



Zdravotně
sociální fakulta
Faculty of Health
and Social Sciences

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

**Zhodnocení zavedení ochranného opatření – evakuace,
při havárii JE Fukušima**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: [Ochrana obyvatelstva](#)

Autor: Filip Sláma

Vedoucí práce: Mgr. Josef Kaňkovský

[České Budějovice 2020](#)

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci s názvem „**Zhodnocení zavedení ochranného opatření – evakuace, při havárii JE Fukušima**“ jsem vypracoval samostatně, pouze s použitím pramenů 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 bakalářské práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé bakalářské práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 02. 06. 2020

.....

podpis

Poděkování

Rád bych vyjádřil poděkování svému vedoucímu práce panu Mgr. Josefovi Kaňkovskému za rady, připomínky a věnovaný čas. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za její podporu, kterou mi věnovala po celou dobu studia.

Zhodnocení zavedení ochranného opatření – evakuace, při havárii JE Fukušima

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je zhodnotit ochranná opatření, především pak evakuaci obyvatelstva, její vývoj a průběh. K dosažení cíle bakalářské práce byla stanovena výzkumná otázka: Byla dostatečná ochranná opatření a následný postup při evakuaci osob z evakuačních zón?

Teoretická část je věnována především problematice jaderných elektráren, radiační ochraně a evakuaci. Jsou zde popsány děje, které se odehrály přímo na jaderné elektrárně Fukušima I Daiči od úderu zemětřesení a tsunami, až po vyvrcholení událostí na jednotlivých reaktorech.

Ve výzkumné části se práce zabývá vývojem evakuace v evakuačních zónách a v samotné jaderné elektrárně. Dále jsou popsána následná ochranná opatření, následky a situace po havárii až po současnost. Metodikou této práce bylo shromažďování dostupných informací z oficiálních zahraničních zdrojů, legislativních dokumentů, ale také i z publikací odborníků.

Zpracování dostupných informací a zhodnocení následků evakuace přineslo nepříjemné zjištění. Ztráty na životech, které člověka určitým způsobem donutí zamyslet se nad výběrem osob vhodných k evakuaci. V této práci byly mimo jiné zjištěny a zmíněny technické nedostatky elektrárny, informační pochybení v komunikaci obyvatelstva a v poslední řadě i pochybení lidského faktoru.

Práce může být využita ve všeobecné problematice jaderných elektráren a evakuací pro studijní účely nebo jako informační zdroj ve školství, energetice nebo státní správě.

Klíčová slova

Fukušima; reaktor; havárie; evakuace; záření; jaderná elektrárna; Japonsko; katastrofa

Evaluation of introduction protection measures – evacuation at crash of Nuclear power station Fukushima

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to evaluate the protective measures, notably the evacuation of the population, its development and progress. To achieve the goal of bachelor's work was determined by the research question: Was the safeguard measures and the subsequent procedure for the evacuation of persons from the evacuation zones sufficient?

The theoretical part is focused on the particular issue of nuclear power plants, radiation protection and evacuation. The situation described here, which took place directly on the Fukushima daiichi nuclear power plant Daiichi, from the strike of the earthquake and tsunami, after the gradation events in the individual reactors.

The research part is about the development of the evacuation in the evacuation zones and the nuclear power plant. Protective measures are described here, and even the consequences and the situation after the crash to the present. The methodology of this work was the gathering of available information from official foreign sources, legislative documents, but also of the publications of the experts.

Processing of the available information and the evaluation of the consequences of the evacuation has brought unpleasant findings. The loss of life, which can make a person look a certain way to reflect over the selection of persons suitable to evacuate. In this work were identified and discussed technical shortcomings of the power plant, the information misconduct in communication of the population and in the last row and misconduct of the human factor.

The thesis can be used in the general issue of nuclear power plants and evacuation for study purposes or as an information source in the education, energy or public administration.

Keywords

Fukushima; reactor; crash; evacuation; radiation; nuclear power station; japan; disaster

Obsah

Úvod.....	7
1 Teoretická část.....	8
1.1. Reaktor	8
1.2. Ochrana a bezpečnost	11
1.3. Vznik havárie JE Fukušima I Daiči	12
1.3.1. Zemětřesení a vlna tsunami	12
1.3.2. Selhání chlazení reaktoru.....	12
1.4. Ionizující záření.....	15
1.4.1. Veličiny a jednotky ionizujícího záření.....	16
1.4.2. Expozice obyvatelstva.....	20
1.4.3. Biologické účinky záření.....	23
1.4.4. Detekce ionizujícího záření	26
1.5. Radioaktivita ve Fukušimě	27
1.6. Nejzávažnější havárie jaderných elektráren	27
1.7. Evakuace.....	30
1.8. Ochranná opatření při radiční mimořádné události.....	33
2 Cíl práce a výzkumná otázka.....	35
3 Metodika výzkumu.....	36
4 Výsledky.....	37
4.1. Průběh evakuace obyvatel.....	37
4.1.1. Evakuace v elektrárně.....	38
4.2. Následky.....	39
4.3. Současná situace	41
4.3.1. Zdravotní dopady.....	46
4.3.2. Osud elektráren Fukušima	47
5 Diskuze	49
6 Závěr.....	54
Použitá literatura	55
Seznam obrázků.....	60
Seznam zkratk.....	61

Úvod

Bakalářská práce nesoucí název „*Zhodnocení zavedení ochranného opatření – evakuace, při havárii JE Fukušima*“ se zabývá zhodnocením evakuace při havárii v jaderné elektrárně Fukušima Daiči I. Vybral jsem si ji z důvodu, abych poukázal na faktory, které nejen způsobily havárii, ale i na samotný průběh a následky evakuace z havarijní zóny elektrárny. Havárie ve Fukušimě se stala 11. března 2011 v Japonsku a řadí se mezi největší jaderné havárie v historii stejně jako Černobyl z roku 1986. Ačkoliv tato událost nebyla způsobena přímo technickou chybou nebo lidským pochybením, ale přírodní katastrofou, najdeme zde však zásadní body, které byly ovlivněny lidským faktorem a událost mohla mít pravděpodobně jiný průběh. V této závěrečné práci je třeba vzít v potaz, že Japonsko bylo poměrně na velkém území zasaženo zemětřesením a vlnou tsunami, následná situace ve Fukušimě velmi ovlivnila a zkomplikovala záchranné práce a samotnou evakuaci.

V dnešní době, i přes zesilující vliv energetiky obnovitelných zdrojů, je jaderná energie v popředí a velmi využívána. Během 20. století došlo k mnoha haváriím různého rozsahu na jaderných elektrárnách po celém světě. Každá zkušenost, i přesto, že je negativní, má svůj přínos a rozhoduje o dalším vývoji a využití jaderné energie, která má obrovský potenciál v energetice celého světa. Bohužel většina z těchto havárií má negativní dopad na přírodu, a lidské ztráty nejsou výjimkou.

1 Teoretická část

Teoretická část bakalářské práce se zabývá charakteristikou jaderné elektrárny Fukušima Daiči v Japonsku. Obsahuje popis jaderného reaktoru, jeho funkce a ionizující záření. Dále jsou zde popsány události, které se udály těsně před a po úderu přírodní katastrofy na jadernou elektrárnu a jak se vyvíjela situace na jednotlivých reaktorových blocích. V dalších kapitolách je zmíněné ionizující záření a jeho účinky, dále radioaktivita ve Fukušimě, jaderné havárie nebo evakuace obyvatelstva.

Jaderná elektrárna Fukušima Daiči se nachází na východním pobřeží japonského ostrova Honšú v prefektuře Fukušima o rozloze 3,5 km² na území města Okuma a Futaba. Výstavba započala 25. června 1967 a 26. března 1971 bylo poprvé uvedeno do provozu všech šest reaktorů. Provozovatelem a vlastníkem jaderné elektrárny je japonská společnost Tokyo Electric Power Company (dále jen TEPCO). Jižně od Fukušima Daiči I se nachází ve vzdálenosti 12 km sesterská elektrárna Fukušima II, které má pouze čtyři reaktory a patří také společnosti TEPCO. (Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, 2019)

1.1. Reaktor

Jaderný reaktor je zařízení pro získávání jaderné energie, která je primárně využívána pro výrobu elektrické energie nebo pro potřeby vědy a vzdělávání. Jaderná energie se získává pomocí štěpení těžkých jader uranu, plutonia a dalších. V tomto případě mluvíme o štěpném jaderném reaktoru. Než bude popsán reaktor ve Fukušimě, je třeba si rozdělit typy jaderných reaktorů. Možností rozdělení se nabízí hned několik, ale z hlediska komerčních reaktorů užívaných v elektrárnách je můžeme rozdělit podle chladiva a moderátoru jako je uvedeno v tabulce 1. (Nuclear Power Reactors, 2018)

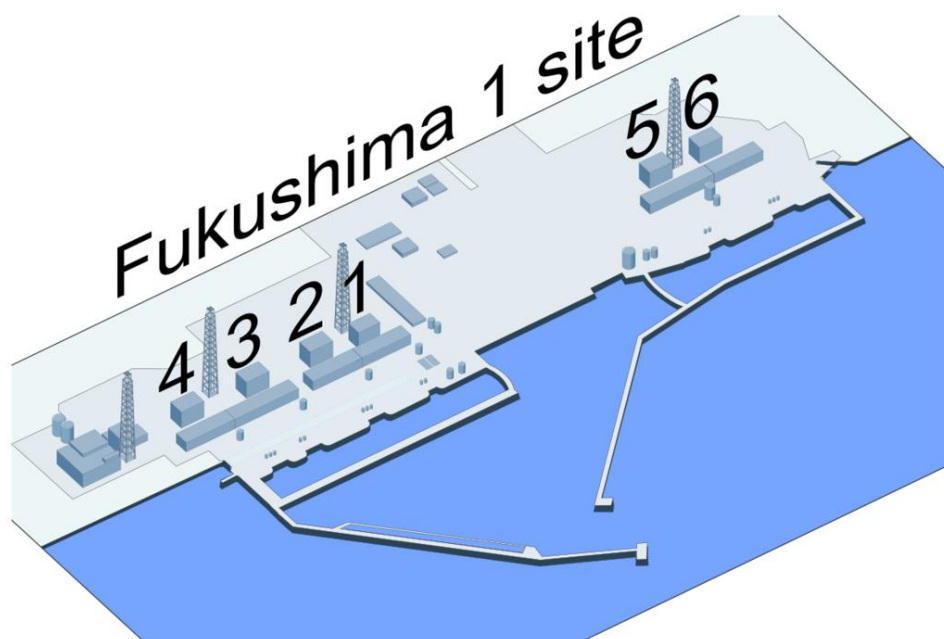
Tabulka 1 Základní typy komerčních jaderných reaktorů

Typ reaktoru	Stát provozovatele	Počet	Výkon [GWe]	Palivo	Chladivo	Moderátor
Tlakovodní reaktor (PWR)	USA, Francie, Japonsko, Rusko, Čína	282	264	obohacený UO ₂	voda	voda
Varný reaktor (BWR)	USA, Japonsko, Švédsko	78	75	obohacený UO ₂	voda	voda

Těžkovodní reaktor (PHWR)	Kanada, Indie	49	25	přírodní UO ₂ ,	těžká voda	těžká voda
Plynem chlazený reaktor (AGR, Magnox)	Velká Británie	14	8	přírodní (kovový) uran, obohacený UO ₂	CO ₂	grafit
Lehkovodní grafitový reaktor (RBMK)	Rusko	11+4	10,2	obohacený UO ₂	voda	grafit
Rychlý množivý reaktor (FBR)	Rusko	3	1,4	směs PuO ₂ a UO ₂	tekutý sodík	-

Zdroj: (Základní typy jaderných reaktorů, 2019)

V jaderné elektrárně Fukušima se jedná typově o varné reaktory s označením BWR (Boiling Water Reactor), které patří mezi druhé nejrozšířenější reaktory a představují zhruba 18 % celkového množství aplikovaných reaktorů v jaderných elektrárnách na světě. Palivem jsou palivové tyče, které obsahují oxid uranický v tabletové formě, kde se jedná o mírně obohacený uran. Výměna paliva se provádí při odstavení reaktoru, zpravidla jednou za 12 až 18 měsíců. Chladivem a moderátorem je voda, která se přivádí až do bodu varu a v tlakové nádobě se poté shromažďuje jako pára. (Základní typy jaderných reaktorů, 2019)



Obrázek 1 Reaktory Fukušima I (Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, 2019)

Jaderná elektrárna Fukušima patřila mezi patnáct nejvýkonnějších elektráren na světě, a to díky celkovému výkonu 4 696 MW, který zajišťovalo šest varných reaktorů (obr.1). V tabulce 2 jsou uvedeny jednotlivé výkony varných reaktorů. (REACTORS IN OPERATION, 2009)

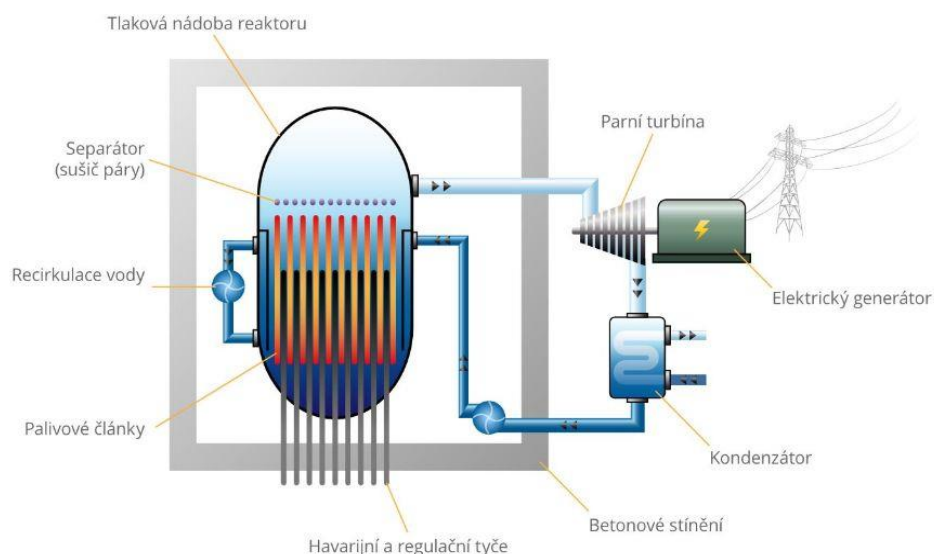
Tabulka 2 Základní informace o blocích

Blok	Typ	Výkon	Dodavatel
1	BWR-3	460 MW	General Electric
2	BWR-4	784 MW	General Electric
3	BWR-4	784 MW	Toshiba
4	BWR-4	784 MW	Hitachi
5	BWR-4	784 MW	Toshiba
6	BWR-5	1 100 MW	General Electric

zdroj: REACTORS IN OPERATING, 2009

Na obrázku 2 vidíme funkci varného reaktoru. V tlakové nádobě dochází k ohřevu vody až do bodu varu, kdy se v horní části začne hromadit pára. Pomocí separátoru se z páry odstraňuje vlhkost, následně je pára přiváděna přímo do parní turbíny, která pohání elektrický generátor. Pára je zachycena v kondenzátoru, kde po ochlazení zkapalní a vrací se zpět do okruhu. Voda je v systému cirkulována pomocí čerpadel a chlazená v chladících věžích. (Jaderná energetika, 2004)

VARNÝ REAKTOR BWR



Obrázek 2 Varný reaktor (Základní typy jaderných reaktorů, 2019)

1.2. Ochrana a bezpečnost

Člověk je po celý svůj život vystavován ionizujícímu záření, a to především z přírodních zdrojů. Mezi tyto zdroje patří kosmické záření, zemská půda, vzduch nebo i potraviny. Umělému záření, např. televizní obrazovky, počítačové monitory nebo aplikace v lékařství, je člověk v dnešní době vystavován skoro denně. Způsoby, jak se chránit před ionizujícím zářením je několik:

- Dodržování dostatečné vzdálenosti od zdroje záření
- Minimální doba pobytu v blízkosti zdroje záření
- Ochrana odstíněním – použití vrstvy vhodného materiálu (beton, kov)

V případě jaderných elektráren se jedná o ochranné bariéry, které jsou konstruovány tak, aby v případě nehody chránily pracovníky a okolí. Struktura jaderného paliva a palivových článků je hermeticky uzavřena, aby nedocházelo k úniku štěpných produktů. Samotný reaktor, tlaková nádoba a potrubí jsou uschovány v železobetonové šachtě, které odolává vysokým teplotám a radiační zátěži. Celý tento primární okruh je hermeticky uzavřen v tzv. kontejnmentu. Jedná se o železobetonovou

konstrukci, jejímž úkolem je zabránění úniku radioaktivity do okolí. (Jaderná a radiační bezpečnost, 2004)

Jaderná bezpečnost

Provoz na jaderných elektrárnách je při jejich nehodách nebo haváriích spojen s ohrožením životního prostředí, majetku, zdraví a života lidí. Události závažných havárií na jaderných zařízeních tento fakt jen potvrzují. Z tohoto důvodu je celá problematika jaderné bezpečnosti nejen v České republice, ale i na celém světě, regulována zákony. V České republice se bezpečnost provozu na jaderných elektrárnách opírá o atomový zákon. Tento zákon definuje jadernou bezpečnost jako stav a schopnost zařízení s jaderným provozem zabránit nekontrolované štěpné řetězové reakci nebo k nedovolenému úniku radioaktivních látek či ionizujícího záření do životního prostředí, a tím omezit následky nehod. (Urbančík, 2015)

1.3. Vznik havárie JE Fukušima I Daiči

V této kapitole jsou uvedeny děje od vzniku zemětřesení, až po ty, které předcházely vzniku havárií na jaderných reaktorech.

