

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Analýza jaderné havárie ve Fukušimě

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří TVRDÝ**
Osobní číslo: **E10B0188P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Technická ekologie**
Název tématu: **Analýza jaderné havárie ve Fukušimě**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Popište jadernou havárii a její následky pro okolí JE.
2. Uveďte následky jaderné havárie pro svět.
3. Zpracujte návrh na likvidaci havárie v jaderné elektrárně ve Fukušimě.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- 1. Hála, J.: Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie**
- 2. Běhounek, F.: Lidé a radioaktivita**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Romana Řáhová

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

TVRDÝ, J. Analýza jaderné havárie ve Fukušimě. Bakalářská práce. Plzeň – fakulta elektrotechnická ZČU v Plzni, 45 s., 2013

Bakalářská práce „Analýza jaderné havárie ve Fukušimě“ popisuje japonskou nehodu jaderné elektrárny, kterou způsobilo 11. března 2011 silné zemětřesení a následná vlna tsunami. Vážně byly poškozeny tři fukušimské reaktory, ze kterých unikla radioaktivita do životního prostředí. Popsána je postupná stabilizace, odstavení reaktorů, likvidace škod a dekontaminace zasaženého území elektrárny i území Japonska. Je zde také zpracován návrh, jak by měly likvidační práce dále pokračovat. V práci je popsána i změna pohledu na jadernou energetiku a vývoj energetických koncepcí významných států.

Klíčová slova: Fukušima, japonské zemětřesení, jaderná elektrárna, radioaktivita, jaderný reaktor, japonská energetika.

Abstract

TVRDÝ, J. Nuclear accident in Fukušima analysis. Bachelor Thesis. Pilsen – Faculty of Electrical Engineering ZČU in Pilsen, 45 p., 2013

The Bachelor Thesis “Nuclear accident in Fukušima analysis” describes the Japanese nuclear power plant accident that was triggered by strong earthquake and following tsunami. Three reactors were severely damaged and radioactivity leaked to environment. The thesis describes gradual stabilization of the situation, shutdown of reactors and elimination of environmental damages and decontamination of power plant area as well as Japan territory affected by this disaster. The thesis also suggests how liquidation work should continue. There is also description of change of point of view on nuclear power engineering and development of power energy concepts of important countries.

Key words: Fukushima, Japanese earthquake, nuclear power plant, radioactivity, nuclear reactor, Japanese nuclear power engineering.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma

„Analýza jaderné havárie ve Fukušimě“

vypracoval samostatně pod odborným dohledem vedoucí bakalářské práce Ing. Romany Řáhové, za použití pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

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

.....

podpis

V Plzni, dne 5. 6. 2013

Jiří Tvrdý

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucí mé práce Ing. Romaně Řáhové, za vstřícný přístup, věcné připomínky a odborné rady, kterými mi pomohla k vypracování této bakalářské práce. Dále pak vědeckému pracovníkovi Ústavu jaderné fyziky Akademie věd České republiky, RNDr. Vladimíru Wagnerovi CSc., který souhlasil s použitím některých jeho publikací, jako podkladů pro tuto bakalářskou práci.

Obsah:

ÚVOD	8
1. RADIOAKTIVITA A JADERNÁ ENERGETIKA	9
1.1 Radioaktivita a záření v životním prostředí	9
1.2 Jaderná energetika	11
1.2.1 Jaderná energetika globálně	12
1.2.2 Jaderná energetika v Japonsku	14
1.2.3 Jaderné elektrárny Fukušima	15
2. JADERNÁ HAVÁRIE A NÁSLEDKY PRO OKOLÍ JE	17
2.1 Poškození a současný stav fukušimských elektráren	17
2.1.1 Fukušima I – blok 1	20
2.1.2 Fukušima I – blok 2	21
2.1.3 Fukušima I – blok 3	21
2.1.4 Fukušima II, bazény vyhořelého paliva	22
2.2 Následky pro okolí elektrárny a pro Japonsko	23
2.2.1 Radiační situace	24
2.2.2 Japonská energetika	26
3. NÁSLEDKY HAVÁRIE PRO SVĚT	29
3.1 Ekologické dopady	29
3.2 Pohled na jadernou energetiku	30
4. LIKVIDACE HAVÁRIE V JE FUKUŠIMA	32
4.1 Radiační situace v elektrárně	32
4.2 Návrh na likvidaci havárie	33
ZÁVĚR	35
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	36
SEZNAM TABULEK A GRAFŮ	40
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	41
SEZNAM PŘÍLOH	42

