlo jít o poškození způsobené radiací. To se po krátkém, ale důkladném vyšetřování konečně potvrdilo a to doslova za minutu dvanáct, jelikož místní hasiči se již chystali podezřelou tašku i s jejím obsahem hodit do řeky. Bylo 28. září, tedy 2 týdny od krádeže.

Poté co se podařilo vystopovat původ záříče, již události nabraly rychlý spád. Nemocnice pro léčbu tropických nemocí byla informována o radiální kontaminaci pacientů (byli dáni do izolace). Byly zalarmovány záchranné a bezpečnostní složky i další nemocnice v okolí a těžce zamořené oblasti skončily pod ostrahou.

Následky havárie

Čtyři lidé (včetně šestiletého děvčete), kteří v důsledku havárie zemřeli, museli být pohřbeni v olověných rakvích. Obdrželi dávky mezi 4,5-6 Gy a jejich pitvy prokázaly hemoragické a septické změny spojené s akutním radiačním syndromem. Dvě osoby s obdobně vysokými obdrženými dávkami se podařilo zachránit. Dohromady bylo sledováno zhruba 120 tisíc lidí, přičemž u 249 osob byla potvrzena různě vysoká míra vnější či vnitřní kontaminace. Někteří měli závažné radiační popáleniny, protože si prášek smíchaný s krémem nanášeli na tvář kvůli karnevalu, který se právě konal. Monitorována byla plocha o 67 km². Z 85 kontaminovaných obydlí bylo 200 obyvatel evakuováno a 41 domů bylo srovnáno se zemí (Obrázek 16). Dekontaminace za pomoci těžké techniky probíhala řadu měsíců. (IAEA, 1988)

Pátá oběť havárie v Goiânii zemřela v roce 1994 po jaterním selhání způsobené radiačním poškozením. (Johnston, 2004)



Obrázek 16: Demolice kontaminovaných domů v Goiânii (IAEA, 1988)

3.4 Závěrečné shrnutí závažných havárií

Tabulka 4 byla vytvořena jako stručný výsledek prvotní analýzy havárií popsanych na předchozích stranách této bakalářské práce a poskytuje základní shrnutí příčin, které k jednotlivým haváriím vedly, společně s jejich důsledky. Události v tabulce byly pro přehlednost seřazeny chronologicky dle stupně závažnosti.

Tabulka 4: Tabulka příčin a důsledků havárií (zdroj vlastní)

Závažnost dle INES	Rok	Lokace	Příčina havárie	Důsledek havárie
7	1986	JE Černobyl	Nekontrolovaný rozvoj štěpné reakce	Exploze páry a vodíku
7	2011	JE Fukušima Daiiči	Ztráta chlazení	Exploze vodíku
6	1957	PA Majak	Porucha chlazení nádrže s radioaktivním odpadem	Chemická exploze
5	1952	Laboratoře Chalk River	Nekontrolovaný rozvoj štěpné reakce	Exploze vodíku
5	1957	Závod Windscale	Přehřátí paliva	Požár reaktoru
5	1979	JE Three Mile Island	Ztráta chlazení	Roztavení paliva
5	1987	Město Goiânia	Nezabezpečený zářič	Kontaminace ¹³⁷ Cs

4 DISKUZE

Tato bakalářská práce si kromě vyhotovení přehledu všech závažných havárií na jaderných zařízeních vzala za cíl také jejich analýzu a vzájemnou komparaci. Tato část práce tedy kromě samotné odpovědi na výzkumnou otázku nabízí také hlubší, individuální rozbor průběhu havárií zaměřený na příčiny jejich vzniku. Rozebírá každou havárii zvlášť, v širších souvislostech a kromě prostého popisu obsahuje i osobní úvahy. Vzájemná komparace jednotlivých havárií pátrá po jejich shodných znacích.