1.3.1. Zemětřesení a vlna tsunami

K zemětřesení došlo 11. dubna 2011 ve 14:46 japonského standardního času (dále jen JST) o síle 8,9 stupňů Rychterovy škály na severovýchodě Japonska s epicentrem vzdáleném 130 km od ostrova Honšú, které patřilo k nejsilnějším zemětřesením v historii. Následovala vlna tsunami dosahující až 38 metrů, která postihla část Japonska. Příčinou zemětřesení bylo uvolnění velmi vysokého tlaku mezi Pacifickou a Honšú deskou v místě jejich vzájemnému podsouvání. Pacifická deska se pohybuje poměrně rychle, až o několik centimetrů ročně, vytváří tlak na menší desku a to způsobuje občas poměrně silné otřesy. Zemětřesení v roce 2011 udeřilo na povrchu energií 9320 gigatun TNT, což odpovídá více jak 400 miliónům atomových bomb svržených na Hirošimu za druhé světové války v roce 1945. (Japan Earthquake & Tsunami of 2011: Facts and Information, 2017)

1.3.2. Selhání chlazení reaktoru

Jadernou elektrárnu zasáhla vlna dosahující 15 metrů a zaplavila celý objekt. Bloky reaktorů 1, 2 a 3 byly po silných otřesech a následnou výstrahou před vlnou tsunami

automaticky vypnuty. Zbývající bloky 4, 5 a 6 byly již odstavené před katastrofou z důvodu údržby a na čtvrtém probíhala výměna paliva. Reaktory byly konstruovány tak, aby ustály velmi silná zemětřesení, což se v tomto případě potvrdilo, ale bylo nutné je dochlazovat palivo. Systém chladicích čerpadel byl poháněn z rozvodných sítí nebo pomocí záložních generátorů, tak aby bylo možné ochlazovat palivo v reaktorech. (Fukushima Daiichi Accident, 2018)

První reaktor

Havarijní dochlazování se lišilo u prvního, který byl staršího typu a byl chlazen pouze pomocí kondenzátoru. Vlna tsunami v 15:41 JST zničila diesellové agregáty, a tím přerušila dodávku elektrické energie pro systém havarijního dochlazování. Kdyby byla včas zajištěna dodávka elektrického proudu, bylo možné pokračovat v chlazení. Brzy došlo k vybití záložních baterií a během krátké doby bylo chlazení neefektivní. V reaktoru 1 začala prudce stoupat teplota a došlo k hromadění vodíku. Reakce s povlakem palivových článků ze zirkonia měla za následek vysoký tlak v kontejnmentu a hromadění vodíku. Následující den byl tlak v kontejnmentu velmi vysoký, a v 4:00 JST přestalo fungovat i chlazení pomocí kondenzátoru. Bylo bezpodmínečně nutné vypustit vodík a páru z kontejnmentu, aby se snížil tlak a zároveň se mohla dovnitř čerpat voda. Čekalo se na rozhodnutí japonské vlády a v 5:30 začalo vypouštění vodíku. V 15:36 JST však došlo k explozi vodíku v horní části budovy prvního reaktoru, a až o pět hodin později se podařilo začít chladit reaktor pomocí mořské vody, která se po snížení tlaku mohla čerpat dovnitř. (Jak se chladí reaktory jaderné elektrárny Fukušima 1, 2011)

Druhý reaktor

Druhý a třetí blok má varné reaktory novější generace, které mají systém izolovaného dochlazování aktivní zóny – Reactor Core Isolation Cooling (dále jen RCIC). Tento typ chlazení je složen z turbočerpadla, které přivádí pod tlakem vodu ze spodní části kontejnmentu do nádoby reaktoru. Spodní část kontejnmentu s tisíci tunami vody k ochlazování je určena i pro kondenzaci páry z turbíny, tudíž teplo z páry postupně ohřívá i samotnou vodu k ochlazování. Tato situace se stává kritickou, pokud by se teplota vody blížila k bodu varu. Bohužel u druhého reaktoru nebylo chlazení úplně stabilní a brzy začal tlak narůstat. 13. března v 11:00 JST bylo nutné upouštět zvýšený tlak páry. Zhruba 24 hodin vydržel systém RCIC fungovat, pak následovalo

čerpání mořské vody. Nakonec byly poškozeny palivové články a následující den došlo pravděpodobně k dalšímu výbuchu v elektrárně Fukušima. Vlivem poškození kontejnmentu došlo k zásadnímu úniku radioaktivních látek do okolí. (RCIC: Reactor Core Isolation Cooling, 2019; Jak se chladí reaktory jaderné elektrárny Fukušima 1, 2011)

Třetí reaktor

U třetího reaktoru systém izolovaného chlazení fungoval kratší dobu než u druhého, a to do 13. března 2:42. V tu dobu bylo vypnuto chlazení, aby bylo možné vstříkovat vodu do reaktoru vnějšími stříkačkami. Bohužel vstříkování se nepodařilo zajistit a nepovedlo se ani nahodit zpět systém chlazení. Kvůli zvyšující se teplotě a tlaku bylo 13. března v 8:41 JST nutné vypouštět páru z reaktoru a pumpovat mořskou vodu dovnitř. Avšak k výbuchu došlo následující den v 11:01 JST. Tato exploze zranila jedenáct pracovníků, zničila dvě stříkačky, několik generátorů a poškodila hadice se zařízením pro čerpání mořské vody. (Wagner, 2015)

Čtvrtý reaktor

Čtvrtý reaktor byl sice odstavený z důvodu výměny paliva, ale představoval možný problém. Palivové články, uloženy v horní části kontejnmentu, obsahovaly nejvíce vyhořelého paliva a bylo nutné je a stále dochlazovat. Aby bylo možné ochlazovat palivo v bazénech, bylo třeba zajistit cirkulaci vody pomocí vodních pump a stříkaček. Tento reaktor měl společný ventilační systém se třetím reaktorem. Unikající vodík se přes ventilaci dostal až do čtvrtého reaktoru, kde se začal nebezpečně hromadit. V ranních hodinách dne 15. března došlo k výbuchu, který nasazené pracovníky nejvíce rozrušil. Nikdo v té době netušil, že se jedná o nahromaděný vodík z třetího bloku a v první moment se předpokládalo, že za výbuchem stojí čerstvě uložené palivo. (Wagner, 2015)

Pátý a šestý reaktor

U zbývajících reaktorů 4 a 5 nebyly zjištěny žádné komplikace, jelikož byly z důvodů údržby odstaveny před samotnou havárií. Jejich vyprodukovaný tepelný výkon byl mnohem nižší než u ostatních, a navíc jeden diesellový agregát byl po tsunami funkční, takže reaktory byly zabezpečeny elektrickou energií pro ochlazovací systém.

Po přivedení elektrické rozvodové sítě byly oba reaktory plně pod kontrolou. (Jak se chladí reaktory jaderné elektrárny Fukušima 1, 2011)

Černobyl a Fukušima

Pokud porovnáme havárie na jaderných elektrárnách v Černobylu a Fukušimě, je třeba si připomenout základní rozdíly. Při havárii v Černobylu došlo ke dvěma výbuchům přímo v reaktoru. Jelikož černobylský reaktor nebyl umístěn v kontejnmentu, došlo kvůli tomu k rozmetání paliva do okolí, radioaktivita se dostala do poměrně velkých vzdáleností a vystoupala velmi vysoko. Oproti tomu reaktory ve Fukušimě byly opatřeny kontejnmenty, které ochránily reaktory, a byla tím zajištěna ochrana i před únikem radiace. Avšak určitá netěsnost byla u druhého bloku reaktoru Fukušimy. K explozím došlo kvůli nahromaděnému vodíku, který se dostal do budov reaktoru při vypouštění tlaku, a i do společného ventilačního systému. (Je Fukušima jako Černobyl, 2011)

1.4. Ionizující záření

Radionuklidy jsou atomy s nestabilním jádrem, které se přeměňují a uvolňují energii v podobě záření. Vzniklá energie je schopna ostatní atomy ionizovat. Ionizací rozumíme určitý proces, při kterém atom získává kladný či záporný náboj v případě, kdy dojde k příjmu nebo ke ztrátě elektronu. Toto záření má dostatečnou energii, se kterou může odtrhnout elektron z jeho dráhy a vznikají tím pádem ionty – nabitě atomy. Některé radionuklidy jsou více nestabilní. Doba, za kterou se množství určitého nestabilního prvku přemění na polovinu, se nazývá poločasem přeměny. U rozpadového děje mluvíme o poločase rozpadu. (Ionizující záření, 2016)

U ionizujícího záření rozlišujeme dva druhy – přímo ionizující a nepřímo ionizující. Zatímco částice přímo ionizujícího záření mají elektrický náboj, částice u nepřímo ionizujícího záření náboj nemají. V tabulce 2 můžeme vidět přehled druhů záření a jaký mají charakter.

Tabulka 2 - Přehled druhu ionizujícího záření

druh záření	částicové	elektromagnetické
přímo ionizující	elektrony protony deuterony částice alfa těžké ionty	
nepřímo ionizující	neutrony	fotony RTG záření fotony záření gama

Zdroj: (Radiační ochrana pro radiologické asistenty, 2009)

1.4.1. Veličiny a jednotky ionizujícího záření

Aktivita

Aktivita je důležitou veličinou a určuje nám počet radioaktivních přeměn v radioaktivní látce za jednotku času. Jedná se tedy o poměr středního počtu samovolných radioaktivních přeměn v daném množství radioaktivní látky dN a časového intervalu dt . Podle vztahu $A = A_0 e^{-\gamma t}$, aktivita A radioaktivní látky klesá exponenciálně s časem t . A_0 určuje aktivitu v čase $t = 0$ a γ je konstanta přeměny radionuklidu. Jednotkou aktivity je s^{-1} , ale používá se název *becquerel* – Bq .

Dále platí $\gamma = \frac{\ln 2}{T_{\frac{1}{2}}}$, kde $T_{\frac{1}{2}}$ značí fyzikální poločas přeměny radionuklidu.

Jednotkou měrné aktivity je $Bq.kg^{-1}$, který se vztahuje k hmotnosti zářiče, u plošné aktivity u plošných zdrojů záření $Bq.m^{-2}$ a u objemové aktivity objemových zdrojů záření $Bq.m^{-3}$. (HUŠÁK, 2009)

Absorbovaná dávka

Absorbovaná dávka D je definována vztahem $D = \frac{d\varepsilon}{dm}$ jako poměr střední energie ionizujícího záření $d\varepsilon$ předané elementu ozářené látky a hmotnosti daného elementu dm . Jednotkou této dávky je *gray* (Gy), který vyjadřuje joule na kilogram ($J.kg^{-1}$). Jednodušeji lze říct, že dávka D je energie záření absorbovaná v jednotce hmotnosti v určitém místě ozářené látky. V radiační ochraně, radiologii a radiobiologii se na základě této dávky D zkoumá biologický účinek záření. (HUŠÁK, 2009)

Absorbovaná dávka D je dobře měřitelná fyzikální veličina. Předaná energie $d\varepsilon$ se v dozimetrii vztahuje na makroskopické objemy, např. mnohonásobně převyšující

objem buňky ve tkáni. Dávka je vymezena v každém bodě a je průměrovaná přes dm - objemový element, tedy přes mnoho atomů a molekul látky. V praktických aplikacích se dávka D často uvažuje ve větších objemech o hmotnosti m . Dávky nelze sčítat, pokud byla energie předána na různých místech látky. Pokud by například radiologický pracovník obdržel dávku 5 mGy na levé i pravé ruce a nelze tvrdit, že obdržel celkovou dávku 10 mGy . (HUŠÁK, 2009)

Lineární přenos energie LET

Absorbovaná dávka v sobě neobsahuje bezprostřední lokální rozložení energie, která se přenesla na látku. Ta může ovlivnit konkrétní procesy fyzikálních a chemických účinků ionizujícího záření, především pak biologické účinky. Dochází k určité míře ztráty energie podél dráhy pronikající částice, ale také k brždění a hustotě vytvářených iontů. Lineární přenos energie L představuje střední energii ΔE předanou nabitou částicí elektronům a iontům v určitém místě látky, vztaženou na dráhu částice Δx . Základní jednotka veličiny L je $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}$, ale v praxi se používá $\text{V}/\mu\text{m}$. (ULLMANN, 2009)

$$L = \frac{\Delta E}{\Delta x}$$

Dávkový příkon

Dávkový příkon D je dán vztahem $D = \frac{dD}{dt}$ a vyjadřuje přírůstek dávky za jednotku času. Jednotkou dávkového příkonu je $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$. (HUŠÁK, 2009)

Kerma

Tato veličina se používá v souvislosti s nepřímo ionizujícím zářením a je shodná s absorbovanou dávkou. Kerma je definována vztahem $\frac{dE_k}{dm}$, kde dE_k je součet počátečních kinetických energií nabitých částic uvolněných ionizujícími nenabitými částicemi v určitém objemu látky o hmotnosti dm . Jednotkou je Gy , stejně jako u absorbované dávky. (HUŠÁK, 2009)

Ekvivalentní dávka

Označuje se jako H_T a představuje součin radiačního váhového faktoru W_R a střední absorbované dávky D_{TR} v orgánu nebo tkáni a jednotkou je $J.kg^{-1}$, která se nazývá *sievert* (Sv).

$$H_{t=W_R} \cdot D_{TR}$$

Bezrozměrný radiační váhový faktor W_R je odvozen od relativní biologické účinnosti (RBÚ), která se používá jen v radiobiologii a udává poměr dvou druhů záření potřebných k vyvolání stejného biologického účinku. Radiační váhové faktory jsou pevné hodnoty RBÚ pro účely radiační ochrany pro oblast stochastických účinků a nízkých dávek. (HUŠÁK, 2009)

Dávkový ekvivalent

Je dán součinem absorbované dávky D a bezrozměrného jakostního činitele Q vyjadřujícího rozdílnou biologickou účinnost různých druhů ionizujícího záření.

$$H = D_T \cdot Q$$

Stejně jako u radiačního váhového faktoru je jakostní činitel Q pro určitý druh záření pevnou hodnotou RBÚ v rámci radiační ochrany. Tento činitel se použije na absorbovanou dávku v bodě určité látky, např. ve tkáních nebo ve vzduchu. Dávkový ekvivalent se využívá v osobní dozimetrii a v pracovním prostředí, kde se nacházejí zdroje ionizujícího záření. Pro účely radiační ochrany byly zavedeny odvozené limity, které jsou důležité hlavně v osobní dozimetrii pracovníků. Pro zevní ozáření byl stanoven osobní dávkový ekvivalent $H_p(0,07)$ v hloubce tkáně $0,07 \text{ mm}$ a osobní dávkový ekvivalent $H_p(10)$ v hloubce tkáně 10 mm pod povrchem těla. Uvedené veličiny a jednotky, tak i limity ozáření se v radiační ochraně vztahují k vnějšímu ozáření a k ozáření z vnitřních zdrojů jako kontaminace radioaktivními látkami nebo podáním radiofarmaka pacientům v nukleární medicíně. (HUŠÁK, 2009)