ÚVOD

Jako téma bakalářské práce jsem si vybral **Analýzu jaderné havárie ve Fukušimě**. Nehoda se stala 11. března 2011 a i přesto, že je to již více než 2 roky, je toto téma stále velmi diskutované, zejména s ohledem na bezpečnost ostatních jaderných elektráren ve světě a s ohledem na budoucnost jaderné energetiky. U takto rozsáhlé průmyslové havárie trvají její následky řadu let, dokonce desetiletí. Situace v elektrárně je již plně stabilizovaná a nehrozí žádné riziko, že by se tato situace obrátila. Přesto bude potřeba vykonat hodně práce a to hlavně na dekontaminaci okolí, což je časově náročné z důvodu velké plochy zasaženého území a dále na likvidaci reaktorů a jejich částí, což je náročné z hlediska silné radioaktivity v bezprostřední blízkosti.

Na začátku práce uvádím stručný popis vlastností radioaktivního záření a jeho výskytu v životním prostředí, jaderné energetiky ve světě, v Japonsku a popis fukušimské jaderné elektrárny, její jednotlivé části a bloky. V části druhé podrobně analyzuji nehodu, její příčiny a následky. A to jak v prvních okamžicích po nehodě, kdy se jednalo o rozhodující okamžiky pro následný vývoj událostí, tak i v dalších měsících, kdy se celá situace postupně stabilizovala. Zde jsou popsány následky havárie pro areál jaderné elektrárny a její blízké okolí. Ve třetí části jsou dopady nehody pro svět bezprostředně po havárii, během nadcházejících několika měsíců a jaké následky z nehody vyplynou do budoucna, včetně případné změny pohledu na jadernou energetiku. Na závěr této bakalářské práce je uveden popis a návrh likvidačních prací v areálu jaderné elektrárny Fukušima. Při odstraňování následků této havárie jde o řešení velmi komplikovaných problémů, často v časové tísně. Podobných havárií, v podobném rozsahu, se za celou dobu provozování jaderných elektráren stalo naštěstí jen velmi málo. Proto je často třeba i improvizace, zkoušet nové postupy a všem zúčastněným se dostává cenných zkušeností. Následky havárie budou odstraňovány ještě dlouhou dobu a i proto mohu do této práce vnést vlastní názory, myšlenky a navrhnout další postup likvidace fukušimské havárie.

1. RADIOAKTIVITA A JADERNÁ ENERGETIKA

1.1 Radioaktivita a záření v životním prostředí

Abych se mohl podrobně zabývat fukušimskou nehodou, musím nejprve na úvod uvést základní vztahy, jednotky a popsat jaké záření působí na člověka přirozeně, z životního prostředí. Tato kapitola je důležitá, abych později mohl porovnat radiační situaci a vliv záření na obyvatele po nehodě s normálním stavem.

První důležitou jednotkou je *intenzita*, nebo též *aktivita* záření, jednotkou je Becquerel (Bq) a je to jeden rozpad, nebo přeměna atomového jádra, za jednu sekundu. Starší jednotkou je Curie (Ci) a platí: $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

Polčas rozpadu je doba, za kterou se přemění přesně polovina jader ve sledovaném vzorku. Pro konkrétní radioaktivní izotop je vždy konstantní a může mít hodnoty od zlomku sekund až po dobu několika miliónů let.