4.1. Černobyl

Tragická havárie 4. reaktoru černobylské JE vznikla v první řadě z důvodu kritického porušení bezpečnostních zásad. Na samotném začátku zkoušky turbogenerátoru byl odpojen systém havarijního chlazení, který v kritické situaci mohl zasáhnout. Zůstal však odpojený po celou dobu až do okamžiku parní exploze. Do již probíhající zkoušky přišla směna, která na ni nebyla připravena a nebyla dostatečně obeznámena s jejími náležitostmi. Jednalo se navíc o velice mladé a nezkušené operátory. Významným faktorem byl také despotický inženýr Djatlov, kterému se operátoři nedokázali postavit, když nařídil snižování výkonu hluboko pod bezpečnostní limity. Myslím, že je důležité si uvědomit, že se událost stala v době Sovětského svazu, kdy si málokdo dovolil nadřízenému odporovat, protože by o svoji práci mohl lehce přijít a tím jim také bylo ze strany Djatlova vyhrožováno. Ve chvíli, kdy výkon reaktoru prudce poklesl, a započala xenonová otrava, měla být zkouška okamžitě ukončena. Místo toho však byly z reaktoru s cílem rychlého zvýšení výkonu vytaženy téměř všechny regulační tyče. Poplašné signály, které se rozezněly, byly ignorovány a systém automatického havarijního odstavení reaktoru zablokován. Je pravda, že reaktor RBMK byl velice specifický. Neměl kontejnment, měl kladný dutinový koeficient (zvyšování reaktivity, při zvyšujícím se podílu páry) a na svoji dobu byl neobyčejně výkonný. Troufám si však tvrdit, že s fungující havarijní ochranou nebyl sám o sobě nebezpečný a k havárii ho dovedl řetězec neuvěřitelně závažných a navíc úmyslných porušení bezpečnosti. Obsluha dovedla

reaktor do stavu, se kterým si pak nedokázala poradit a stisk tlačítka AZ-5 byl jejím prvním a také posledním pokusem o záchranu situace.

4.2 Fukušima

Havárie 4 bloků fukušimské JE byla způsobena souhrou vlivů obrovské přírodní katastrofy, chybně umístěného technického zázemí i určitých organizačních nedostatků. Elektrárna se nachází blízko mořského břehu v seismicky aktivní oblasti. Japonci jsou na častá zemětřesení poměrně zvyklí a v bezpečnostním návrhu JE se na tuto eventualitu pamatovalo. Pamatovalo se i na možnost vlny cunami. Vlnolamy by zvládly odrazit vlnu do výšky 5,7 m, ale s vlnou vysokou 15 m nikdo nepočítal. Kdyby ano, k žádné havárii nemuselo dojít. Další a podle mého názoru nejzávažnější chybou bylo umístění nouzových dieselových agregátů pod úroveň mořské hladiny. Automatika během zemětřesení sice podle plánu odstavila reaktory, ale vzhledem ke zničení elektrických rozvodů i dieselových agregátů došlo k absolutní ztrátě energie a reaktory nebylo možné dochlazovat. Pro operátory navíc neexistovaly žádné instrukce pro takovou situaci, což považují za další selhání. Myslím, že v samotném průběhu havárie prokázali pracovníci JE Fukušima obdivuhodné nasazení i statečnost, a nebýt takového odhodlání, mohly být následky pro obyvatele i životní prostředí nesrovnatelně horší. Pokud chceme hledat skutečnou příčinu havárie, museli bychom se vrátit do doby, kdy teprve vznikala projekt elektrárny.

4.3 Majak

O průběhu kyštymské havárie se nedochovalo mnoho podrobností. Nelze se tomu divit, protože Sovětský svaz ji více než 30 let tajil a důkazy byly systematicky likvidovány. S jistotou lze říci, že exploze v nádrži na radioaktivní odpad byla zapříčiněna selháním chladicího zařízení. Tuto událost mohu vyhodnotit takto: špatný byl již návrh celého systému, protože systém chlazení byl umístěn tak nešťastně, že oprava

byla téměř vyloučena. Další možný vývoj situace uvnitř nádrže byl radiochemiky hrubě podceněn, což vyústilo v chemickou reakci a následný výbuch.