Efektivní dávka

Efektivní dávka E je součtem součinů tkáňových váhových faktorů W_T a ekvivalentních dávek H_T v ozářených tkáních o orgánech T .

$$E = \sum W_T H_T$$

Při rovnoměrném ozáření celého těla představují tkáňové váhové faktory relativní příspěvky tkání a orgánů k celkové újmě ze stochastických účinků. Jinými slovy,

tkáňové váhové faktory vyjadřují rozdílnou citlivost orgánů a tkání vůči záření, které mohou vést ke vzniku zhoubných nádorů a genetických změn. (HUŠÁK, 2009)

Tabulka 3 - Doporučené tkáňové faktory podle ICRP 103

Tkáň	W_T	ΣW_T
červená kostní dřeň	0,12	0,72
střevo		
plíce		
žaludek		
mléčná žláza		
další tkáně*		
gonády	0,08	0,08
močový měchýř	0,04	0,16
játra		
jícen		
štítná žláza		
povrch kostí	0,01	0,04
mozek		
slinná žláza		
kůže		
Součet tkáňových váh. faktorů		1,00

Zdroj: (Doporučení Mezinárodní komise radiologické ochrany, 2007)

*mezi další tkáně a orgány řadíme nadledvinky, horní cesty dýchací, žlučník, srdce, ledviny, lymfatické uzliny, svalstvo, sliznice dutiny ústní, slinivka, prostata, tenké střevo, slezina, brzlík a děloha. (Doporučení Mezinárodní komise radiologické ochrany, 2007)

Úvazek efektivní dávky

Při vnějším ozáření organismu dochází k přenosu energie v době, kdy se objekt nachází v poli záření. V případě radionuklidu, který se nachází v organismu, je ozáření rozložené v čase od vstupu do těla a mění se podle distribuce, vylučování a radioaktivní přeměny. V rámci časové závislosti byl zaveden pro účel limitování ozáření od vnitřních zdrojů v organismu úvazek ekvivalentní a efektivní dávky. Úvazek ekvivalentní dávky $H_T(\tau)$ pro tkáň T je definován podle vztahu $H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} H'_T(t) dt$,

kde t_0 je čas jednorázového příjmu dávky, H'_T je příkon ekvivalentní dávky pro tkáň T v čase t a τ je čas, který uplynul od příjmu látky. Integrační doba pro radiační pracovníky je 50 let, pro obyvatelstvo se konzervativně používá 70 let, aby se to týkalo i malých dětí. Pokud vynásobíme odpovídající tkáňové váhové faktory a sumaci přes všechny tkáně a orgány, dostane úvazek efektivní dávky. (ZABEZPEČENÍ OSOBNÍHO MONITOROVÁNÍ PŘI ČINNOSTECH VEDOUCÍCH K OZÁŘENÍ, 2005)

$$E_{(\tau)} = \sum_T W_T \times H_T(\tau)$$

Kolektivní dávka

Představuje součet všech efektivních dávek osob skupiny či populace.

1.4.2. Expozice obyvatelstva

Přírodní záření je ovlivněno dvěma odlišnými zdroji – kosmickým zářením a přírodními radionuklidy. Kosmické záření dopadá na zemskou atmosféru, kde vzniká jeho primární složka složená především z protonů, dále pak z částic alfa, elektronů a těžkých jader. Vlivem primárního záření dochází k jaderným reakcím na jádrech a elektronových obalech atomů v atmosféře a vzniká sekundární složka záření. S rostoucí nadmořskou výškou roste i radiační zátěž. Dávkový příkon na hladině moře je přibližně $0,03 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ a za každých 1800 m nadmořské výšky se příkon zdvojnásobuje. V České republice se průměrná roční efektivní dávka z kosmického záření odhaduje na 0,3 mSv. (HUŠÁK, 2009)

Přírodní radionuklidy se vyskytují ve všech složkách zemského prostředí a můžeme je rozdělit do skupin:

- Kosmogenní radionuklidy – vznikají průběžně při interakci kosmického záření ve vnější atmosféře Země (např. ^{14}C)
- Prvotní radionuklidy – pocházejí z brzkých stádií vesmíru a z důvodu dlouhého poločasu přeměny většího než 10^8 roků, se stále vyskytují v nezanedbatelném množství (např. ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{87}Rb)
- Sekundární radionuklidy – vznikají z prvotních radionuklidů tvořících rozpadové řady (v uran-radiové řadě ^{238}U je nejvýznamnější ^{226}Ra)

Obsah prvotních radionuklidů v horninách určuje vnější ozáření člověka na volném prostranství.

Vnější ozáření

Zevní ozáření z 50 % ovlivňuje celkovou efektivní dávku obyvatel a je tedy poměrně důležitou expoziční cestou. Hlavními zdroji záření jsou především přírodní záření a zdravotnické expozice. Jen malá část je zastoupena v podobě úniku uměle vytvořených radionuklidů do životního prostředí nebo řízenému uvolňování (havárie, jaderné testy). U lidí, kteří pracují se zdroji ionizujícího záření, je podíl zevního ozáření na kolektivní dávce ještě vyšší. Tyto pracoviště s uzavřenými zdroji a generátory záření jsou jedinou expoziční cestou. Ochrana, která redukuje individuální zevní ozáření, vychází ze základních principů – ochrana časem, vzdáleností a stíněním. Při redukci kolektivní dávky je využíváno snížení počtu ozářených osob. (Klener, 2000)

Nejdůležitější je snížit pravděpodobnost vzniku stochastických účinků a zamezit vzniku deterministických poškození. Stochastické účinky se projevují rakovinami a genetickými změnami, a k jejich vzniku postačí pravděpodobně malá dávka. Deterministické účinky vznikají při ozáření tkáně dávkou větší, než je prahová dávka, která postačí k buněčnému úbytku. Při vyšší dávce celotělového ozáření s dostatečnou distribucí dochází k nemoci z ozáření. Akutní nemoc z ozáření není běžnou situací a denně se s ní v radiační ochraně nesetkáme. Částečná nebo lokální ozáření se projevují na omezeném místě ozářené tkáně. V rámci radiační ochrany se pracuje především s převodem efektivní kolektivní dávky na vznik zdravotních potíží v ozářené skupině lidí. (Klener, 2000)

Vnitřní ozáření

Jedná se ionizující záření vyvolané radionuklidy, které jsou přítomny v živém organismu. Radionuklidy se do těla dostávají ingescí (ústa – trávicí trakt), inhalací (vdechnutím), vstupem přes porušenou kůži nebo absorpcí přes neporaněnou kůži. Odhad dávek je složitější než u vnějšího ozáření, jelikož je nelze měřit přímo, distribuce a chování radionuklidu mohou být různé a mohou se lišit v čase. Závisí i na fyzikální a chemické formě radionuklidu. Mezi zdroje dávek vnitřní kontaminace patří i přírodní radionuklidy radonu. Mezi umělé radionuklidy, které se dostaly do prostředí, můžeme zařadit úniky v důsledku jaderných zkoušek v 50. a 60. letech minulého století. (Klener, 2000)

Nejvýznamnějším izotopem z hlediska ingesce je biogenní draslík ^{40}K , jehož měrná aktivita v lidském těle je 55 Bq/kg a je shodná u všech osob, což odpovídá roční efektivní dávce 0,17 mSv. Inertní plyn ^{222}Rn , který má poločas přeměny 3,8 dne se

difúzí uvolňuje z pevných látek do vzduchu. Radon vychází z radioaktivní přeměny ^{226}Ra , která má poločas 1600 let. Radium je výsledným produktem postupné radioaktivní přeměny uranu, který se nachází v různorodém množství v zemské kůře. Přírodní ozáření člověka je stálou a relativně málo proměnlivě významnou složkou, která se přidružuje k ozáření populace z umělých zdrojů ve všech oblastech činnosti lidí. Při kvalifikaci expozice obyvatelstva a profesní expozice, se dávky z přírodních zdrojů vždy odečítají od změřených hodnot. (HUŠÁK, 2009)

Přírodní radioaktivní zdroje v České republice ročně způsobují průměrně ozáření o hodnotě 3 mSv, v Německu 4,8 mSv nebo v Itálii 5 mSv. (Obecné informace o radioaktivitě a radiační ochraně, 2012)

Valné shromáždění OSN Vědeckého výboru o účincích atomového záření UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) předložilo obsáhlé poznatky o výskytu nádorových onemocnění u ozářené populace. Výsledkem odhadu bylo, že přídatné riziko úmrtí ohledně rakoviny způsobené ozářením v oblasti dávek nad 100 mSv je 3-5 %, jedná se tedy 3-5 osob ze 100 . (Ionizující záření, 2016)

Umělé zdroje

Umělé zdroje ionizujícího záření se od přírodních zdrojů liší tím, že jsou vytvořeny lidskou činností. Mezi nejvýznamnější umělé zdroje ozáření obyvatelstva patří aplikace ionizujícího záření v lékařství, kde má největší podíl rentgenová diagnostika. Lékařské ozáření představuje zhruba 93 % z celkové efektivní dávky, kterou člověk získá z umělých zdrojů záření. Veškeré jaderné testy přispívají svým globálním radioaktivním spadem v atmosféře k radiační zátěži populace z umělých zdrojů kolem 2 %. Podobně jsou na tom i expozice z různých zdrojů např. televizory, monitory nebo spotřební výrobky s velmi malým obsahem radioaktivních látek. Jaderné elektrárny za normálního provozu způsobují velmi malé ozáření populace, ke kterému dochází prostřednictvím úniku radioaktivních látek do prostředí a představuje zhruba 1 % celkové dávky z umělých zdrojů. Pokud dojde k havárii na jaderné elektrárně, může dojít k významnému úniku radioaktivních látek, který bude mít za následek mnohem vyšší radiační zátěž obyvatelstva, a to i na místech výrazně vzdálených od místa úniku. Významným haváriím na jaderných zařízeních je v této práci věnovaná samostatná podkapitola. Nízký podíl ozáření pochází také z profesionálního ozáření, kde je exponováno velmi malé množství osob v populaci. V České republice je celková

průměrná hodnota z ozáření z přírodních i umělých zdrojů přibližně 4,8 mSv ročně. (HUŠÁK, 2009)

1.4.3. Biologické účinky záření

Deterministické účinky

Deterministické účinky vznikají při ozáření tkáně dávkou větší, než je prahová dávka, která postačí k buněčnému úbytku. Při vyšší dávce celotělového ozáření s dostatečnou distribucí dochází k nemoci z ozáření. Akutní nemoc z ozáření není běžnou situací a denně se s ní v radiační ochraně nesetkáme. Částečná nebo lokální ozáření se projevují na omezeném místě ozářené tkáně. V rámci radiační ochrany se pracuje především s převodem efektivní kolektivní dávky na vznik zdravotních potíží v ozářené skupině lidí. (Klener, 2000)

Akutní nemoc z ozáření může mít podle výše dávky tři formy:

- Hematologická dřeňová forma
- Gastrointestinální (střevní) forma
- Neuropsychická forma

Hematologická dřeňová forma vzniká při celotělovém ozáření dávkou 3 až 4 Gy. Ze začátku se projevují různé příznaky, jako nevolnost, bolesti hlavy, apatie, dehydratace organismu nebo zvýšená teplota. V následujících několika dnech dochází krvácení do sliznic, projevy sepse a orofaryngeálního syndromu. K těmto změnám dochází z důvodu poškození orgánů krvetvorby. V krevním obraze značně klesne počet bílých krvinek, nejvýznamněji množství lymfocytů, ale klesá i počet červených krvinek a krevních destiček. Pokud dávka není příliš vysoká a jsou zachovány kmenové buňky krvetvorby, může dojít během 6 až 8 týdnů k postupné regeneraci. Dávky vyšší než 10 Gy jsou smrtelné a kmenové buňky krvetvorby jsou nenávratně zlikvidovány. K přežití je pak nutná transplantace kostní dřeně. (HUŠÁK, 2009)

Střevní forma se projevuje při ozáření dávkou vyšší, než 6 Gy a závažné potíže vznikají čtvrtý až sedmý den po ozáření. Typickými příznaky jsou krvavé průjmy z důvodu střevní perforace, kdy dochází k nekróze buněk střevní výstelky a obnažení povrchu střeva. (HUŠÁK, 2009)

Neuropsychická forma se výrazně dostaví při dávkách nad 20 Gy s časnými příznaky jako je metabolický rozvrat, selhání srdce a kóma. Zmiňované příznaky při dávkách nad 50 Gy poté přecházejí v psychickou dezorientaci, křeče, bezvědomí a smrt. (HUŠÁK, 2009)

Mezi další časné deterministické účinky patří akutní lokální poškození, ke kterému může dojít při radiačních nehodách na zařízeních se zdrojem záření. Dávka ozáření je podstatně vyšší, pokud byl zdroj v době nehody v blízkosti povrchu kůže nebo v přímém kontaktu. (HUŠÁK, 2009)

Rozlišujeme tři stupně poškození:

- První stupeň – při dávce 2 až 4 Gy je stav kůže bezpříznakový po dobu 2-4 týdnů, poté se objevuje zarudnutí, záněty, edémy a přechodná epilace
- Druhý stupeň – vzniká při dávce do 20 Gy, kdy během několika hodin po ozáření nastupuje častý erytém, po období latence (po 2 až 3 týdnech) se objeví příznaky v plném rozsahu, jako pozdní erytém v hlubších vrstvách a vznik puchýřů
- Třetí stupeň – při dávkách nad 50 Gy dochází v hlubších vrstvách kůže ke vzniku infekcí, poškození cév a k degenerativním změnám kůže, které vyžadují zpravidla plasticko-chirurgické operace

K deterministickým účinkům se též řadí i pozdní poškození, jako chronická radiační dermatitida, dále zákal oční čočky nebo poškození fertility.

Stochastické účinky

Stochastické účinky jsou charakterizovány jako bezprahové a způsobují vznik zhoubných nádorů a genetické změny. Velmi nízká dávka rentgenového nebo gama záření představuje miliony ionizací a k poškození DNA v jádru buňky stačí již jediná ionizace. Frekvence výskytu stochastických účinků se zvyšuje s dávkou a účinek opakovaných dávek je aditivní, avšak úroveň závažnosti nádoru nezávisí na dávce. S určitou pravděpodobností lze předpovědět vzestup těchto účinků v ozářené populaci, ale nelze určit u jednotlivých případů, zda se jedná o následek ozáření nebo o obdobné poruchy zdraví, které se objevují v neozářené populaci. Podle koncepce radiační ochrany se v této oblasti předpokládá lineární bezprahová závislost pravděpodobnosti těchto účinků na absorbované dávce. Mnohé experimenty na zvířatech a různé epidemiologické studie naznačují, že tato pravděpodobnost účinků při nízkých dávkách

není lineární, a dokonce se přiklání k příznivému biologickému působení záření právě u zmíněných nízkých dávek záření. ICRP a další vědecké organizace se k těmto hypotézám staví velmi zdrženlivě a do systému radiační ochrany zahrnují předchozí lineární průběh. V současných odborných literaturách se uvádí, že záření s dávkou vyšší jako 100 mSv způsobují vznik zhoubných nádorů. Celosvětový průměr přírodního radiačního prostředí se odhaduje kolem 2,4 mSv ročně. Nelze tedy prokázat zdravotní důsledky stochastických účinků při velmi nízkých dávkách záření blízkých nule, jelikož zdravotní stav populace v případě rakoviny je určován množstvím vzájemně působících jevů, které se velmi obtížně od sebe separují. Zkoumání vztahu účinku a dávky lze až od výše dávky přesahující úroveň přírodního pozadí, při kterých dochází k růstu výskytu případů rakoviny. (HUŠÁK, 2009)

Průměrný koeficient rizika vzniku nádorového onemocnění se odhaduje na 0,005 Sv⁻¹. Tuto hodnotu představuje ozáření 1000 osob dávkou 1 Sv, kdy bude u 5 osob vyvolána zhoubná nádorová onemocnění. Pravděpodobnost vzniku stochastických účinků je také závislá na věku osob. Tyto radiační účinky mají dlouhou dobu latence a projevují se až s určitým časovým odstupem. U osob mladšího věku je větší pravděpodobnost projevení stochastických účinků než u starších osob, u kterých k manifestaci pravděpodobně ani nedojde, jednoduše se ji nedožijí. Děti mají větší radiosenzitivitu, jelikož v důsledku růstu mají intenzivnější dělení buněk. (ULLMANN, 2009)

Tabulka 4 Pásma dávek podle UNSCEAR

úroveň dávky	hodnota dávky	praxe
Vysoké dávky	více než 1 Gy	Těžké radiační nehody (Černobyl)
Střední pásmo dávek	100 mGy až 1 Gy	Sanační práce v Černobyli
Nízké dávky	10 mGy až 100 mGy	Vícenásobná tomografie CT
Velmi nízké dávky	méně než 10 mGy	Běžné rentgenové snímky

Zdroj: (Ionizující záření, 2016)

V tabulce 4 jsou uvedeny pásma dávek, jejich hodnota a příklad z praxe.