Abychom mohli určit velikost ozáření člověka, byla zavedena *efektivní dávka*, její jednotkou je Sievert (Sv). Není to přímo měřitelná hodnota, ale určuje se právě z naměřené intenzity záření, biologického účinku konkrétního typu záření a citlivostí zasažených tkání. V našem případě tedy efektivní dávku vztahujeme na člověka celkově, výhodou tak je že vyjádříme radiační zátěž jednou číselnou hodnotou.

Aby bylo možné objektivně posoudit nebezpečnost obdržené efektivní dávky na člověka, je třeba si říci, jakou dávku absorbujeme běžně z životního prostředí (tzv. přirozené pozadí). To se skládá ze dvou zdrojů. Prvním je kosmické záření, které přichází z vesmíru a druhý zdroj je v horninách, kde je jeho hlavním původcem radon. Efektivní dávka záření, kterou naše tělo absorbuje mimo radon, je poměrně konstantní a má hodnotu přibližně 1 mSv za rok. Proměnlivost dávky pak závisí hlavně právě na radonu a jeho koncentraci v půdě, která se může v různých oblastech velmi lišit. V průběhu 19. století se přidává navíc ještě vliv z umělých zdrojů. Ty působí sice na užší skupinu obyvatel, často ale s větší intenzitou. Jedná se například o lékařství, pracovníky jaderných elektráren, výrobu jaderného paliva a různých radionuklidů. Proto je tato skupina velmi pečlivě sledována a monitorována.

Zpráva výboru OSN pro účinky ionizujícího záření z roku 1993 shrnuje průměrné roční ekvivalentní dávky, které v člověku způsobují jednotlivé přírodní a umělé zdroje

ionizujícího záření. Celkový roční průměrný příkon ekvivalentní dávky ze všech přírodních zdrojů, je přibližně **2,4 mSv**. V následující tabulce je uvedeno, jak se jednotlivé zdroje podílejí na ozáření člověka.

Tabulka 1: Ozáření člověka z přírodních a umělých zdrojů

Zdroj záření	μSv / rok	Podíl (%)
kosmické záření	380	12,5
kosmogenní radionuklidy	12	0,4
přírodní radionuklidy – zevní ozáření	460	15,0
přírodní radionuklidy – vnitřní ozáření	230	7,5
radon a produkty jeho přeměny	1300	43,1
těžební průmysl	24	0,75
jaderná energetika	8	0,2
výroba radionuklidů	0,8	0,02
radioaktivní spotřební produkty	0,4	0,01
lékařské aplikace	660	20,6

Zdroj: vlastní zpracování, 2013 dle [6, str. 242]

Jedná se ovšem o průměrné hodnoty a v závislosti na konkrétních lokalitách se mohou i několikanásobně lišit. Například v Anglii je průměrná efektivní dávka nejnižší z EU, a to 1,7 mSv za rok. Ve Finsku je to 7,2 mSv za rok, jsou zde ovšem i lokality, kde je to přes 20 mSv za rok. V Brazílii a Indii byla zaznamenána nejvyšší intenzita záření, v místech kde jsou písčité půdy s vysokým obsahem thoria. Lidé jsou zde vystaveny dávkám 6,5-18x vyšším, než je průměrná světová hodnota. Přesto zde nebyla zjištěna vyšší úmrtnost nebo zdravotní problémy. [6, str. 255]

1.2 Jaderná energetika

Jaderná elektrárna, na rozdíl od klasické uhelné využívá teplo, které vzniká štěpením uranu. To se děje v jaderném reaktoru. „Jaderný reaktor je zařízení, které v jaderném palivu umožňuje udržovat a řídit nepřetržitou řetězovou reakci a plynule odvádět vyvíjené teplo. Prostor reaktoru, v němž probíhá štěpení, se nazývá aktivní zóna. Je v ní umístěno palivo, řídicí tyče a proudí jí chladicí médium.“ [6, str. 207]