Předchozí a dokonce i následné soustavné zamořování životního prostředí se podle mého názoru dělo z jediného důvodu, kterým je naprosté selhání morálního charakteru odpovědných osob. K tomuto závěru mě dovedl nejen samotný popis událostí kolem PA Majak v této bakalářské práci, ale také různé televizní dokumenty o životních podmínkách a zdravotním stavu obyvatel čeljabinské oblasti, které jsem z osobního zájmu shlédla. Téměř se zdá, jako by pro představitele Sovětského svazu místní lidé neznamenal nic víc, než jakýsi vědecký experiment.

4.4 Chalk River

Havárii v Chalk River předcházela změna parametrů chlazení, která měla vliv na pozdější vývoj událostí. Vzhledem k tomu, že se jednalo o pokus na vědeckém reaktoru přizpůsobeném pro tento druh experimentování, nemohu tento fakt označit za porušení bezpečnosti a zcela jistě to havárii nezapříčinilo. Do kritického stavu byl reaktor uveden v důsledku pochybení jednoho z pracovníků, které způsobilo vytažení regulačních tyčí z reaktoru a následné další pochybení vedoucího operátora, jehož špatná instrukce přispěla k dalšímu zvýšení výkonu reaktoru.

4.5 Windscale

Na úvod analýzy havárie ve Windscale je třeba říci, že množství neuvážených rozhodnutí, enormní tlak politiků na rychlost výroby, porušování bezpečnosti a málo zkušeností pracovníků vedlo tuto továrnu k havárii v podstatě již od jejího uvedení do provozu. Vzhledem k tomu, že se jednalo o první britské reaktory, myslím, že by se nad jistými drobnými nedostatky daly přimhouřit oči. V případě Windscale se ale jednalo o obrovské problémy ve funkci reaktoru. Tím myslím zejména zasekávání palivových kazet v kanálech a fakt, že některé kazety nedopadaly do vodního kanálu, ale do větrací šachty. Palivové kazety byly modifikovány ořezem žeber hliníkového opláštění s cílem zvýšení produkce tritia ^3H . Samotné palivo bylo navíc obohaceno o materiály přispívající

k přehřátí. Požáru reaktoru předcházela bezprostřední chyba pracovníků továrny, kteří ho omylem vyžilihali dvakrát za sebou. Dalším pochybením bylo i zapnutí větráků, které místo zchlazení reaktoru pouze rozšířily plameny.

4.6 Three Mile Island

Na začátku havárie v Three Mile Island došlo k selhání činnosti napájecích čerpadel parogenerátoru. Přesný důvod selhání není znám, ale nejednalo se o chybu obsluhy. Technickou poruchou byl i zaseknutý ventil a chybná signalizace jeho indikátoru. Systém nebyl naprogramován, aby operátorům v řídicí místnosti sděloval hladinu vody v aktivní zóně, což je pro mne těžko pochopitelné. Vůbec nevěděli, proč se najednou spustil alarm, a zřejmě i z toho důvodu jednali zprvu ve značném zmatku. Chyba údržby, kvůli které zůstaly ventily mezi čerpadly a parogenerátorem uzavřeny, byla zřejmě jen pomyslnou špičkou ledovce. Tato havárie byla z mého pohledu zcela jednoznačně podmíněna chybou již v návrhu, následovaná obrovskou smůlou a zmatky obsluhy. V kritických chvílích ji totiž zradil informační systém reaktoru a z návrhu chybějící instrumentace.

4.7 Goiânia

Velice nešťastná událost, za kterou životem zaplatili nevinní lidé, byla započata krádeží zářiče chlorid cesný. Myslím, že by bylo příliš jednoduché označit muže, kteří zářič odnesli za jediné viníky této jaderné tragédie. Krádež jako taková je sice odsouzeníhodná, ale věřím, že je k tomu dovedla především chudoba. S jejich sociální situací souvisí také fakt, že neměli žádné ponětí o tom, s jak nebezpečnou věcí si zahrávají. V těchto chudinských čtvrtích bývá vzdělanost na velice nízké úrovni. Jako zásadní chybu v tomto případě vidím nezabezpečení budovy bývalé kliniky, v které byl zanechán ozařovač a to zejména v takovém místě, kde je riziko nepovolaného vstupu více než pravděpodobné.