1.4.4. Detekce ionizujícího záření

Mezi detektory ionizujícího záření patří radiometrické přístroje a příslušné detekční metody, které jsou založeny na fyzikálních a chemických změnách nebo na jiných změnách vlastností látek. Tyto látky díky svým vlastnostem mohou detekovat v různých typech detektoru, např. aktivitu zdroje záření. Dozimetr se zpravidla skládá z detektoru záření, aparatury a zařízení, které zpracovávají a převádějí odezvu z detektoru do požadované formy. Dozimetry mohou být konstruovány tak, že detekční čidlo je vystaveno poli záření a vyhodnocení je provedeno zvláště v měřicím a záznamovém zařízení, např. termoluminiscenční dozimetr. Jiné dozimetry jsou exponovány v poli záření i s vyhodnocovací aparaturou, kde se jedná především o některé typy osobních elektronických detektorů. Detektory ionizujícího záření se často dělí na kontinuální a integrální. Kontinuální detektory předávají průběžnou informaci o okamžité úrovni záření a využívají se pro monitoring radiační situace za normálních nebo havarijních podmínek. U integrálních detektorů se využívá odezva, která roste s dobou, po kterou je detektor vystavován v působení zdroje záření. Tyto detektory se používají v osobní dozimetrii, ale i v životním a pracovním prostředí. (PROUZA, 2009)

Detekční systémy podle účelu:

- radiometry – slouží k odhadu dávky, dávkových příkonů, povrchové kontaminace v daném místě či prostoru
- spektrometry – měří energetický přenos dané veličiny záření
- radiometrická zařízení – jsou určena zpravidla k průmyslovým aplikacím radionuklidů

Nejpoužívanější detektory můžeme rozdělit podle jejich principu do 3 skupin:

- elektrické detektory
- scintilační detektory
- materiálové detektory

Díky ionizaci vznikají volné elektrické náboje v ozářené látce, a tím se zvětšuje i elektrická vodivost látky. Ionizační proud vytváří napěťový impulz, který je odezvou záření. Tento princip využívají elektronické detektory, které nalezneme např. u spektrometrů. Scintilační detektory jsou založeny na látkách, které při působení

ionizujících záření vytvářejí luminiscenční záření – scintilaci. Fotony dopadají na fotokatodu, fotoefektem jsou uvolňovány elektrony, které se dostávají na elektrody a vzniklý napěťový impulz se dále zpracovává. Princip materiálových detektorů je založen na látkách, které mění své vlastnosti (barva, teplota, vodivost, objem apod.) vlivem záření. K těmto detektorům patří např. filmové, termoluminiscenční a stopové detektory.

1.5. Radioaktivita ve Fukušimě

Havárie v jaderné elektrárně Fukušima I Daiči se řadí podle mezinárodní stupnice hodnocení jaderné závažnosti INES (The International Nuclear Event Scales) na druhé místo po Černobylu. Tato stupnice obsahuje 7 stupňů, přičemž stupeň 1-3 se označuje jako nehoda, stupeň 4-7 se označuje jako havárie. Lze označit stupněm 0 odchylky události, které z hlediska bezpečnosti nemají žádný význam. Stupnice INES hodnotí nehody a havárie podle velikosti úniku radioaktivních látek. (Stupnice INES, 2008)

Havárie v Japonsku se podle předchozí stupnice řadí na 7 stupeň, stejně jako zmíněný Černobyl, ačkoliv radioaktivních látek uniklo několikanásobně méně než v bývalém SSSR. V porovnání byla oblast zasažení ve Fukušimě zhruba jen 6 % velikosti kontaminace oblasti v Černobylu. Odhady ohledně uniklé radioaktivity ve Fukušimě se podle různých zdrojů liší, a je tedy třeba počítat s maximální hodnotou. Odhaduje se, že uniklá radioaktivita, převážně jódu 131 měla hodnotu 940 petabecquerelů (PBq). Dále pracovníci v oblasti atmosférických odhadů emisí pro izotopy cesia 137 uvedli hodnotu 13 až 15 PBq. Mezi další emise neméně významných izotopů patřily vzácné plyny xenonu 133 a 135, avšak jejich radioaktivita nebyla tak vysoká, že by dosahovala hodnot cesia 137, a proto jim nebylo třeba věnovat zvýšenou pozornost. (Wagner, 2015)

1.6. Nejzávažnější havárie jaderných elektráren

Každá lidská činnost v oblastech průmyslu, vědy, techniky, zemědělství nebo zdravotnictví přináší určité riziko nehody. Radiační nehodu chápeme jako neplánovanou událost, která zvyšuje ohrožení osob ionizujícím zářením. (ULLMANN, 2009)

Podle atomového zákona č. 263/2016 Sb., v rámci zvládnutí radiační mimořádné události na území České republiky se jaderná zařízení, pracoviště se zdroji ionizujícího záření nebo činnosti spojené s expoziční situací zařazují do kategorií A až E. Za účelem

připravenosti k odezvě na radiační mimořádnou událost se radiační mimořádné události dělí do třech kategorií:

- radiační událost prvního stupně
- radiační nehoda
- radiační havárie

Pro hodnocení jaderných havárií, respektive radiačních nehod na jaderných reaktorech se používá mezinárodní 7-stupňová stupnice podle INES. (ULLMANN, 2009)

- 1. stupeň – odchýlení od normálního provozu
- 2. stupeň – porucha na zařízení
- 3. stupeň – vážná porucha
- 4. stupeň – havárie s únikem v jaderném zařízení
- 5. stupeň – havárie s únikem do okolí
- 6. stupeň – havárie s vážnými radioaktivními následky
- 7. stupeň – rozsáhlá havárie s vážnými radioaktivními následky

Saint Laurent

V roce 1969 ve Francii došlo k první havárii na jednom z integrovaných reaktorů kanálového typu s grafitovým blokem. Mělo zde dojít k automatickému programu výměny článků, avšak automatický manipulátor signalizoval prázdné boxy, a tak operátor příslušné směny, i přes porušený předpisů, zasáhl ručně do programu a vybral jiný box. Bohužel tento box obsahoval grafitové zátky, které zastavily průtok chladiva a zbývající články se roztavily. Došlo ke kontaminaci vody v primárním okruhu a k vyhlášení poplachu. Odstranění zbytků roztaveného článku a kontaminované vody trvalo více než rok a náklady byly velmi vysoké. Při této nehodě naštěstí nedošlo ke zranění osob ani k úniku radioaktivních látek mimo elektrárnu. K obdobné nehodě došlo o 11 let později na druhém reaktoru. Obě havárie byly hodnoceny stupněm 4 podle INES. (HAVÁRIE JADERNÝCH ELEKTRÁREN, 2019)

Jaslovské Bohunice

Na československé jaderné elektrárně došlo při pokusu o urychlení výměny palivového článku k zastavení průtoku chladicího plynu, což způsobila ochranná vložka

na palivovém článku. Palivo se začalo tavit, až došlo k protavení kanálu a došlo ke kontaktu s těžkou vodou. Působením eroze došlo k poškození povlaku 25 % článků, radioaktivní zplodiny se dostaly až do sekundárního okruhu, zamořily parovody a turbíny. Jaderné nebezpečí zde bylo hodnoceno stupněm 4 a nedošlo zde k žádnému zranění a ani výraznému ozáření. Provoz elektrárny už nebyl nikdy obnoven a došlo k její likvidaci. (HAVÁRIE JADERNÝCH ELEKTRÁREN, 2019)

Three Miles Island

28. března 1979 byl na jaderné elektrárně Three Miles Island ve Spojených státech amerických vyhlášen poplach kvůli parogenerátoru, do kterého se přestala čerpat voda. Kvůli předchozí opravě bylo zapomenuto na uzávěry, které byly stále zavřené a rezervní čerpadla nemohla dodávat vodu. Automatický systém spustil havarijní tyče do reaktoru a kvůli narůstající teplotě byly spuštěny čerpadla primárního okruhu. Bohužel jeden z tlakových ventilů byl mimo provoz a voda se zde pod tlakem dostávala pod tlakovou nádobu. Při kolísání tlaku došlo po dvou hodinách k roztavení obnažených článků. Kontaminovaná voda mezitím zaplnila nádrže pod blokem reaktoru a bylo automaticky spuštěno čerpadlo, které vodu odčerpalo, ale do zásobníku mimo kontejnment. Ventilaci začala unikat radioaktivní směs plynů směrem k městu Harrisburg a kolem půlnoci se spustily sirény. Ani zde nedošlo ke ztrátě na životech nebo ke zranění, či ozáření. Avšak místní média celou situaci vyhrotily a vzniklá panika obletěla celé Spojené státy. Tento incident měl negativní dopad na dosavadní americkou jadernou energetiku a byl ohodnocen pátým stupněm jaderného nebezpečí. (HAVÁRIE JADERNÝCH ELEKTRÁREN, 2019)

Kyštym

Velmi závažná havárie, kterou Sovětský svaz desítky let skrýval, se stala 29. září 1957 v oblasti Jižního Uralu. V závodě Majak na zpracování radioaktivního materiálu došlo k selhání chlazení na jedné z podzemních nádrží, která následně explodovala. Kontaminovaný mrak v Čeljabinské oblasti kontaminoval na 23 tisíc čtverečných metrů a bylo evakuováno statisíce lidí. Zda měla událost se stupněm 7 podle INES nějaké oběti, není momentálně známo, neboť ruská vláda tuto havárii oficiálně ohlásila až v roce 1989. (ČT24 - 60 let od třetí největší jaderné havárie, 2017; Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí, 2001)

Černobyl

Stupeň 7 podle INES je přiřazen k nejzávažnější havárii, která se stala 26. dubna 1986 na jaderné elektrárně Černobyl v SSSR. Při testování, kdy měl být část výkonu využit k chlazení reaktoru, byla personálem vyřazena bezpečnostní automatika nízkých hodnot výkonu reaktoru. Regulační tyče byly vytaženy vysoko a ve velkém počtu, avšak s velkým růstem páry nebyly dostatečně rychle sníženy zpět do aktivní zóny. Během několika sekund vzrostl tepelný výkon stonásobně a následná parní exploze utrhla tisícitunové víko reaktoru. Reakce vzduchu s vodíkem měla za následek explozi, která zničila část aktivní zóny. Došlo k propálení střechy a uniklo 5 tun radioaktivních látek. Radioaktivní mrak se díky větrům dostal nad Skandinávii, Střední Evropu a část Balkánského poloostrova. Havárie se vyžádala na 31 mrtvých pracovníků elektrárny a hasičů a u 237 lidí byla diagnostikována akutní nemoc z ozáření. Dalších tisíc záchranářů, vojáků a pracovníků bylo vystaveno dávkám od 300 do 500 mSv. (HAVÁRIE JADERNÝCH ELEKTRÁREN, 2019)

V tabulce č. 5 můžeme vidět porovnání havárií Fukušimy a Černobyly, které jsou umístěny na 7 stupni podle INES.

Tabulka 5 Porovnání Fukušimy a Černobyly

	FUKUŠIMA 2011	ČERNOBYL 1986
PŘÍČINA HAVÁRIE	živelná pohroma	lidský faktor
POŠKOZENÍ REAKTOROVÉ NÁDOBY	předpokládá se	totální
TYP ÚNIKU	přízemní	výškový
OBĚTI OZÁŘENÍ	0	47 (do roku 2004)
ÚNIK LÁTEK DO OKOLÍ	$^{131}\text{I} - 1 \times 10^{17}$ $^{137}\text{Cs} - 1 \times 10^{16}$	$^{131}\text{I} - 1 \times 10^{18}$ $^{137}\text{Cs} - 1 \times 10^{17}$

zdroj (Dráchov, 2012)

1.7. Evakuace

Ještě předtím, než dojde k samotnému popisu evakuace ve Fukušimě, bude prvně popsána evakuace v České republice, abychom měli představu, jakým způsobem se

postupuje u nás. Podle vyhlášky č.380/2002 Sb., k přípravě a provádění úkolů ochrany obyvatelstva, se evakuací rozumí zabezpečený přesun osob, zvířat, technických zařízení, strojů, potřebného materiálu k zajištění nutné výroby a nebezpečných látek mimo oblast, která je ohrožena mimořádnou událostí.

Evakuační plán je základním nástrojem pro přípravu a realizaci evakuace osob, hospodářských zvířat a majetku (stroje, materiál, zařízení). Obsahuje soubor potřebných informací a postupů při evakuaci v ohrožené oblasti. (Smetana, Kratochvílová, Kratochvílová, 2010)

Evakuaci lze rozdělit do 5 skupin podle určitých faktorů:

Základní – podle území

- objektová (budova nebo areál budov)
- plošná (část nebo celé území)

Podle obyvatelstva

- všeobecná – všechny skupiny obyvatelstva (např. při živelných pohromách)
- selektivní – vybrané skupiny osob (ženy, děti, pacienti lůžkových oddělení apod.)

Podle délky

- vyvedení – zpravidla se jedná vyvedení osob z části objektu
- krátkodobá – pobyt evakuovaných osob mimo domov do 24 hodin
- dlouhodobá – pobyt evakuovaných osob mimo domov více jak 24 hodin

Podle způsobu řízení

- samovolná – obyvatelstvo se evakuuje podle vlastního uvážení
- řízená – evakuace je řízena příslušnými orgány

Podle varianty ohrožení

- přímá – provedena bez předchozího ukrytí (např. při živelných pohromách)
- evakuace po předchozím ukrytí – snížení prvotního ohrožení (např. při radiační havárii)

Podle Smetany a Kratochvílové (2010) se plán evakuace zpracovává zejména pro dlouhodobou evakuaci, ale v rámci možností lze s určitým postupem aplikovat i

v krátkodobé. Nejvíce plánovanou evakuací z hlediska řízení je tzv. kombinovaná. Její princip spočívá v tom, že v její první fázi nastává samovolná evakuace a v následující fázi řízená evakuace, kdy jsou k dispozici dostatečné síly a prostředky. V rámci problematiky ohledně jaderných elektráren je evakuační plán součástí havarijního plánu kraje.

Havarijní plán kraje je stanoven vyhláškou Ministerstva vnitra č.232/2001 Sb., o některých podrobnostech zabezpečení integrovaného záchranného systému, kde plán evakuace je součástí plánů konkrétních činností a obsahuje:

- zásady provádění evakuace
- rozsah evakuačních opatření
- zabezpečení evakuace
- orgány pro řízení evakuace a způsob jejich vyrozumění
- rozdělení odpovědnosti za provedení evakuace obyvatelstva

Pro jaderná zařízení je plán evakuace v zónách havarijního plánování součástí havarijního plánu kraje. Při přípravě plánu se vychází z analýzy možných rizik a podle limitních hodnot potenciálního ozáření, které vychází ze zákona č.263/2016 Sb., atomový zákon. Ohledně připravenosti na radiační mimořádnou událost můžeme rozlišit vnitřní havarijní plán, který se týká samotného areálu jaderného zařízení.

Podle vyhlášky č. 380/2002 Sb., k přípravě a provádění úkolů civilní ochrany obyvatelstva, v rámci evakuačního plánu se samotná evakuace vztahuje na všechny obyvatele, které se nacházejí v nebezpečné oblasti kromě osob, které mají na starosti řízení evakuace, provádějí záchranné a likvidační práce nebo jiné neodkladné činnosti. Zde se nabízí otázka, koho přednostně evakuovat?

- osoby do 15 let
- pacienty ze zdravotnických zařízení
- klienty ze sociálních zařízení
- osoby zdravotně postižené

K těmto skupinám přednostně evakuovaných osob řadíme i jejich doprovod či odborný personál.