Palivo se do reaktoru vkládá ve formě palivových článků (kazet). V reaktoru je umístěno několik set těchto palivových kazet, např. v Temelíně je to 163 palivových souborů, každý rok se mění 1/4 těchto kazet. Tyto vyhořelé články se poté skladují po dobu několika let v bazénu vyhořelého paliva, kde se jejich aktivita postupem času dále snižuje. Kapacita temelínského bazénu vyhořelého paliva je 680 míst pro kazety, palivo je zde tedy možné skladovat po dobu 10 let. [1] Po této době je palivo převezeno do meziskladu vyhořelého paliva, ovšem tento sklad již nutně nemusí být v areálu elektrárny.

Vrátím se nyní zpět k bazénu vyhořelého paliva. Kazety s palivem jsou uloženy pod vrstvou vody, která slouží jako stínící médium a také jako chladicí médium, odvádějící zbytkové teplo, které vzniká neustálým radioaktivním rozpadem paliva v kazetách. Z toho je zřejmé, že bazény se musí neustále chladit, čímž se dostáváme k nejdůležitější části jaderných elektráren a tím je právě chlazení a chladicí okruhy.

Ještě intenzivněji než články v bazénech musí být chlazená aktivní zóna. Při normálním provozu a probíhající řetězové reakci se odváděné teplo využívá k výrobě páry a pohonu turbíny. Jaderné elektrárny mohou být buď jedno, nebo dvouokruhové, české jsou dvouokruhové, kde první je okruh primární, který zahrnuje reaktor, čerpadlo a tepelný výměník. Chladicí médium se v aktivní zóně ohřívá a předává teplo přes výměník druhému, sekundárnímu okruhu. Ten se skládá z turbíny a kondenzátoru a je to již klasický okruh tepelné elektrárny, shodný s elektrárnou uhelnou. Minoritní zastoupení mají jednookruhové elektrárny, kde pára je vyráběna přímo v tlakové nádobě reaktoru a poté, co se zbaví vlhkosti, se vede přímo k turbíně. Každý reaktor má vlastní chladicí systém a tepelné výměníky, to je označováno jako jeden blok (JE Temelín má 2 bloky).

Úniku radioaktivních látek zabránuje hned několik bariér. Dnes jsou standardem 3 úrovně ochrany. V první řadě je to kovové pokrytí paliva. Druhým stupněm je reaktorová nádoba, která je hermeticky uzavřená a musí odolat vysokým tlakům i teplotám. Třetí ochranou je takzvaný kontejnment, což je také hermeticky uzavřená stavba konstruována tak, aby odolala pádu letadla i dalším extrémním podmínkám uvnitř. Musí udržet těsnost i při velkém rozdílu tlaků mezi vnitřním a vnějším prostředím. Za normálních okolností se udržuje v kontejnmentu mírný podtlak, aby v případě ztráty těsnosti došlo k nasátí vzduchu z venkovního prostředí.

1.2.1 Jaderná energetika globálně

Jaderná energetika je velice kontroverzní téma, na které pohlíží každý stát i jednotlivec jinak. Provozování jaderných elektráren a výroba elektrické energie z těchto zařízení má mnoho výhod, ale samozřejmě i nevýhod a rizik. Jako výhody můžeme uvést stabilní dodávku elektrické energie, vysoký dodávaný výkon (500-1500 MW), dlouhou životnost a výslednou velmi nízkou cenu elektrické energie.

Jako hlavní nevýhody uvedu vysokou počáteční investici, inženýrskou náročnost stavby a samozřejmě fakt, že se zde pracuje s radioaktivním materiálem. To klade ohromné nároky na preventivní bezpečnostní opatření při provozu a na zabezpečení v případě nečekané situace nebo havárie. Dále není zcela vyřešena likvidace radioaktivního odpadu.