4.8 Komparace výsledků

V rámci bakalářské práce byla provedena analýza všech výše popsaných jaderných havárií a na jejím základě lze jednotlivé havárie mezi sebou porovnat. Havárie ve vzájemné komparaci vykazují určité podobnosti a to buď v jejich prvotní příčině, čili okolnostech, které jim předcházely, nebo v charakteru samotných havárií.

Shodný znak je možno najít v událostech, které se staly v JE Černobyl a ve Windscale. Ačkoliv byl výsledný charakter těchto dvou havárií zcela odlišného průběhu, tak oběma předcházelo skutečně hrubé porušování zásad bezpečnosti. Co se týče černobylské havárie jako takové, vykazuje podobnost s havárií v Chalk River (v obou případech se operátorům vymkla z kontroly řetězová štěpná reakce), musím však opět zdůraznit, že zatímco v Černobylu dovedla reaktor do nestabilního stavu úmyslná riziková činnost obsluhy, v Chalk River se jednalo o souhrn několika nešťastných chyb.

Podobnou prvotní příčinu i následný charakter havárie nacházím v událostech v JE Fukušima a JE Three Mile Island. Ani jedna z těchto havárií by se nemusela přihodit, pokud by byly elektrárny lépe navrženy. Ve Fukušimě by to bylo zejména lepší umístění nouzových zdrojů energie, případně i vyšší vlnolamy. V Three Mile Island lepší systém informování o stavu reaktoru. Operátoři reaktoru TMI-2 i pracovníci ve Fukušimě se nakonec potýkali se zásadním problémem a tím je ztráta chlazení. Zcela nevyhovující návrh reaktoru měla i továrna ve Windscale, zde je však nutno přihlídnout k datu, kdy byla postavena.

Dvě jaderná zařízení mají na svědomí vědomou, ignorovanou a soustavnou kontaminaci životního prostředí a tím je zejména PA Majak a závod Windscale. Obě tyto továrny byly postaveny na začátku studené války a ochrana zdraví okolních obyvatel a jejich životního prostředí zjevně nebyla prioritou tehdejších vládních představitelů. Tou byla především výhra závodu v jaderném zbrojení.

Takzvané „kyštymské havárie“ předcházela ztráta chlazení. Nabízí se tedy připodobnění k haváriím v JE Three Mile Island a JE Fukušima. V PA Majak se však havárie netýkala samotného reaktoru, ale nádrže s radioaktivním odpadem.

Zcela specifická byla tragédie v Goiânii. Nemohu ji přirovnat k žádné jiné havárii, protože se nejednalo o jaderné zařízení ale o nezabezpečený zářič, který se dříve využíval jako radioterapeutický zdroj.

4.9 Vyhodnocení výzkumné otázky

V této bakalářské práci byla stanovena následující výzkumná otázka: Je nejčastější příčinou havárie na jaderných zařízeních selhání lidského faktoru?

Z výsledků bakalářské práce vyšlo najevo, že ačkoliv se míra závažnosti (případně úmyslnosti) pochybení u jednotlivých havárií liší, v konečném důsledku byla chyba lidského faktoru příčinou všech závažných jaderných havárií v historii. Odpověď na výzkumnou otázku tedy zní: Ano, selhání lidského faktoru je zcela jednoznačně nejčastější příčinou závažných havárií na jaderných zařízeních.