Orgánem pro řízení evakuace je příslušný krizový štáb, resp. pracovní skupina krizového štábu, která zajišťuje průběh evakuace, koordinaci přepravy do evakuačních a přijímacích středisek, nouzové zásobování, dopravní prostředky, dokumentaci,

spolupráci s orgány veřejné správy, zdravotnických zařízeními a humanitárními organizacemi. (Vyhláška č. 380/2002 Sb.)

Evakuační středisko

Ze shromažďovacích míst v evakuační zóně se evakuované osoby přesouvají do středisek, které jsou zřetelně označeny nápisem nebo mezinárodním znakem pro civilní ochranu. Zde dochází k příjmu a evidenci osob, jsou poskytovány informace ohledně evakuace a v případě potřeby i zdravotnická pomoc. Následuje přerozdělování skupin evakuovaných osob do příjmových středisek. Předávají informace pracovní skupině krizového štábu o průběhu evakuace. (Vyhláška č. 380/2002 Sb.)

Příjmové středisko

Příjmové středisko je zařízení, které je označeno nápisem nebo znakem civilní ochrany a zajišťuje příjem evakuovaných osob, případně přerozdělení skupin do příjmových míst a nouzového ubytování, dále informace o nouzovém stravování a zdravotnickou pomoc nebo odvoz do zdravotnických zařízení. Příjmová střediska informují ostatní orgány – pracovní skupinu krizového štábu, evakuační střediska a orgány veřejné správy. (Vyhláška č. 380/2002 Sb.)

1.8. Ochranná opatření při radiační mimořádné události

Nehodová expoziční situace může vzniknout při běžné plánované expoziční situaci nebo může být vyvolána samovolným jednáním. V následujícím textu budou uvedena ochranná opatření týkající se radiační mimořádné události a dále radiační kritéria tak, jak jsou zavedena v naší legislativě. Podle zákona č. 263/2016 Sb. musí být ozářené fyzické osoby, které se nacházejí v nehodových expozičních situacích, omezeny v pobytu na zasaženém území a je potřeba zavést neodkladná a následná ochranná opatření.

Neodkladná ochranná opatření:

- ukrytí
- použití jódové profylaxe
- evakuace

Mezi odůvodněná neodkladná ochranná opatření patří ukrytí, je-li odvrácená efektivní dávka vyšší než 10 mSv za dobu ukrytí trvající nejdéle dva dny. Pokud hrozí vnitřní kontaminace radioaktivním jódem a odvrácený úvazek ekvivalentní dávky ve

štítné žláze způsobený radioizotopy jódu je vyšší než 100 mSv, je zcela na místě použití jódomové profylaxe. V případě evakuace, pokud je součet efektivní dávky obdržené v expoziční nehodové situaci je větší než 100 mSv za prvních 7 dní. (Vyhláška č. 422/2016 Sb.)

Mezi následná ochranná opatření patří:

- přesídlení obyvatel
- omezení používání kontaminovaných potravin a vody
- omezení používání kontaminovaných krmiv

Podle vyhlášky č. 422/2016 Sb. se při zdůvodnění a optimalizaci v případě rozhodnutí o zavedení ochranných opatření v nehodové expoziční situaci zohledňuje několik okolností. Mezi okolnosti, které ovlivňují proveditelnost ochranných opatření, patří:

- hustota obyvatel
- dopravní situace
- existence velkých obytných jednotek
- doba potřebná k přípravě evakuace
- aktuální meteorologická situace

Dále je třeba vzít v úvahu velikost ozáření fyzických osob, které by bylo odvráceno a také důsledky zavedených ochranných opatření.

V případě odvráceného ročního úvazku efektivní dávky vyšší než 1 mSv u kontaminovaných potravin, krmiv a vody je jejich omezení v rámci následných ochranných opatření zcela oprávněné. Pokud je efektivní dávka v zasaženém území během následujícího roku vyšší než 20 mSv, není území vhodné pro návrat obyvatel. Toto kritérium slouží k odvolání ochranných opatření ukrytí, evakuace a přesídlení obyvatel.

K plánování a přípravě ochranných opatření je třeba postupovat tak, aby bylo rozumně dosaženo co největšího přínosu. Při rozhodování je třeba, aby byly vzaty v úvahu referenční úrovně. Pro omezení havarijního ozáření zasahující osoby v nehodové expoziční situaci se používají limity pro radiační pracovníky. Referenční úroveň pro zasahující osoby je 100 mSv za rok a 500 mSv za rok v případě, že se jedná o záchranu lidských životů nebo zabránění rozvoje vzniklé situace, která by zapříčinila rozsáhle společenské a hospodářské důsledky. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

2 Cíl práce a výzkumná otázka

Cílem této bakalářské práce bylo zhodnotit ochranná opatření, především evakuaci z evakuačních zón při havárii v jaderné elektrárně Fukušima I Daiči.

Výzkumná otázka byla stanovena: Byla dostatečná ochranná opatření a následný postup při evakuaci osob z evakuačních zón?

3 Metodika výzkumu

Při zpracování této bakalářské práce byly využity především odborné publikace, dostupné elektronické zdroje, časopisy a legislativní dokumenty z oblasti radiační ochrany, jaderné a radiační bezpečnosti a havarijního plánování. Ve značné míře bylo nutné vycházet i ze zahraničních zdrojů v anglickém jazyce. Pro naplnění cíle práce bylo prvně nutné si určit hlavní bod, který byl impulzem pro začátek evakuace, kde se v tomto případě jednalo o vyhlášení stavu jaderného nebezpečí. Dále se pokračovalo chronologicky až po dokončení samotné evakuace a zároveň byl popisován stav na jaderné elektrárně. Další podkapitola byla věnována následkům evakuace, které pro výzkumnou otázku přináší zásadní informace a budou probírány v diskuzi. Neméně důležitou částí byl také monitoring evakuačních zón a stavu jaderné elektrárny Fukušima během následujících let, až po současný stav. Ochranná opatření byla v práci postupně popsána a analyzována v průběhu celé havárie, kde bylo poukázáno na technické nedostatky, pochybení lidského faktoru a v neposlední řadě na mimořádnou událost způsobenou přírodní katastrofou.

4 Výsledky

Podle zpráv komise japonského parlamentu byla havárie vyvolána přírodní katastrofou extrémních rozměrů. Z toho vyplývá, že zde byla podceněna možnost vzniku větší tsunami, která by překonala ochrannou soustavu vlnolamů chránící komplex jaderné elektrárny. Shodným závěrem přichází ve zprávě i společnost TEPCO, která v poslední verzi o havárii z 20. června 2012 uvádí jako primární příčinu podcenění velikosti tsunami, což mělo za následek celkovou ztrátu chlazení u jaderných reaktorů. Z předchozích kapitol víme, že bez nedostatečného chlazení dojde brzy k odhalení aktivní zóny reaktoru. Faktorů, které ovlivnily zhoršující se situaci v elektrárně, je více. Nedostatečná vodotěsnost a konstrukční vada vrat v objektu s diesellovými agregáty nebo jejich uložení v podzemí. (Wagner, 2015)

4.1. Průběh evakuace obyvatel

Wagner se zmiňuje, že parlamentní komise Japonska analyzovala první dny evakuace a navrhla několik návrhů na zlepšení, organizování a samotný průběh evakuace. Tento rozbor s sebou nese i řadu kritických výhrad, jako nedostačená informovanost a připravenost krizových složek, ale i občanů. V následující části práce bude popsán průběh evakuace a rozsah evakuačních zón.

Stav jaderného nebezpečí

V pátek 11. března v čase 19:03, tedy pár hodin po zemětřesení, byl pro místní obyvatele v okolí jaderné elektrárny Fukušima vyhlášen premiérem Naoto Kanem stav jaderného nebezpečí. Hlavním důvodem byla zhoršená situace u prvního reaktoru a nárůst radioaktivity. Obyvatelstvo bylo v pohotovosti pro případ přesunu z havarijní zóny. Ve 20:50 začala evakuace místního obyvatelstva v okruhu 2 kilometrů od elektrárny, zhruba za dalších třicet minut došlo k rozšíření oblasti o jeden kilometr a vláda nařídila, aby obyvatelé v zóně 3-10 kilometrů zůstali ve svých domech. Následující den v 5:30 padlo rozhodnutí o vypouštění páry z kontejnmentu prvního reaktoru, poté v čase 5:44 byla evakuace rozšířena až na 10 km od místa potenciálního úniku radioaktivity. (Wagner, 2015)

Situace po prvním výbuchu

Je třeba zmínit, že pokud porovnáme evakuaci v Černobylu se situací ve Fukušimě, zjistíme zásadní rozdíl. Ve Fukušimě byla provedena značná část evakuace ještě před samotným radioaktivním únikem z elektrárny. Po explozi 12. března na prvním bloku reaktoru elektrárny byla k večerním hodinám vládou rozšířena evakuace až do okruhu 20 km. S takto rostoucí vzdáleností od místa havárie se začaly objevovat komplikace. Konkrétně v okruhu od deseti kilometrů začalo nabývat na prodlení přesunu a docházelo k chaotickým situacím. Bohužel kvůli zmatkům a zdržení při transportech po prvním výbuchu nebyla některá část obyvatel přesunuta včas z evakuační zóny. Často docházelo ke dvojitým přesunům na další střediska kvůli rozšiřující se evakuační zóně. Například část obyvatel města Namie, byla přesunuta třikrát i vícekrát, podle určení rozsahu kontaminace v dané oblasti, což bylo pro evakuované těžké, jak po fyzické, tak po psychické stránce. (Wagner, 2015)

Jedním z případů, který způsobil ztrátu na životech byla evakuace 14. března ve zdravotnickém zařízení pro dlouhodobě nemocné, kdy bylo transportováno 800 pacientů z evakuační zóny v pásmu deseti až dvaceti kilometrů od elektrárny pomocí přistavěných autobusů. Bohužel nedostatek zdravotnického personálu při náročném přesunu a také chybějící intenzivní zdravotnické péče, která byla bezpochyby nutná, nepřežilo přesunutí šedesát pacientů.

Později následovala podobná evakuace z léčebných zařízení z evakuačních zón ve vzdálenosti 20-30 kilometrů od elektrárny, kde již bylo zajištěno dostatek zdravotnické podpory a nedošlo k dalším předčasným úmrtím pacientů během převozu do evakuačních středisek. 15. března bylo nařízeno vládou, aby lidé v okruhu pásma dvaceti až třiceti kilometrů zůstali schováni v budovách. Podle oficiálních zdrojů byla kompletní evakuace z evakuační zóny do vzdálenosti dvaceti kilometrů od elektrárny Fukušima dokončena 15. března.

25. března byla vládou vyhlášena dobrovolná neboli samovolná evakuace pro obyvatelstvo v nejvzdálenějším pásmu dvacet až třicet kilometrů od elektrárny. (Wagner, 2015; Fukushima Daiichi Accident, 2018)

4.1.1. Evakuace v elektrárně

V době zemětřesení 11. března 2011 pracovalo v areálu jaderné elektrárny Fukušima I Daiči 6413 zaměstnanců. Po pár minutách zasáhla oblast další série otřesů, které dosahovaly síly až 7,2 stupňů Rychterovy škály. V té době byly přerušeny

dodávky elektrické energie ze sítě a došlo k automatickému odstavení reaktorů od prvního úderu zemětřesení. Značná část pracovníků opustila elektrárnu a část se přesunula do krizového centra společně s ředitelem elektrárny Masao Jošidou, který dostal informaci o zvýšení rizika a velikosti tsunami třech a více metrů. První vlna tsunami dorazila v čase 15:27 o velikosti čtyř metrů, ale byla odražena o vlnolam. Za 8 minut dorazila ohromná vlna o velikosti dosahující 15 metrů a částečně zaplavila areál jaderné elektrárny. V té době se nacházeli dva pracovníci elektrárny ve strojovně v místech suterénu čtvrtého bloku, kde voda zaplavila elektrické rozvody a diesellové agregáty. Oba pracovníci, kteří představovali jediné oběti na životech v jaderné elektrárně, byli nalezeni až 2. dubna 2011. Výpadek elektrického proudu způsobil, že nefungovala nejen monitorovací zařízení, ale i komunikační linka elektrárny a komunikace s okolím byla omezena. Bez potřebných prostředků a manuálů museli tuto obtížnou situaci řešit pracovníci ve Fukušimě. Zničené komunikace velice znesnadnily transport potřebných zařízení a prostředků pro zajištění havarijního chlazení, a hlavně snižovaly účinnost záchranných prací, kterých se pracovníci účastnili. Dne 11. března v 15:36 zranila vodíková exploze na prvním reaktoru pět lidí. Je potřeba zmínit, že v té době byli už všichni pracovníci, kteří se nepodíleli na záchranných pracích evakuováni, a v místní oblasti se navíc již nacházely i skupiny zkušených expertů v dané problematice. O dva dny později došlo k výbuchu na třetím bloku, kde došlo ke zranění šesti lidí. Přes nepříznivé události v elektrárně a silné radiaci bylo na dočasnou dobu přesunuto 650 lidí do jaderné elektrárny Fukušima II Daini. Na místě poté zůstalo pouze 70 lidí, určených pro kontrolu a pro provádění záchranných prací. (Wagner, 2015)

4.2. *Následky*

V rámci veřejného zdraví je pro společnost důležitý návrat evakuovaných osob zpět do jejich domovů. Bylo evakuováno přes 160 000 lidí z okolí Fukušimy a míst, kde hrozila kontaminace. Evakuační zóny jsou dekontaminovány tam, kde je to potřebné a možné, a tento úkol má vysokou prioritu a stanoven cíl – návrat obyvatelstva bez zbytečných zdržení a odkladů. Vládní agentura pro obnovu identifikovala v říjnu 2012 přes 1000 obětí, které sice souvisejí s katastrofou, ale nebyly přímo způsobeny radioaktivním zářením, vlnou tsunami nebo zemětřesením na základě údajů z evakuačních oblastí. Zhruba 90 % úmrtí bylo zjištěno u evakuovaných osob starších 66 let, z toho 70 % zemřelo během prvních 3 měsíců od začátku evakuace. Tato předčasná úmrtí, která byla nahlášena v roce 2012, byla způsobena především třemi

faktory. Prvním faktorem byl somatický, tedy zdravotní, a psychický stav osob, které pobývaly v nouzových úkrytech v evakuačních zónách. Trauma z nucených přesunů, jakožto druhý faktor, způsobil duševní a fyzické obtíže u slabších jedinců, kteří museli opouštět své domovy. Třetím faktorem bylo pozdní poskytnutí zdravotnické a lékařské péče potřebným, jelikož byla země po zemětřesení a vlně tsunami z velké části zničena a pozemní komunikace byly na mnoha místech neprůjezdné a poškozené. S posledním faktorem souvisel i nedostatek zdravotnického personálu na některých místech evakuačních zón. (Fukushima Daiichi Accident, 2018)