Shoda na tom, zdali zahrnout jaderné elektrárny do energetického mixu nejen že nepanuje na jednom kontinentu, ale dokonce ani mezi státy spolu sousedícími. A právě v Evropě panuje největší neshoda ohledně využívání nebo nevyužívání jaderné energetiky. Celkový pohled se postupem času různě utvářel a formuloval, veliký vliv na něj měly havárie v jaderných zařízeních, vyjmenuji zde stručně tři nejvýznamnější z nich a jejich dopady. [6, str. 278-9]

Windscale, Velká Británie, 1957 – došlo k přehřátí 150 palivových článků, grafit a uran reagoval se vzdušným kyslíkem, velká část aktivní zóny byla poničena požárem. Došlo k úniku velkého množství štěpných produktů větracím komínem. Zemědělská půda, mléko a mléčné výrobky byly kontaminovány nuklidem ¹³¹I. Ovšem zásah zdravotnických organizací byl rychlý, došlo ke stažení kontaminovaných potravin z oběhu a havárie se obešla bez zdravotních následků pro obyvatelstvo.

Three Mile Island, Pensylvánie, USA, 1979 – Kombinací několika malých technických závad a chyb obsluhy došlo k přehřátí reaktoru a následným výbuchům nahromaděného vodíku. Únik radioaktivních plynů trval po dobu několika týdnů. Byla provedena evakuace těhotných žen a dětí z okruhu 8 km, do 15 km bylo doporučeno nevycházet a nepoužívat klimatizaci. Opět nebyla způsobena zdravotní újma obyvatelstvu.

Černobyl, Ukrajina, 1986 – Nejvážnější havárie v historii jaderné energetiky vznikla kombinací vlastností reaktoru (při vzrůstající teplotě v reaktoru se rychlost reakce zvyšuje) a velmi hrubým pochybením a porušením předpisů ze strany obsluhy. Hlavní příčinou byl experiment, který měl dokázat, že dobíhající turbogenerátor, po rychlém uzavření přívodu páry, dokáže napájet elektřinou díky svému setrvačnému doběhu, ještě zhruba 40 sekund čerpadla havarijního chlazení. Bylo naplánováno snížení výkonu reaktoru z 1000 MW na 700 MW, což byla nejnižší povolená hodnota, při které bylo povoleno reaktor provozovat. Chybnou obsluhou byl ale výkon snížen až na 30 MW. V takovém případě měl být reaktor okamžitě odstaven, ale nestalo se tak a experiment dále pokračoval samotným odpojením turbogenerátoru. Poklesl průtok chladicí kapaliny, reaktor se dostal do velice nestabilního stavu a jeho výkon a tím teplota začali rapidně růst. Automatika, která měla v takovém případě zajistit okamžité zasunutí havarijních tyčí byla vypnuta, aby nerušila experiment. Byl tedy proveden pokus o zastavení reaktoru manuálním zasunutím tyčí, to se ovšem nepodařilo, protože se je podařilo zasunout pouze do jedné třetiny (zkroutily se a dál zasunout nešly). Štěpná reakce se tak nezastavila, naopak její rychlost dále rostla až na stonásobek jmenovitého výkonu. V reaktoru se vytvořil obrovský přetlak, který způsobil explozi a vyvržení paliva. Do ovzduší se uvolnilo ohromné množství radioaktivity a zamořilo část území Běloruska, Ukrajiny a Ruska. Několik desítek lidí zemřelo na následky ozáření při likvidaci havárie a byl zjištěn zvýšený výskyt rakoviny štítné žlázy.