5 ZÁVĚR

Bakalářská práce měla za cíl vyhotovení přehledu všech jaderných havárií, které byly stupnicí INES ohodnoceny v rozmezí stupňů 5 až 7. Následná analýza jednotlivých havárií měla vést ke konečné komparaci jednotlivých havárií za účelem odhalení shodných znaků v příčinném řetězci událostí, jež k nim vedly. Podrobný přehled vybraných havárií byl za použití uvedených literárních zdrojů zpracován na cca 30 stranách praktické části této práce, společně s informacemi o typech reaktorů a následcích, které po sobě havárie zanechaly. Pro přehlednost byla vytvořena tabulka, která stručně shrnuje příčiny a důsledky havárií. Diskuze je věnována individuálnímu rozboru každé havárie s důrazem na nalezení její příčiny a to v širších souvislostech. Konečná vzájemná komparace jednotlivých událostí přinesla zajímavé výsledky. Cíl práce byl tímto splněn.

V rámci této práce se taktéž podařilo odpovědět na stanovenou výzkumnou otázku, která zněla: Je nejčastější příčinou havárie na jaderných zařízeních selhání lidského faktoru? Z výsledků, které práce uvádí, lze konstatovat, že selhání lidského faktoru je jednoznačně nejčastější příčinou závažných havárií na jaderných zařízeních.

6 LITERATURA

AMANO, Yukiya.. *The Fukushima Daiichi Accident. Report by the Director General*. International Atomic Energy Agency. 2015. [online]. Vienna. [cit. 2016-04-16]. ISBN 978-92-0-107015-9. Dostupné z: <http://www-pub.iaea.org/MTCDD/Publications/PDF/Pub1710-ReportByTheDG-Web.pdf>

ASPINALL, Sarah. 2007. *Windscale: Britain's Biggest Nuclear Disaster* [dokumentární film]. Velká Británie. Dostupné z: <https://youtu.be/d5cDiqVHW7Y>

BALONOV, Mikhail. 2006. *The Chernobyl Forum: Major Findings and Recommendations*. Euronuclear [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <https://www.euronuclear.org/events/pime/pime2006/presentations/Balonov.pdf>

IAEA: *About IAEA*. ©1998-2014. International Atomic Energy Agency [online]. Vienna. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/about/about-iaea>

IAEA: Member States. 2016. *International Atomic Energy* [online]. Vienna [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/about/memberstates>

IAEA: 2013. *INES The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual 2008 Edition*. International Atomic Energy Agency [online]. Vienna. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www-pub.iaea.org/MTCDD/Publications/PDF/INES2013web.pdf>

IAEA: ©1998. *International Nuclear Events Scale (INES)*. International Atomic Energy Agency [online]. Vienna. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www-ns.iaea.org/tech-areas/emergency/ines.asp>

IAEA. 2003. *Radioactive Contamination of the Techa River, South Urals, Russia*. International Atomic Energy Agency [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <https://www-ns.iaea.org/downloads/rw/projects/emras/emras-aquatic-techa.pdf>

IAEA. 2012. 3.2.3.3. *Safety case study: the Three Mile Island accident*. International Atomic Energy Agency [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/ns/tutorials/regcontrol/assess/assess3233.htm>

- JEDICKE, Peter. 1989. The NRX Incident. *Canadian Nuclear Society* [online]. London [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <https://www.cns-snc.ca/media/history/nrx.html>
- JOHNSTON, Robert. 2004. *Goiania orphaned source dispersal, 1987*. Johnston Archive [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.johnstonsarchive.net/nuclear/radevents/1987BRAZ1.html>
- KLENER, Vladislav. 2000. *Principy a praxe radiační ochrany*. 1. vyd. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost. ISBN 8023837036.
- KOLEKTIV AUTORŮ. *Radiobiologie*. 2011. [online]. [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org>
- KOSTKA, Tomáš. *Havárie v jaderné elektrárně ČERNOBYL. Černobyl* [online]. Aktualizace 11-05-2015 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://chernobyl.euweb.cz>
- KROUPA, Miroslav a Milan ŘÍHA. 2010. *Průmyslové havárie*. 2. vyd. Praha: Armex. Skripta pro střední a vyšší odborné školy. ISBN 9788086795874.
- KULISH, Dmitry. 2001. *Radiation in Chelyabinsk Region*. Angelfire.com [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.angelfire.com/ok/yolcu/web/project/DIMA.htm>
- KUNA, Pavel a Leoš NAVRÁTIL. 2005. *Klinická radiobiologie*. 1. vyd. Praha: Manus. ISBN 8086571092.
- KURUCOVÁ, Svetlana. 2002. *Geografické aspekty rádioaktívnej kontaminácie Čelabinskej oblasti v dôsledku činnosti Výrobného združenia Maják*. Bratislava: Omega Info. ISBN 80-967741-4-X. Dostupné také z: <http://www.omegainfo.sk/MAJAK-el.pdf>
- LANHAM. 1988. The Radiological accident in Goiânia [online]. [cit. 2016-04-20]. ISBN 92-012-9088-8. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub815_web.pdf