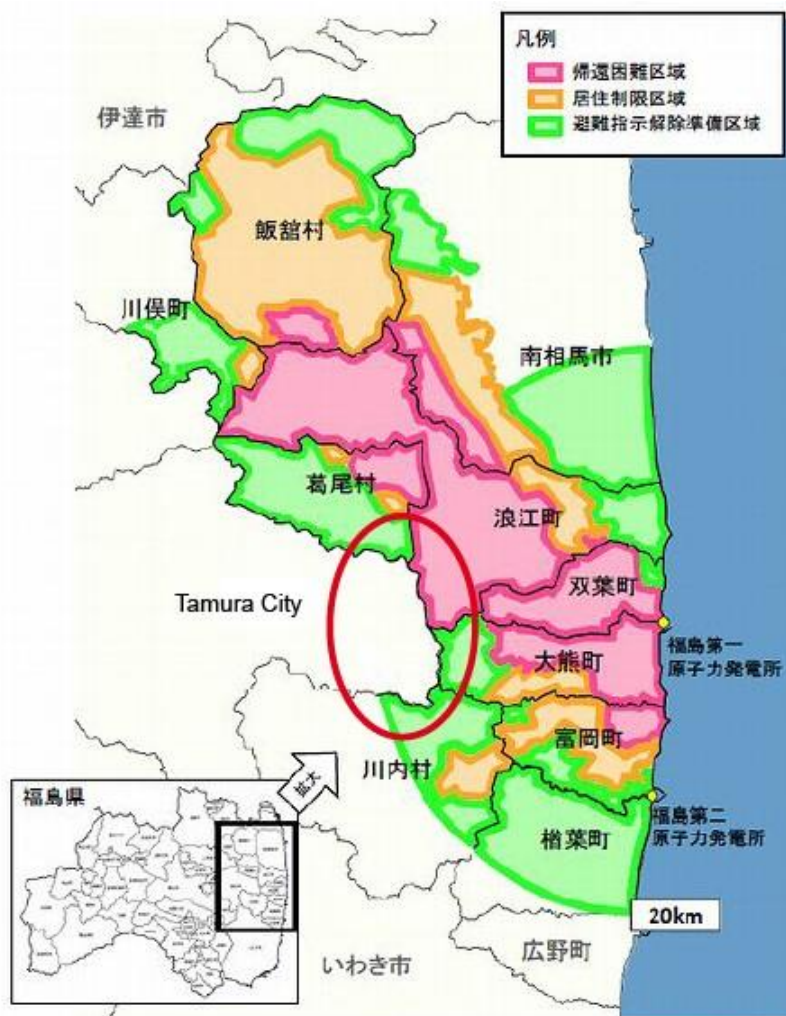
Agentura pro obnovu uvedla, že informovanost obyvatelstva a sdílení zpráv je klíčová z hlediska zdravotních rizik spojených s jadernou havárií. Je potřeba, aby příslušné orgány dokázaly porozumět šíření kontaminace a byly schopné tyto údaje sdílet s obyvatelstvem. Kdyby obyvatelé měli dostatek informací o nadcházející situaci, určitě by byl jejich duševní stav v lepší kondici a nebyl tolik zatížen úzkostí, strachem a stresem před blížící se kontaminací. Zdravotnická zařízení a místní úřady by měly pravidelně pořádat školení a cvičení pro případ jaderných havárií. Obyvatele se podařilo ochránit díky pohotovosti, rychlé evakuaci během nehody a také díky podání pilulek s jodidem draselným. Světová zdravotnická organizace ve spolupráci s tokijskými univerzitami provedly studie, které potvrdily, že lidé poblíž jaderné elektrárny obdrželi tak nízké dávky, že je dost nepravděpodobné, že by to mělo zdravotní dopad. Především došlo k řadě selhání v komunikaci, které měly za následek šíření strachu z kontaminace. Ze zkušeností s ostatními jadernými haváriemi, je těžké nalézt přímo související radiologické poškození zdraví u běžné populace, než např. u likvidačního týmu z Černobylu. Malcolm Grimston, který je vedoucí výzkumný pracovník na Imperial Collage uvedl, že pokud bychom chtěli „napáchat méně škod“, evakuace by byla omezena nebo vůbec nevyhlášena, obzvláště, pokud jsou k dispozici jódové pilulky.

Dále agentura uvedla, že se zabývala studiem účinků nejrůznějších stresových faktorů z jaderné havárie na populaci obyvatel, především pak na samotné zaměstnance elektrárny Fukušima. Během 18 měsíců od havárie bylo zjištěno celkem pět smrtelných infarktů. Vysoké pracovní nasazení a celkové napětí, kterému jsou vystavováni zaměstnanci, jsou hlavním důvodem těchto zdravotních problémů. Zástupce firmy TEPCO uvedl, že 24. srpna 2012 našli v bezvědomí jednoho ze zaměstnanců v odpočinkové místnosti, který pracoval na výstavbě nádrží na kontaminovanou vodu. Ačkoliv mu byla poskytnuta zdravotnická pomoc a byl převezen do nemocnice, o den později zemřel. Důležité je zmínit, že nebyl žádným způsobem kontaminován, a ani

nebyl ozářen vyšší dávkou radiace. Částečný vliv na psychické stavy pracovníku elektrárny Fukušima Daiči mají různé pomluvy a negativní postoje ze strany obyvatelstva. Podle studie to potvrdilo zhruba 14 % zaměstnanců. Ač se jedná o pracovníky elektrárny nebo členy likvidačních čet havárie, v obou případech bylo potvrzeno, že trpí posttraumatickými stresy a pociťují zvýšenou tíseň. V květnu a červnu roku 2011 se zúčastnilo 1 495 lidí z pracovních skupin dotazníkové studie, kde značná část dotazovaných uvedla podobné symptomy jako nervozitu, deprese nebo pocity beznaděje z provádění práce. Výsledkem studie, které se zúčastnilo 885 zaměstnanců bylo, že 46,6 % z nich vnímá celkovou situaci na Fukušimě jako stresující a depresivní. Mezi další neméně významné stresory patří evakuace z jejich vlastních domovů, ztráta majetku během tsunami, pocit z blízkého ohrožení života nebo přímé pozorování exploze na jaderné elektrárně. (The health effects of Fukushima, 2012)

4.3. *Současná situace*

Od dubna roku 2014 bylo japonskou vládou oznámeno, že započne proces návratu první evakuovaných obyvatel z japonské prefektury Fukušima. Prvním městským celkem byla Tamura, kde byl už zhruba od poloviny roku 2013 umožněn obyvatelstvu omezený přístup do oblasti, a to díky rozsáhlým dekontaminačním pracím. Infrastruktura ve městě byla již opravena, a od 1. dubna se mohli obyvatelé vrátit do svých domovů. Opět se tedy mohla pěstovat rýže na polích a obnova farmářských prací dopomohla i k otevření místních obchodů. Podle generální ředitelky Světové jaderné asociace (dále jen WNA) Agnety Rising bylo vykonáno hodně práce kolem dekontaminace a byl zaznamenán v tomto směru velký pokrok. Ačkoliv je situace stabilní, stále zbývá spousta postupů a prací, které je potřeba vykonat. Na mnoha místech je hladina měřené radiace na hodnotách, které jsou srovnatelné s běžnými hodnotami ve světě. Jedná se tedy o hodnoty, při kterých nebyly pozorovány negativní účinky na zdraví a lidé za těchto podmínek běžně žijí. Dekontaminace obcí a obydlených částí v Tamuře, dále lesů, zemědělské půdy, cest a silnic, byla oficiálně prohlášena za dokončenou v červnu 2013. (Return to Tamura in April, 2014)



Obrázek 3 Nahara city (Return to Tamura in April, 2014)

Na obrázku 3 je zobrazena oblast východní části Tamury, především oblast obce Mijakodži s 3 200 obyvateli. Ta se již nacházela v evakuačním pásmu do dvaceti kilometrů. Zelené označení na mapě znamená, že daná oblast je připravena pro návrat obyvatelstva. Východní část Tamury, která byla v pásmu, změnila již označení ze zelené na bílou barvu, tedy na oblast bez jakéhokoliv omezení.

Kvůli radiálnímu nebezpečí a následné evakuaci bylo zakázáno farmaření, chov zvířat a rybolov. Jednalo se o velmi důležité činnosti, které byly pro místní obyvatele způsobem obživy a celkově jejich způsobem života. V tomto ohledu je velmi důležité věnovat se plně dekontaminaci, aby byla města vhodná k opětovnému žití, a k tomu je Japonsko odhodlané. Podle ruského odborníka Michaila Balonova, který pracoval na ochraně obyvatel před radioaktivitou způsobenou havárií v Černobyli, je japonský dekontaminační program zásadním a nese velký podíl na návratu obyvatelstva do zasažených oblastí radiací. Ocenil také speciální dekontaminační zařízení, pracovníky a

techniku, se kterou dekontaminovali veškeré betonové a asfaltové povrchy, odstranili zeminu na polích, kolem budov, ulic ve městech a vesnicích. Balonov také zmínil, že je důležitá otevřená informační politika, tak aby média a vědecká komunita dokázaly vytvořit důvěru veřejnosti, která přispěje k veřejnému zdraví a zamezí negativním sociálním a ekonomickým dopadům způsobeným nedůvěrou, úzkostí a strachem. (Fear and Fukushima, 2013)

Na základě výsledků radiačního monitorování, které potvrdily velmi nehomogenní kontaminace zasažených území, jsou vybírány i oblasti k evakuaci a přesídlení, které jsou zatím pouze doporučeny k těmto opatřením. V současné době se proces přesídlení obyvatel řídí podle závislosti na vývoji dávek ozáření osob. Japonská vláda stanovila jako kritérium doporučené evakuace dávku ozáření 20 mSv za rok. (Veřejnost a rizika jaderné energetiky po Fukušimě, 2012)

Co se týče dekontaminace a návratu obyvatel v oblastech za 20 km pásmem, budou odvolána omezení v případě, že zde nebude hrozit roční dávka vyšší než 20 mSv. To znamená, že dojde k znovuotevření škol, úřadů, zdravotnických zařízení a dobrovolnému návratu evakuovaných obyvatel. Avšak tato pozitivní informace s sebou nese problémy s obnovou infrastruktury a určitou mírou nezaměstnanosti. Podle předchozího obrázku č.3 jsou oblasti v zakázané a evakuované zóně rozděleny na tři typy. První typ (označen zelenou barvou) s menší aktivitou a roční dávkou nepřesahující 20 mSv v oblastech, kde je možný návrat a obnova infrastruktury za předpokladu pokračující dekontaminace. U druhého typu (označen oranžovou barvou) je dávka v rozmezí 20 až 100 mSv za rok. Tady je nutná intenzivní dekontaminace oblastí, aby byl v přijatelné době umožněn návrat. Třetí typ (označen purpurovou barvou) dlouhodobě neumožňuje návrat do oblastí, kde je roční dávka vyšší než 100 mSv. (Fukušima pět let poté, 2016)

Velmi zajímavé výsledky přinesl inženýr Pavel Matzner ze Státního úřadu pro jadernou bezpečnost ČR. Úniky I^{131} nebo Cs^{137} do hodnoty 100 petabecquerelů by vyžadovaly evakuaci do cca 10 km. Při úniku obou radioizotopů by byla evakuace provedena do 15 km při aplikaci jodových tablet. Při vyšších hodnotách I^{131} nad 100 PBq bude potřebná jodová profylaxe pro dospělé do vzdálenosti větší jak 100 km, u kojenců pak 200 km, aby nedošlo k překročení obecného kritéria 50 mSv podle IAEA. Úniky Cs^{137} do hodnoty 10 PBq vyžadují přesídlení do 20 km, aby roční efektivní dávka nepřekročila 20 mSv. Obecné kritérium GSR (General Safety Requirements) Part 7 pro štítnou žlázu 50 mSv je problematické. Aplikace jodových tablet je vhodně

realizovatelná do několik desítek kilometrů, nikoliv ve stovkách kilometrů, které by podle tohoto kritéria vyžadovala situace ve Fukušimě. Pro dočasné přesídlení je obecné kritérium při předpokládané efektivní dávce 100 mSv za rok, které je hraniční s reziduální dávkou podle ICRP. (Referenční úrovně pro nehodové expoziční situace, 2014)

Aktivita kontaminovaných míst klesá i přirozeným způsobem. Zalesněná místa a různé porosty, která jsou vzdálenější od lidských obydlí a cest, se nechávají bez intenzivní dekontaminace. Zde jsou důležité přirozené procesy, tedy rozpady a transporty radionuklidů v prostředí. Dominantním radionuklidem je nyní cesium 137 s poločasem rozpadu 30 let. Pravidelně se provádí letecký dozimetrický průzkum lesů v 365 bodech zasažených územích. Koncem roku 2011 byla střední hodnota dávkového příkonu 0,91 μ Sv za hodinu, na konci roku 2017 byla hodnota 0,23 μ Sv, což odpovídá roční dávce 2 mSv. Tato hodnota je naměřena na 62 % měřených míst, v roce 2011 to bylo pouze na 12 %. Nejvíce kontaminovaná místa z měřených jsou v obci Iitate, kde je dávkový příkon 3,8 μ Sv za hodinu, ročně 33,3 mSv. Tato hodnota samozřejmě spadá do oblasti, kde ještě není možný návrat. (Fukušima v létě 2018, 2018)

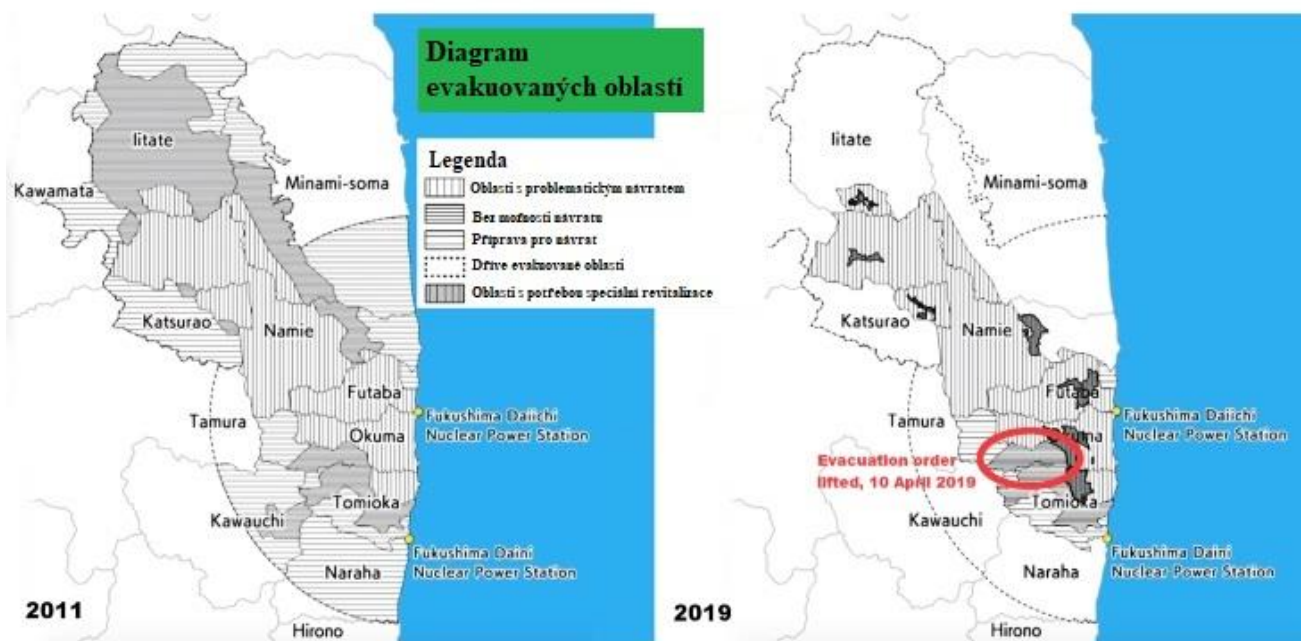
Mezi důležité úkoly v rámci rekonstrukcí zasažených oblastí je přeprava kontaminované zeminy. Dekontaminační úložiště bylo vybudováno nedaleko elektrárny u měst Okuma a Futaba. Ukazuje se, že přirozeným rozpadem radionuklidů u značné části zeminy poklesla aktivita pod hygienickou úroveň. Lze tedy provést separaci a nezávadnou část zeminy použít k rekonstrukčním pracím, např. budování vlnolamů proti tsunami nebo obnova a rozšiřování silnic. Nezávadný materiál bude fixován, zakryt a odstíněn, a díky tomu dojde ke snížení objemu odpadu, kterého je nyní okolo 19 miliónů tun. (Fukušima I po osmi letech, 2019)

Město Nahara bylo v roce 2011, jako jedno z prvních měst, kompletně evakuováno kvůli radiačnímu zamoření. Nahara se svými 7 400 obyvateli se nachází 20 kilometrů od elektrárny. Dne 5. září 2015 japonská vláda zrušila evakuační příkaz, a lidé se mohli vrátit zpět. Avšak podle průzkumů, více než polovina evakuovaných, se nechtějí zatím navrátit. (Japonská vláda zrušila evakuaci města v návaznosti na nehodu JE Fukušima Daiči, 2015)

Jaderná elektrárna leží na hranici dvou měst, jižně od Okumy a severně od Futaby. Obě města, společně s mnoha dalšími v okruhu 20 kilometrů, musely být evakuovány. Celkově bylo evakuováno 164 000 lidí, kteří museli opustit své domovy. Tento počet se nyní snížil na hranici 43 000, což odpovídá zhruba 2,3 % populace v prefektuře

Fukušima. Naměřené hodnoty záření v ovzduší ve městě Okuma ukazují, že za posledních 8 let od havárie klesla úroveň záření o 88 %. K tomuto poklesu pomohly především přírodní procesy, jako srážky, které znečištěné povrchy postupně očišťovaly, a přirozené pochody půdy a vegetace. K urychlení těchto procesů pomohlo také úsilí, které japonská vláda vynaložila k odstranění orné půdy ze zasažených oblastí. Hlavní radioizotop cesium-137, které má poločas rozpadu 30 let, se během osmi let jeho radioaktivita přirozeně snížila o 17 %. Město Okuma podpořilo stabilizaci v oblasti. Bylo zde vytvořeno zázemí pro tisíce pracovníků, které se střídali na pracích v oblastech Fukušima Daiči. Dále zde bylo vybudováno výzkumné středisko, které má za úkol studovat radioaktivní odpady, tvořit metody pro analýzu těžce měřitelných radionuklidů a vyvíjet technologie pro zpracování a likvidaci zbytkového paliva. V roce 2018 byly otevřeny školy ve všech evakuovaných městech, ve kterých již byla oficiálně evakuace zrušena. Začátkem roku 2019 byl ve městě Okuma postaven nový vládní úřad, který se již začal používat. Očekává se, že do konce dubna 2020 dojde k obnově železniční trati Joban, která spojuje města na pobřeží. Vybraná část obyvatelstva Okumy, především z méně obydlené západní oblasti, dostala 10. dubna povolení k návratu do města. Jedná se asi o 380 lidí z původních 10 500 obyvatel města. (Evacuation order lifted in Fukushima host town, 2019)

Na obrázku 4 můžeme vidět porovnání evakuovaných oblastí z roku 2011 a nyní v roce 2019. Je zde označena oblast již zmíněné oblasti Okumy, kam se lidé mohli navrátit zpět do svých domovů.