Tyto tři jaderné havárie se nejvýznamněji podílely na formování názoru na jadernou energetiku. Řada lidí je toho názoru, že provozování jaderných zařízení představuje neakceptovatelně velké riziko. Je třeba ale porovnat tyto 3 havárie s ostatními průmyslovými haváriemi v energetice, například při těžbě ropy a uhlí. Dojdeme k závěru, že jaderná energetika není zdaleka nejnebezpečnějším způsobem výroby energie, vzpomeňme na ztráty na životech v dolech při těžbě uhlí, nebo na ekologické havárie při těžbě ropy. Možná ale daleko větší nebezpečí představuje

uvolňování CO₂ do atmosféry, při spalování fosilních paliv. Nejen pro mě je velmi těžké zodpovědět otázku, zda CO₂ způsobuje globální oteplování a extrémní počasí. Nejsou na to schopni odpovědět ani odborníci, kteří tomu věnovali roky výzkumu. Jedno je ale jisté, spalováním těchto paliv výrazně měníme složení atmosféry. Fosilní paliva se vytvářela po dobu stovek milionů let a v současné době se CO₂ uvolňuje mnohonásobně rychleji, než se opět stačí ukládat. Tyto všechny faktory je třeba brát v úvahu při posuzování jaderné energetiky a jejích dopadů v porovnání s ostatními zdroji elektřiny.

1.2.2 Jaderná energetika v Japonsku

Japonsko má díky své geografické poloze řadu omezení a rizik. Leží v oblasti, kde se poměrně často vyskytuje zemětřesení a následné vlny tsunami. Díky tomu jsou vyloučeny velké přehradní a velké vodní elektrárny, kvůli hrozícímu protřetí. Malé vodní toky jsou zpravidla již využity. Zásoby fosilních paliv jsou velmi malé, Japonsko je proto velmi závislé na dovozu surovin. Není zde tedy mnoho dalších možností produkce elektřiny, nemůže se spolehnout ani na velký podíl z obnovitelných zdrojů, protože ty dodávají elektřinu nárazově a Japonsko nemá možnost přeshraničního obchodu s elektřinou, v případě přebytku. To je možné například v Evropě, kde třeba Dánsko produkuje významný podíl elektřiny z větrných elektráren, což je ale možné pouze kvůli výměně elektrické energie se svými sousedy. V Japonsku jsou tedy dvě možné cesty produkce elektřiny, a to buď drahý dovoz fosilních paliv, nebo produkce elektřiny z jadra. Japonsko zvolilo poměrně jasně druhou, jadernou cestu. První jaderná elektrárna byla uvedena do provozu v roce 1966, od roku 1973 si japonská vláda stanovila jadernou energetiku jako prioritu. Na rozdíl od Evropy a USA jsou v Japonsku nové bloky ve výstavbě neustále, útlum nenastal ani po černobylské havárii. [29] Plán na rozvoj jaderné energetiky, který byl vytvořen v roce 2010, si dal za cíl dosáhnout 50% vyrobené elektrické energie z jaderných elektráren do roku 2030. [14] Produkce elektřiny z jednotlivých zdrojů vypadala podle statistiky International Energy Agency (IEA) v roce 2009, tedy před zemětřesením, následovně: Plyn 27,2%, jádro 26,7%, uhlí 26,6%, ropa 8,7%, vodní zdroje 7,8% a větrné a sluneční elektrárny se na celkové výrobě nepodílí ani jedním procentem. [9]

Dalším specifickým Japonska je to, že nemá jednotnou rozvodnou síť. Je to způsobeno tím, že japonská rozvodná síť se začala budovat odděleně, ve dvou místech.

Ve východní části bylo instalováno německé zařízení (AEG) pracující s frekvencí 50 Hz a v západní části budovala síť americká společnost (General Motors), pracující na frekvenci 60 Hz. Tento stav je zachován dodnes a je velice obtížné kompenzovat nedostatek elektrické energie z jedné části Japonska do druhé. Slouží k tomu tři frekvenční konvertory, o celkovém maximálním přenášeném výkonu 1 GW, což je na celé Japonsko málo a není tak možné kompenzovat rozsáhlejší výpadek elektrické energie. [27]

V současné době je v Japonsku 18 jaderných elektráren, v nichž je dostavěno 54 reaktorů, s celkovým výkonem 46,2 GW (pro porovnání uvedu, že každý ze dvou temelínských bloků má výkon 1 GW). Další dva bloky jsou rozestavěné [29], detailní mapa Japonska s dostavěnými elektrárnami reaktory viz Příloha A.