- LEDERMAN, Luis. 1996. *Safety of RBMK reactors: Setting the technical framework*: IAEA Bulletin [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull38-1/38102741017.pdf>
- LOCHBAUM, David A. 2014. *Fukushima: the story of a nuclear disaster*. New York: The New Press. ISBN 978-159-5589-088.
- MACGREGOR, 2008. Jane. *Site Name: Chernobyl*. Subterranea Britannica. [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.subbrit.org.uk/rsg/sites/c/chernobyl/>
- MALKO, M. V. 2009. *History of radiation and nuclear disasters in the former USSR*. Kyoto University Research Reactor Institute. [online]. Minsk. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/en/Malko2009English.pdf>
- MATAL, Oldřich a Hugo ŠEN. 2011. *Jaderná zařízení a jejich bezpečnost*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-80-214-4349-5.
- MATLACK, Gerry. 2007. *The Windscale Disaster*. Damn Interesting [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.damninginteresting.com/the-windscale-disaster/>
- MIKA, Otakar J a Lubomír POLÍVKA. 2010. *Radiační a chemické havárie*. Vyd. 1. Praha: Policejní akademie České republiky v Praze. ISBN 9788072513215.
- MURPHY, Nick. 2006. *Surviving Disaster: Chernobyl Nuclear Disaster* [dokumentární film]. Velká Británie. Dostupné z: <https://youtu.be/yk3-XUe0oEU>
- Nařízení vlády č. 11/1999 Sb., o zóně havarijního plánování. In *Sbírka zákonů ČR*, ročník 1999, částka 4. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasaky/NV11_1999Sb.pdf [cit. 2016-04-16]. ISSN 1211-1244
- NRC. 2000. *Pictures: Physics- Atomic Energy Project*. National Research Council Canada [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://dr-dn.cisti-icist.nrc-cnrc.gc.ca/eng/browse/images/?cn=nrcarchivesphotographs&al=Physics-+Atomic+Energy+Project>

- OECD-NEA. 2002. *Chapter I The site and accident sequence*. OECD-NEA [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <https://www.oecd-neo.org/rp/chernobyl/c01.html>
- ORLOVE. 2014. *Clean Up Chernobyl, Get A Lada*. Jalopnik [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://jalopnik.com/clean-up-chernobyl-get-a-lada-1568956015>
- ÖSTERREICHER, Jan a Jiřina VÁVROVÁ. 2003. *Přednášky z radiobiologie*. 1. vyd. Praha: Manus. ISBN 80-86571-01-7.
- PAUL. 2013. *Timeline of events*. The Chernobyl Gallery [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://chernobylgallery.com/chernobyl-disaster/timeline/>
- PAVRDA. 2005. *Atomová elektrárna Černobyl*. [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.pavrdacz/ Chernobyl/>
- PERELTSVAIG, Asya. 2014. *Kyshtym-57: A Siberian Nuclear Disaster*. Languages Of The World [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.languagesoftheworld.info/russia-ukraine-and-the-caucasus/kyshtym-57-siberian-nuclear-disaster.html>
- PINCHUK, Natalia. 2014. *Chernobyl Accident Timeline*. What is nuclear. [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <https://whatisnuclear.com/ Chernobyl/timeline.html>
- POMFRET, D. G. 2000. *Safety and Dose Management During Decommissioning of a Fire Damaged Nuclear Reactor*. International Radiation Protection Association [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.irpa.net/irpa10/cdrom/00322.pdf>
- PORKÁT, Václav. 1986: *Tragická havárie v jaderné elektrárně Černobyl*. Požáry.cz [online]. 2011. [cit. 2016-04-61]. Dostupné z: <http://www.pozary.cz/clanek/6299-1986-tragicka-havarie-v-jaderne-elektrarne- Chernobyl/>
- PUCHNAR, Jiří. 2015. *Havárie v jaderných zařízeních 1: 50. léta*. OEnergetice.cz [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/zahranicni/nehody-v-jadernych-zarizenich-1-50-leta/>