Obrázek 4 Diagram evakuovaných oblastí (Evakuační příkaz ve Fukušimě zrušen, 2019)

4.3.1. Zdravotní dopady

Jak už z předchozího textu víme, úmrtí a újmy na zdraví nebyly způsobeny především radiačními účinky. Větší následky, než samotná radiace má strach z ní a samozřejmě i z evakuace, a s tím spojená veškerá opatření. Dopady jsou hlavně psychické, a proto by měla být značná část pomoci zaměřena i v této problematice. V návratových oblastech by měly i drobné akce pro občany, jako např. volnočasové aktivity, pomoci k normálnímu životu. Při zkoumání vnitřní kontaminace v období říjen 2011 až únor 2012 pomocí celotělových počítačů pod vedením profesora Ryugo Hayano testováno 10 186 lidí. 88 % z nich bylo bez měřitelné kontaminace a zbylých 12 % vykazovalo slabší hodnoty pod hygienickými limity. Další testování v období březen až listopad 2012 přineslo z 21 997 testovaných osob výsledky, kde 99 % bylo bez měřitelné kontaminace. Epidemiologická studie rakoviny štítné žlázy se prováděla pomocí ultrazvukové metody u veškeré mládeže do 18 let. V zasažených oblastech Fukušimy byl zjištěn větší výskyt menších bulek v 41,2 % testovaných, v nezasazených oblastech pak Aomori 57,6 %, Nagasaki 42,5 % a Jamanaši 69,4 %. Na první pohled se zdá, že je tu větší výskyt abnormalit, a tím i vyšší výskyt rakoviny, ale s největší pravděpodobností je to důsledek velmi intenzivního monitorování a testování za pomoci

nejmodernějších přístrojů. Důvodů, které nám ukazují, že tyto případy rakoviny štítné žlázy nejsou hlavní příčinou z uniklé radioaktivity, je několik. Dávka obdržená ve Fukušimě byla malá a radioaktivní jód se nedostal do řetězce potravin. Výskyt abnormalit v nezasažených zónách jednotlivých prefektur je shodný. Samozřejmě není potvrzen vzájemný vztah mezi obdrženou dávkou a výskytem rakoviny. (Fukušima pět let poté, 2016)

4.3.2. Osud elektráren Fukušima

Tým expertů z MAAE (Mezinárodní agentura pro atomovou energii) provedl několik revizí na elektrárně a zkoumal současnou situaci a připravované plány v oblastech vodního hospodářství, nakládání s použitým palivem, radioaktivním odpadem a prošetřil organizační záležitosti. 30. ledna 2019 dorazila konečná zpráva od týmu odborníků z MAAE japonské vládě. Ohledně stavu jaderné elektrárny Fukušima byl dokončen významný pokrok z původního nouzového stavu do stavu stabilizace. Organizace a každodenní aktivity jsou od roku 2015 velmi dobře naplánované, což umožňuje efektivnější plnění zadaných úkolů, jako je správa radioaktivního materiálu a demontování jaderné elektrárny. Společnost TEPCO byla schopna zajistit dostatečné ukládací prostory pro použité palivo ze všech šesti bloků. Došlo ke zlepšení procesu odstraňování jaderného paliva z prvního, druhého a třetího bloku reaktoru. Bezpečné a úplné vyřazení jaderné elektrárny Fukušima I Daiči z úplného provozu bude trvat několik desítek let. (IAEA reports on progress at Fukushima Daiichi, 2019)

Od roku 2018 pracuje ve zničené elektrárně přes 4500 zaměstnanců, v areálu se zlepšily pracovní podmínky a je zde dokonce možné se pohybovat v běžném pracovním oděvu. Hlavním pokrokem jsou přímé průzkumy materiálu, který by měl být ztuhlou taveninou ze zničeného reaktoru. Jedním z velkých problémů je voda, která je kontaminovaná tritiem. Jedná se o velmi velké množství vody, přibližně 920 000 tun v 800 nádržích, které bohužel nelze chemicky odstranit. Zatím se nabízí nejprůjemnější varianta, a to, že by se kontaminovaná voda dostatečně ředila a vypouštěla do moře. Jelikož se tritium nachází v přírodě a je vytvářeno působením kosmického záření v atmosféře, byla by jeho přítomnost v životním prostředí přirozená a neměla by mít negativní dopady za předpokladu, že by se před samotným vypuštěním musela očistit od zbylých radionuklidů. S tímto postupem nesouhlasí především rybáři, kteří mají obavy, aby tento krok neovlivnil důvěru zákazníků k jejich produktům a nepoškodilo to už tak zasažený rybářský průmysl. V tuto chvíli je klíčová nejpřímější diskuze s

obyvatelstvem a se složkami společnosti a citlivým a úplným vysvětlováním všech pozitiv i rizik. (Fukušima I po osmi letech, 2019)

Společnost TEPCO 31. července 2019 oficiálně oznámila, že se rozhodla demontovat všechny reaktory také u jaderné elektrárny Fukušima II (Daini), které od roku 2011 již nefungují. Je to z důvodů eliminace jaderných elektráren v prefektuře Fukušima. Tento krok byl učiněn po zvážení všech možností, které se týkaly obyvatelstva nebo i podnikání společnosti. Místní obyvatelé se zde budou více cítit v bezpečí, pokud v oblastech nebude přítomna žádná jaderná elektrárna. Společnost TEPCO už v roce 2018 zvažovala tento krok v souvislostech s vyřazením jaderné elektrárny Fukušima Daiči. Demontáž bude firmu TEPCO stát 2,6 miliard dolarů a plánuje zpracovat a prezentovat plán vyřazovacích prací místním obyvatelům srozumitelným způsobem, aby byla zajištěna informovanost, jistota a klid obyvatelstva. (Fukushima Daini Nuclear Power Station to be Decommissioned, 2019)

5 Diskuze

Cílem mé bakalářské práce bylo zhodnotit ochranná opatření a v rámci toho získat potřebné informace ohledně havárie, následků a zmonitorovat celý její průběh od začátku až po dokončení evakuace. Osobně musím poznamenat, že dostupných informací ohledně problematiky havárie jaderné elektrárny Fukušima není nadbytek. Japonská společnost je sice sdílná ohledně informací, ale s určitým omezením. Samotné TEPCO vydává prohlášení formou kratších aktualit, jiné zdroje jsou dostupné přes různé japonské agentury a mezinárodní portály zabývající se jadernou problematikou. Můžu říci, že je tato událost z určité míry ještě čerstvá, ačkoliv od ní uplynulo devět let. Japonsko se z této havárie stále vzpamatovává, i přesto, že udělalo velký pokrok a bude stále, v důsledku katastrofy, ovlivněno v následujících desítkách let.

V následující části kapitoly jsem shrnul děje, které byly pro státní úřady impulzem k rozhodování vyhlášení evakuace. V tabulce 6 jsem vytvořil přehled evakuací a událostí v časové posloupnosti, kde jsou zahrnuty zásadní děje, ovlivňující průběh evakuace obyvatelstva.

Tabulka 6 Přehled událostí v rámci evakuace

Datum a čas	Popis události
11. března 2011 14:46	Vznik zemětřesení
11. března 2011 14:52	Automatické odstavení reaktorů – spuštění chlazení bloků
11. března 2011 15:41	Příchod hlavní vlny tsunami – zaplavení jaderné elektrárny
11. března 2011 18:00	Růst teploty u 1. reaktoru – zaznamenání vysoké radioaktivity
11. března 2011 19:03	Vyhlášení stavu jaderného nebezpečí
11. března 2011 20:50	Zahájena evakuace obyvatel v okruhu 2 km od elektrárny
11. března 2011 21:23	Vyhlášena evakuace obyvatel v okruhu 3 km od elektrárny
12. března 2011 05:30	Vysoký tlak v 1. reaktoru – vypouštění páry z kontejnmentu
12. března 2011 05:44	Zahájena evakuace obyvatel v okruhu do 10 km od elektrárny
12. března 2011 15:36	Výbuch vodíku u prvního bloku reaktoru
12. března 2011 21:40	Vyhlášena evakuace obyvatel v okruhu do 20 km od elektrárny
14. března 2011	Dodatečná evakuace 800 pacientů z léčebny pro dlouhodobě nemocné
15. března 2011	Oficiálně dokončena evakuace obyvatel do 20 km od elektrárny
červenec 2011	V dodatečně vyhlášené zakázané zóně dokončena evakuace (silně kontaminovaná oblast ve vzdálenosti větší než 20 km od elektrárny)

Podle tabulky 6 můžeme shrnout časovou posloupnost dějů. Od vzniku zemětřesení, až po automatické odstavení reaktorů uplynulo zhruba 6 minut, během kterých bylo systémem detekováno zemětřesení přesahující 7 stupňů Rychterovy škály a nedošlo k žádnému poškození důležitých stavebních konstrukcí elektrárny. Následujících 50 minut byly chlazeny bloky reaktorů bez jakékoliv závady až do příchodu první vlny tsunami. Došlo k rychlému zaplavení celého komplexu, především pak podzemních prostorů s dieselovými agregáty, které přestaly fungovat. Za nešťastné můžeme považovat umístění náhradních zdrojů, které byly uloženy pod úrovní moře a také vodotěsné vrata, které pravděpodobně kvůli netěsnosti a zátěži nedokázaly zastavit masy vody. Pohánění čerpadel bylo závislé na záložních bateriích, které se ale brzy vybily, ochlazování se stalo neefektivní a došlo ke zvyšování teploty v reaktoru č.1. Během dalších třech hodin se stav na reaktoru zhoršoval, a to vedlo k vyhlášení jaderného nebezpečí. Po dvou hodinách byla již zahájena evakuace v prvním pásmu ve vzdálenosti dvou kilometrů do elektrárny. Japonská vláda jednala s předstihem a nenechala tak zde možnost zvýšit riziko ohrožení obyvatelstva. Od zahájení transportů a záchranných akcí k první explozi na elektrárně to bylo necelé dvě desítky hodin, takže bylo relativně dostatek času dostat se z evakuačních zón do 10 kilometrů mimo přímé nebezpečí.

Pokud se zaměříme na samotnou evakuaci obyvatelstva, zásadním bodem pro zahájení první evakuace bylo vyhlášení jaderného nebezpečí, kde bylo rozhodnuto dle zhoršující se situace na prvním bloku reaktoru elektrárny Fukušima. Nastávající kritická situace na reaktoru způsobila zvětšení okruhu evakuační zóny do 10 km. Můžeme říct, že se tak stalo právě včas, kdy o několik hodin později došlo k výbuchu na již zmiňovaném reaktoru. Poté už nastává komplikovaná situace, kdy se zóna zvětšila o dalších 10 km a dochází ke zmatkům. Poměrně velká oblast v okruhu dvaceti kilometrů zaměstnává velké množství záchranných složek, jednotlivá evakuační střediska v původních zónách se musí přemísťovat, takže dochází k několika přesunům obyvatelstva. Ačkoliv vše probíhalo zavčasu, nebylo k dispozici dostatek personálu, vyrozumění a celková informovanost směrem k obyvatelstvu nebyla pokryta na všech místech. Dokonce se zapomnělo evakuovat pacienty ze zdravotnického zařízení pro přestárlé a dlouhodobě nemocné, kde došlo k přesunu až o dva dny později, a to vedlo k prvním ztrátám na lidských životech. Zhoršené zdravotnické podmínky, nedostatek personálu, chaos a stres při přesunu vedly k úmrtí šedesáti pacientů ze zdravotně

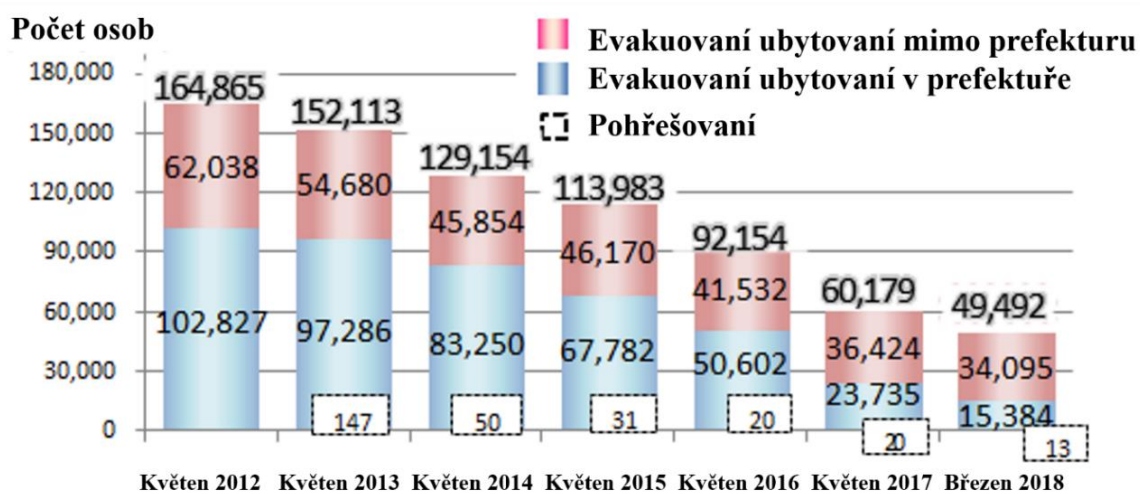
sociálního zařízení. Celková doba evakuace v oblasti do 20 km od elektrárny trvala přibližně čtyři dny.

Ač by se na první pohled zdálo, většina evakuovaného obyvatelstva byla zachráněna a přesunuta do bezpečných oblastí mimo možnou radioaktivní kontaminaci. Ta negativní stránka důsledků evakuace teprve přicházela. Stres okolo evakuací a následná traumata přispěla k úmrtí více než jednoho tisíce obyvatel. Zde si můžeme položit otázku, zda byl vhodný postup evakuace v takovém měřítku jako v oblastech kolem Fukušimy? Úroveň radiačního záření v evakuačních zónách, které nebyly vyšší, než bývá přirozené radiační pozadí kdekoliv na světě a kde tedy není patrný nepříznivý účinek na zdraví. Značná část úmrtí, která nebyla spojována s přímým účinkem záření, zemětřesením nebo tsunami, zahrnovala obyvatele starší 66 let. Jejich přesun nebyl ideálním řešením, ať už se jednalo o starší nemocné pacienty nebo klienty ze zdravotnických a sociálních zařízení. Pokud bychom vzali v úvahu, možné riziko ozáření osob starších 66 let, stochastické účinky by se projeví až za mnohem delší dobu, např. za dvacet nebo třicet let, je tedy pravděpodobnější, že by se u daných osob projeví běžné nemoci postihující starší osoby nebo by zemřely přirozeným způsobem na staří a žádné účinky z ozáření by se neprojeví. Je třeba zmínit, že Japonsko patří mezi státy s nejvyšší věkovým průměrem na světě. Evakuace takových rozměrů v časových intervalech byl pro japonskou vládu nelehký úkol. Dostat do bezpečí všechny obyvatele bylo za daných podmínek nereálné a přes značnou část evakuovaných osob si tato akce vyžádala své oběti. Samozřejmě je třeba brát na zřetel, že Japonsko postihla přírodní katastrofa světového měřítka, takže se evakuace neopírala jen o možnou havárii na jaderné elektrárně Fukušima I Daiči. Pokud se vrátíme do historie v období 2. světové války, bude nám zcela jasné, že Japonsko mělo negativní zkušenosti po svrnutí atomových pum na Hirošimu a Nagasaki v roce 1945. Tato válečná katastrofa určitě zůstává v paměti japonské společnosti a jakákoliv radiační opatření jsou tím do jisté míry ovlivňována. Osobně jsem názoru, že evakuace měla být selektivní především ve vzdálenějších oblastech, kde nebylo takové riziko možného ozáření z elektrárny a vliv působení tsunami. Z předchozích výsledků můžeme skutečně vyvodit důsledky evakuace a mezi hlavní příčiny většiny předčasných úmrtí uvést komplikace fungování nemocničních zařízení, zhoršení zdravotních stavů evakuovaných a psychická únava způsobená stresem a dramatickými situacemi.