1.2.3 Jaderné elektrárny Fukušima

Japonsko se administrativně rozděluje na 47 prefektur, což mohou přirovnat k rozdělení na kraje v ČR. V prefektuře Fukušima jsou dvě jaderné elektrárny: Fukušima I (Dajči) a Fukušima II (Daini). Obě leží na východním pobřeží Japonska, vzdáleny jsou od sebe 12 km. Dohromady mají 10 jaderných bloků, podrobný rozpis je v následující tabulce:

Tabulka 2: Reaktory v elektrárnách Fukušima I a II

	Fukušima I						Fukušima II			
blok (č.)	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4
spuštěn (rok)	1971	1974	1976	1978	1978	1979	1981	1983	1984	1986
výkon (MW)	460	784	784	784	784	1100	1100	1100	1100	1100

Zdroj: Vlastní zpracování, 2013 dle [20]

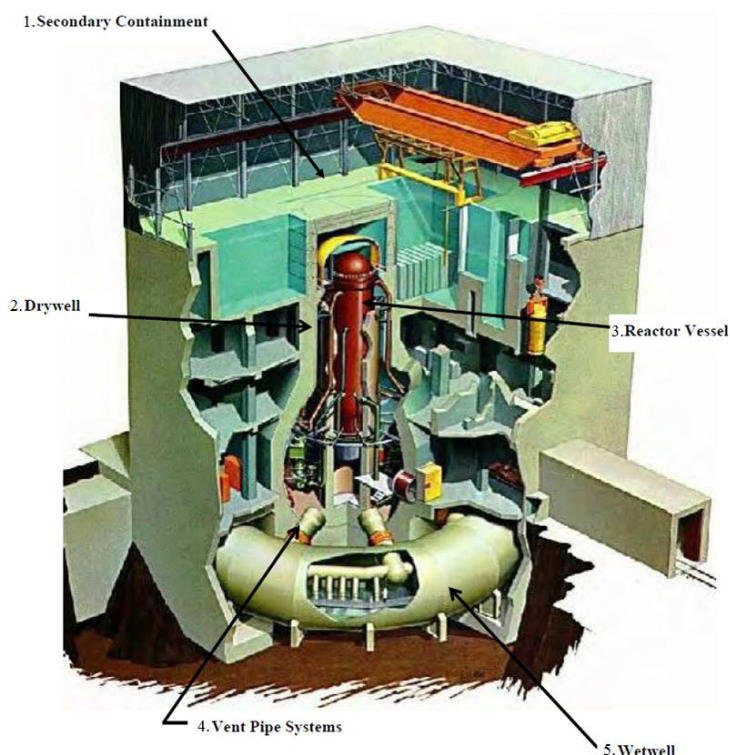
V jaderné elektrárně Fukušima I byla v plánu dostavba dalších dvou bloků, každý o výkonu 1380MW elektrické energie. Spuštěny měly být v letech 2016-2017, v současné době je plán na dostavbu pochopitelně zrušen.

Na obrázku č. 1 je detailní schéma reaktorů 1-5 Fukušimi I. Tyto bloky jsou jednookruhové a disponují několika úrovněnou ochranou. Reaktorová tlaková nádoba je umístěna v primárním kontejneru, který je konstruován na velmi vysoké tlaky

i teploty. To je hlavní a klíčová ochrana k udržení radioaktivního materiálu uvnitř. Můžeme ho rozdělit na suchou a mokrou část, v případě vysokých teplot a tlaků totiž můžeme odpustit páru ze suché části do mokré, kde zkondenzuje. V mokré části jsou zároveň zásoby vody pro havarijní dochlazování. Dále kolem primárního kontejnmentu je budova reaktoru, která se někdy označuje také jako sekundární kontejnment, což je také železobetonová stavba, už ale není tak odolná jako kontejnment primární. Zajímavě je zde vyřešeno umístění havarijních tyčí, které nejsou umístěny nahoře a drženy elektromagnetem, jako u dvouokruhových elektráren. Jsou ve spodní části reaktoru, a aby jejich zasunutí bylo na vnější energii nezávislé a automatické, gravitační sílu zde nahradí stlačený plyn. Drženy jsou pak opět elektromagnety.