- RYZÍ, Lukáš. 2012. *Černobylská havárie a její průběh*. Chernobylzone [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://chernobylzone.cz/cernobylsky-experiment-a-prubeh-havarie/>
- SAYGIN, Hasan. 2013. *Major Nuclear Accidents and Their Implications for the Evolution of Nuclear Power*. The Centre for Economics and Foreign Policy Studies [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: http://edam.org.tr/document/EDAMNukleer/NuclearReport2011_EN/section2.pdf
- SCHWARTZ, Patricia. 2014. *International Response – Nuclear Programs Post-Fukushima*. Fukushima. [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://fukushima.com/international-response/>
- SLIVYAK, Vladimir. 2014. *Russian Nuclear Industry Overview*. Earthlife Africa [online]. Moskva. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://earthlife.org.za/www/wp-content/uploads/2014/12/russian-nuc-ind-overview.pdf>
- STANDRING, Will. 2008. *StrålevernRapport: Mayak Health Report. Dose assessments and health of riverside residents close to “Mayak” PA*. Norwegian Radiation Protection Authority [online]. [cit. 2016-04-16]. ISSN 0804-4910. Dostupné z: <http://www.nrpa.no/dav/19bdfc616e.pdf>
- SÚJB: 2012. *Stručný přehled biologických účinků záření*. Státní úřad pro jadernou bezpečnost [online]. Praha [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/oznameni-a-informace/strucny-prehled-biologickych-ucinku-zareni/>
- SÚJB. 1996. *10 let od havárie v Černobyli*. Státní úřad pro jadernou bezpečnost [online]. Praha. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/10let_od_Cernobyli.pdf
- SÚRO. 2000. *Principy radiační ochrany*. Státní ústav radiační ochrany [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/principy-radiacni-ochrany>

TEPCO. ©1995-2016 *Challenges of TEPCO | Nuclear / TEPCO-Power Plants*. Tokyo Electric Company [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.tepco.co.jp/en/challenge/energy/nuclear/plants-e.html>

TEPCO. 2011. *Photos and Videos Library*. Tokyo Electric Company. [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://photo.tepco.co.jp/en/date/2011/201105-e/110519-02e.html>

TEPCO. 2013. *Photos and Videos Library*. Tokyo Electric Company. [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://photo.tepco.co.jp/en/date/2013/201302-e/130201-01e.html>

TŮMA, Jan. 2000. *Katastrofy techniky děsící 20. století*. Vyd. 1. Praha: Academia. ISBN 8020003878.