Rád bych se vrátil k tvrzení výzkumného pracovníka na Imperial Collage Malcolma Grimastona. Ten je přesvědčen, že pokud by evakuace byla provedena pouze

v omezeném rozsahu nebo by k ní vůbec nedošlo, bylo by napácháno mnohem méně škod, především na lidských životech. S tímto názorem z určité části souhlasím, ale pokud se potýkáme s takovou variantou katastrofy, kde území zasáhlo zemětřesení a vlna tsunami a jsou zde značně poškozená místa infrastruktury, nevyhlášení evakuace by bylo v tomto případě nereálné. Jsem přesvědčen, že částečná evakuace by byla nejvhodnější řešením celé situace. Hodnoty radioaktivních látek, které odpovídaly množství uniklé z jaderné elektrárny, by pravděpodobně postačily k evakuování obyvatel v okruhu 15 až 20 km, ale za předpokladu použití jódových tablet.

Vyzdvihl bych příkladnou pohotovost japonských úřadů, které dokázaly poměrně rychle reagovat na vzniklou havárii. Ještě před kritickou situací na reaktorech dokázali v krátkém čase evakuovat oblast do 10 km během cca 18 hodin, a navíc měli již k dispozici tablety s jodidem draselným. Samotná organizace evakuace nebyla bezchybná a nedostatečná informovanost, můžeme říci i nezkušenost zdravotnických zařízení a úřadů nesla určitý podíl na ztrátách evakuovaných obyvatel. Navíc zde docházelo k zahlcení zdravotnické péče a tam, kde byla potřeba včasná pomoc, přicházela bohužel pozdě. Tento fakt je opravdu kritickým bodem týkající se velkých katastrof nebo pandemií. Jako poslední zmínku bych uvedl, že v současné době zhruba 75 % obyvatel, kteří byli evakuováni, se mohou navrátit do svých domovů. Na obrázku 5 vidíme vývoj počtu evakuovaných v prefektuře Fukušima v každém roce. V roce 2019 se počet snížil na zhruba 43 000 evakuovaných.



Obrázek 5 Vývoj počtu evakuovaných v prefektuře Fukušima (Fukušima v létě 2018, 2018)

Poslední věc, na kterou bych upozornil a o které se ve společnosti také diskutuje, jsou konstrukční prvky jaderné elektrárny Fukušima. Ačkoliv existuje v historii Japonska mnoho důkazů o tsunami, které dosahují výšky více jak 10 metrů, byly vlnolamy chránící elektrárnu postaveny pouze do 7 metrů výšky proti případné vlně. Další konstrukční chybou bylo pravděpodobně uložení záložních dieselových agregátů v podzemí. Tuto část měla ochránit vodotěsná vrata, která bohužel svoji funkci nesplnila. Někteří odborníci spekulují, jestli byla celková vodotěsnost dostatečně otestovaná a jestli nedošlo k pochybení při stavbě strojovny. Zemětřesení jaderná elektrárna ustála velmi dobře, vliv byl minimální a konstrukce staveb nebyla nijak zvlášť narušena.

6 Závěr

Havárie ve Fukušimě je jasným důkazem, že člověk musí počítat s událostmi větších rozměru, které mohou nastat a lehce překonají nastavená ochranná opatření s nedostatečnou rezervou. Ačkoliv byla havárie ve Fukušimě klasifikována podle mezinárodní stupnice INES 7 stupněm jaderného nebezpečí, stejně jako v Černobyli, jsou obě tyto havárie nesrovnatelné. Únik radioaktivních látek, velikost zasažené oblasti a následné škody jsou u obou havárií tak rozdílné, že o katastrofě velkých rozměrů můžeme mluvit spíše v souvislosti s Černobylem. I přes rapidní rozvoj technologií a vyhodnocení veškerých zkušeností a znalostí, se vždy může vyskytnout problém, který může způsobit katastrofu nemalých rozměrů. V případě Fukušimské havárie nesouvisely ztráty na lidských životech přímo s únikem radiace, ale s evakuací.

Závěrem můžeme na výzkumnou otázku práce, jestli byla dostatečná ochranná opatření a následný postup při evakuaci osob z evakuačních zón, odpověď v následujících řádcích. Způsob, jakým byla organizována, nebyl zcela adekvátní k rozsahu celé události. Včasná evakuace vyhlášena japonskou vládou byla určitě správným krokem. Avšak japonské úřady a zdravotnická zařízení v prefektuře Fukušima nebyly dostatečně připraveny a školeny na mimořádnou událost za takto vzniklých podmínek v případě jaderné havárie. Obyvatelstvo, které za takovéto situace není přímo seznámeno s nebezpečím, zůstává s pocitem úzkosti, beznaděje a strachu o svůj život, úplně osamoceno a za nouzových podmínek strádá. Ačkoliv byla evakuována a zachráněna většina obyvatel z evakuačních zón, pro mnohé starší a nemocné obyvatele to bylo příčinou jejich úmrtí. Je velmi obtížné rozhodnout a vybrat ty, kteří mají být evakuováni a nebudou tím výrazně ohroženi na životě. Morální je evakuovat všechny, ale v tomto případě to nebylo zcela nejvhodnější. Pokud bychom evakuovali v takovém rozsahu jako v této prefektuře, bylo by vhodnější postupovat systematictěji, mít zajištěno dostatek prostředků, a tím zajistit, co nejbezpečnější přesun a následný pobyt evakuovaných. Ze zkušeností z Fukušimy by se mělo přihlížet na možné následky způsobené evakuací a zároveň by bylo třeba mít důkladně připravenou nejvhodnější variantu plánu evakuace na případnou havárii v budoucnu. V rámci ochrany obyvatelstva, krizového řízení a dalších souvisejících odvětví této problematiky není vůbec jednoduché se připravit na mimořádné události takových rozsahů. Věřím, že nashromážděné poznatky v této práci nás posunou o kousek dál a v budoucnu budeme lépe čelit dalším případným katastrofám.

Použitá literatura

1. *AKTIVNÍ ZÓNA REAKTORU* [online]. 1999 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/aktiv_zona_reak.html
2. BREHOVSKÁ, Lenka. *Evakuace ze zón havarijního plánování v závislosti na diferenciaci populace*. Praha: NLN, Nakladatelství Lidové noviny, 2016. ISBN 978-80-7422-466-9.
3. *ČT24 - 60 let od třetí největší jaderné havárie* [online]. 2017 [cit. 2019-08-05]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/svet/2257033-60-let-od-treti-nejvetsi-jaderne-havarie-vybuch-na-urale-sovetsky-svaz-tajil>
4. *Doporučení Mezinárodní komise radiologické ochrany 2007. Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. 2020, 2007 [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/ICRP103_dokument.pdf
5. *Evacuation order lifted in Fukushima host town* [online]. 2019 [cit. 2019-08-06]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Evacuation-order-lifted-in-Fukushima-host-town>
6. *Evakuační příkaz byl ve Fukušimě zrušen* [online]. 2019 [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2019/04/evakuacni-prikaz-byl-ve-fukusime-zrusen/>
7. *Fear and Fukushima* [online]. 2013 [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Fear-and-Fukushima>
8. FOLWARCZNY, Libor. a Jiří. POKORNÝ. *Evakuace osob. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství*, 2006. ISBN 80-86634-92-2.
9. *Fukushima Daiichi Accident* [online]. © 2016-2019 World Nuclear Association, 2018 [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-accident.aspx>
10. *Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant* [online]. Wikipedia: The Free Encyclopedia, 2019 [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fukushima_Daiichi_Nuclear_Power_Plant
11. *Fukushima Daini Nuclear Power Station to be Decommissioned* [online]. 2019 [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: https://www7.tepco.co.jp/newsroom/press/archives/2019/hd_190731_01-e.html

12. Fukušima pět let poté: Jaká je situace ve Fukušimě nyní? *Akademie věd České republiky* [online]. 2020, 2016 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: http://stream.avcr.cz/akademie-ved/04-fukusima_AVCR_Wagner.pdf
13. Fukušima I po osmi letech. *Osel.cz: Objective source e-learning* [online]. 2019 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.osel.cz/10411-fukusima-i-po-osmi-letech.html>
14. Fukušima v létě 2018. *Osel.cz: Objective source e-learning* [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.osel.cz/10023-fukusima-v-lete-2018.html>
15. *Fukušima!?: (o čem to vlastně bylo? Fukušima = 10% Černobyli? Co to udělá s Japonskem? Co s Evropskou unií? Bude se dostavovat Temelín?)* : 23. června 2011 ; *Financial Transaction Tax* : (daň z finančních transakcí) : 22. září 2011 ; *Reforma stavebního spoření* : 18. října 2011. Dráčov: Fontes Rerum, 2012. Sborník textů (Fontes Rerum). ISBN 978-80-86958-26-2.
16. HAVÁRIE JADERNÝCH ELEKTRÁREN. *SKUPINA ČEZ* [online]. 2019 [cit. 2019-08-05]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/havarie_7.htm
17. HUŠÁK, Václav. *Radiační ochrana pro radiologické asistenty*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2009. ISBN 978-80-244-2350-0.
18. *IAEA reports on progress at Fukushima Daiichi* [online]. 2019 [cit. 2019-08-06]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/IAEA-reports-on-progress-at-Fukushima-Daiichi>
19. *IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ* [online]. Program OSN pro ochranu životního prostředí, 2016 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/dokumenty/Radiation-InsidePart-Czech-Feb_2017-1.pdf
20. *International Atomic Energy Agency* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/>
21. *Jaderná a radiační bezpečnost* [online]. RNDr. Jaroslav Kusala, 2004 [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k34.htm>
22. *Jaderná elektrárna* [online]. RNDr. Jaroslav Kusala, 2004 [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k33.htm>

23. *Jaderná elektrárna Fukušima I* [online]. 2017 [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna_Fuku%C5%A1ma_I
24. *Jak se chladí reaktory jaderné elektrárny Fukušima I* [online]. Vladimír Wágner, 2011 [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/5681-jak-se-chladi-reaktory-jaderne-elektrarny-fukusima-1.html>
25. *Japan Earthquake & Tsunami of 2011: Facts and Information* [online]. 2017 [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/39110-japan-2011-earthquake-tsunami-facts.html>
26. *Japonská vláda zrušila evakuaci města v návaznosti na nehodu JE Fukušima Dajiči* [online]. 2015 [cit. 2019-08-07]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2015/09/japonska-vlada-zrusila-evakuaci-mesta-v-navaznosti-na-nehodu-je-fukusima-dajici/>
27. *Je Fukušima jako Černobyl?* [online]. Vladimír Wágner, 2011 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/5663-je-fukusima-jako-ernobyl.html>
28. KLENER, Vladislav, ed. *Principy a praxe radiační ochrany*. [1. vyd.]. Praha: Azin CZ, 2000. ISBN 80-238-3703-6.
29. Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí. *SÚJB* [online]. 2001 [cit. 2019-08-05]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/INES.pdf>
30. Nuclear Power Reactors [online]. 2018 [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>
31. *Obecné informace o radioaktivitě a radiační ochraně* [online]. ©2012 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.fnmotol.cz/kliniky-a-oddeleni/cast-prodospele/klinika-nuklearni-mediciny-a-endokrinologie-uk-2-l/oddeleni-radiologicke-fyziky/obecne-informace-o-radioaktivite-a-radiacni-ochran/>
32. PROUZA, Zdeněk a Jiří ŠVEC. *Zásahy při radiační mimořádné události*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-046-3.
33. *RCIC: Reactor Core Isolation Cooling* [online]. ©2019 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: http://www.fukuleaks.org/web/?page_id=10076
34. *REACTORS IN OPERATION* [online]. 2009 [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://www->

pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/CNPP2010_CD/pages/AnnexII/tables/table2.htm

35. Referenční úrovně pro nehodové expoziční situace. *International Atomic Energy Agency* [online]. 2014 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/46/116/46116654.pdf>
36. *Return to Tamura in April* [online]. 2014 [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Return-to-Tamura-in-April>
37. SMETANA, Marek, Danuše KRATOCHVÍLOVÁ a Danuše KRATOCHVÍLOVÁ. *Havarijní plánování: varování, evakuace, poplachové plány, povodňové plány*. Brno: Computer Press, 2010. ISBN 978-802-5129-890
38. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/legislativa>
39. *Stupnice INES* [online]. 2008 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/ines/stupnice-ines/>
40. *The health effects of Fukushima* [online]. 2012 [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/The-health-effects-of-Fukushima>
41. ULLMANN, Vojtěch. *Jaderná a radiační fyzika*. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, Fakulta zdravotnických studií, 2009. ISBN 978-80-7368-669-7.
42. URBANČÍK, Libor. *Jaderná a radiační bezpečnost provozu českých jaderných elektráren*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2015. ISBN 978-80-214-5238-1.
43. Veřejnost a rizika jaderné energetiky po Fukušimě. *Vesmír* [online]. 2012, 12. 1. 2012, **91**(1) [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2012/cislo-1/verejnost-rizika-jaderne-energetiky-po-fukusime.html>
44. Vyhláška č. 328/2001 Sb., o některých podrobnostech zabezpečení integrovaného záchranného systému. In: *Sbírka zákonů*.
45. Vyhláška č. 380/2002 Sb., k přípravě a provádění úkolů ochrany obyvatelstva. In: *Sbírka zákonů*.
46. Vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje. In: *Sbírka zákonů*
47. WAGNER, Vladimír. *Fukušima I poté*. Praha: Novela bohemia, 2015. ISBN 978-80-87683-45-3
48. *ZABEZPEČENÍ OSOBNÍHO MONITOROVÁNÍ PŘI ČINNOSTECH VEDOUCÍCH K OZÁŘENÍ* [online]. SÚJB, 2005 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z:

https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/Zabezpeceni_os_moit_pri_ozareni.pdf

49. *Základní typy jaderných reaktorů* [online]. SKUPINA ČEZ, 2019 [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/jaderna-energetika/nove-jaderne-zdroje/jaderna-energie/zakladni-typy-jadernych-reaktoru.html>
50. Zákon č. 263/2016 Sb., Zákon atomový zákon. In: *Sbírka zákonů*.
51. *Zemětřesení a tsunami v Tóhoku 2011* [online]. 2019 [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Zem%C4%9Bt%C5%99esen%C3%AD_a_tsunami_v_T%C3%B3hoku_2011

Seznam obrázků

Obrázek 1 Reaktory Fukušima I (Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, 2019)	9
Obrázek 2 Varný reaktor (Základní typy jaderných reaktorů, 2019)	11
Obrázek 3 Nahara city (Return to Tamura in April, 2014).....	42
Obrázek 4 Diagram evakuovaných oblastí (Evakuační příkaz ve Fukušimě zrušen, 2019).....	46
Obrázek 5 Vývoj počtu evakuovaných v prefektuře Fukušima (Fukušima v létě 2018, 2018)	52

Seznam zkratek

GSR	General Safety Requirements
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
INES	The International Nuclear Event Scale
JST	Japonský standartní čas
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
OSN	Organizace spojených národů
RCIC	Reactor Core Isolation Cooling
SSSR	Svaz sovětských socialistických republik
TEPCO	Tokyo Electric Power Company
TNT	Trinitrotoluen
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
WNA	World Nuclear Association