ULLMANN, Vojtěch. 2005. *V.: Astronuklfyzika* [online]. [cit. 2016-01-27]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz>

UNSCEAR. 2012. *UNSCEAR's assessments of the radiation effects* UNSCEAR [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.unscear.org/unscear/en/chernobyl.html>

U. S. NRC. 2013. *Backgrounder on the Three Mile Island Accident*. United States Nuclear Regulatory Commission [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html#summary>

Vyhláška č. 307/2002 Sb., Státního úřadu pro jadernou bezpečnost o radiační ochraně. In *Sbírka zákonů ČR*, ročník 2002, částka 113. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasaky/7_307_2002_Sb.pdf [cit. 2016-04-16]. ISSN 1211-1244

Vyhláška č. 318/2002 Sb., Státního úřadu pro jadernou bezpečnost o podrobnostech k zajištění havarijní připravenosti jaderných zařízení a pracovišť se zdroji ionizujícího záření a o požadavcích na obsah vnitřního havarijního plánu a havarijního řádu. In *Sbírka zákonů ČR*, ročník 2002, částka 116. Dostupné z:

https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasiky/9_318_2002_Sb.pdf
[cit. 2016-04-16]. ISSN 1211-1244

Vyhláška č. 328/2001 Sb., Ministerstva vnitra o některých podrobnostech zabezpečení integrovaného záchranného systému. In Sběrka zákonů ČR, ročník 2001, částka 127. Dostupné z: <https://portal.gov.cz/app/zakony/zakon.jsp?page=0&nr=328~2F2001&rpp=15#seznam> [cit. 2016-04-16]. ISSN 1211-1244

WAKEFORD, Richard. 2007. *The Windscale reactor accident—50 years on*. Journal of Radiological Protection [online]. 27(3), 211-215 [cit. 2016-04-20]. DOI: 10.1088/0952-4746/27/3/E02. ISSN 0952-4746. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0952-4746/27/i=3/a=E02?key=crossref.25805ff2e276f35ac77c8a2b63ced0f3>

WAGNER, Vladimír. 2015. *Fukušima I poté*. Vydání první. Praha: Novela bohémica. ISBN 9788087683453.

WIKIMAPIA. 2011. *Chelyabinsk-65 Plutonium Plant | nuclear reprocessing site*. Wikimapia. [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://wikimapia.org/8566136/Chelyabinsk-65-Plutonium-Plant#/photo/1492456>

WNA. 2010. *RBMK Reactors*. World Nuclear Association [online]. London. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/appendices/rbmk-reactors.aspx>

WNA. 2009. *Chernobyl Appendix 1: Sequence of Events*. World Nuclear Association [online]. London. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/appendices/chernobyl-accident-appendix-1-sequence-of-events.aspx>

WNA. 2001. *Three Mile Island Accident*. World Nuclear Association [online]. London. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/three-mile-island-accident.aspx>

Zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů. In Sběrka zákonů ČR, ročník 1997, částka 5. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/zakony/Atomovy_zakon_20150107.pdf [cit. 2016-04-16]. ISSN 1211-1244

7 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Distribuce a poločas přeměny ^{131}I , ^{90}Sr a ^{137}Cs	28
Tabulka 2: Radiosenzitivita orgánů	29
Tabulka 3: Reaktory ve JE Fukušima	42
Tabulka 4: Tabulka příčin a důsledků havárií	66

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Přírodní rozpadové řady	13
Obrázek 2: Stupnice INES	31
Obrázek 3: Schéma reaktoru RBMK	35
Obrázek 4: Letecký pohled na havarovaný 4. reaktor	39
Obrázek 5: Mapa depozice ¹³⁷ Cesia.....	41
Obrázek 6: Schéma reaktoru BWR v JE Fukušima	43
Obrázek 7: Zaplavený areál JE Fukušima Daiiči.....	44
Obrázek 8: Třetí blok JE Fukušima po výbuchu vodíku	47
Obrázek 9: Přepřacovatelský závod Majak	50
Obrázek 10: Východouralská radioaktivní stopa – EURT	52
Obrázek 11: Reaktor NRX.....	55
Obrázek 12: Schéma reaktoru ve Windscale	57
Obrázek 13: Hliníková palivová kazeta.....	58
Obrázek 14: Schéma reaktoru TMI-2	60
Obrázek 15: Konečný stav reaktoru TMI-2 po havárii.....	63
Obrázek 16: Demolice kontaminovaných domů v Goiânii	65