V Japonsku je zvykem vždy po třinácti měsících provádět odstávky a inspekce reaktorů, následně probíhá v místní samosprávě schvalování jejich opětovného uvedení do provozu. Tak tomu bylo právě i ve Fukušimě I, kde byly v provozu pouze první tři reaktory. Ostatní tři reaktory byly odstaveny právě z důvodu pravidelné údržby, jeden z nich byl bez paliva, to bylo čerstvě přesunuto do bazénu vyhořelého paliva. Ve Fukušimě II byly všechny 4 bloky v plném provozu. [23]

Obrázek 1: Schéma reaktoru 1-5, Fukušima I



- 1...Sekundární kontejnment
- 2... “Suchá” část kontejnmentu
- 3... Tlaková nádoba reaktoru
- 4... “Mokrá” část kontejnmentu
- 5... Potrubí ventilace reaktoru

Zdroj: General Electric, 2011 dle [5]

2. JADERNÁ HAVÁRIE A NÁSLEDKY PRO OKOLÍ JE

Japonsko zasáhlo 11. března 2011 nejsilnější zemětřesení v jeho historii, o síle 9 stupňů Richterovy škály. Trvalo zhruba 6 minut a při samotném zemětřesení byla poškozena hlavně infrastruktura. Naštěstí nedošlo k velkým ztrátám na životech. Způsobilo ovšem masivní vlnu tsunami, která měla devastující dopad jak na celé východní pobřeží Japonska, tak i na fukušimskou jadernou elektrárnu. Výstraha o tsunami byla vydána několik minut po zemětřesení, mělo však jít o přívalovou vlnu v průměru půl metru až dva metry vysokou. Tento odhad byl ale velice nepřesný a výsledná vlna dosahovala místy i desítky metrů. I přes to, že japonská vláda investovala velké finanční prostředky do vybudování ochranných zdí a vlnolamů, nebyly konstruovány na vlnu takových rozměrů a na mnoha místech byla zeď zcela zničena, nebo se přes ni voda přelila. Pro prefekturu Fukušima byla vyslána výstraha před vlnou o výšce 3 metry, nakonec ale k pobřeží dorazila vlna o výšce 14 metrů. Dle výzkumu tokijské univerzity byla vůbec nejvyšší vlna tsunami zaznamenána ve městě Miyako, kde dosáhla 37.9 metrů [24].

Jak vidíme i podle téměř čtyřicetimetrové tsunami, byla tato přírodní katastrofa opravdu extrémních rozměrů. Vzhledem k tomu, že Japonsko má velmi husté osídlení právě u pobřeží, způsobila ohromné škody na majetku, i ztráty na životech. U pobřeží jsou také všechny japonské jaderné elektrárny, [Příloha A] celkem byly zasaženy 4 z nich. Byla to elektrárna Tokai-2 (prefektura Ibaraki) s jedním reaktorem, který byl v provozu, elektrárna Onagawa (prefektura Miyagi), kde byly v provozu všechny její 3 reaktory a dvě fukušimské elektrárny Fukušima I a Fukušima II. Nejvážněji byla poškozena Fukušima I, jí se tedy budu zabývat nejvíce a okrajově také Fukušimou II. Ostatní 2 elektrárny nebyly vážně poškozeny a již se jimi nebudu dále zabývat.

2.1 Poškození a současný stav fukušimských elektráren

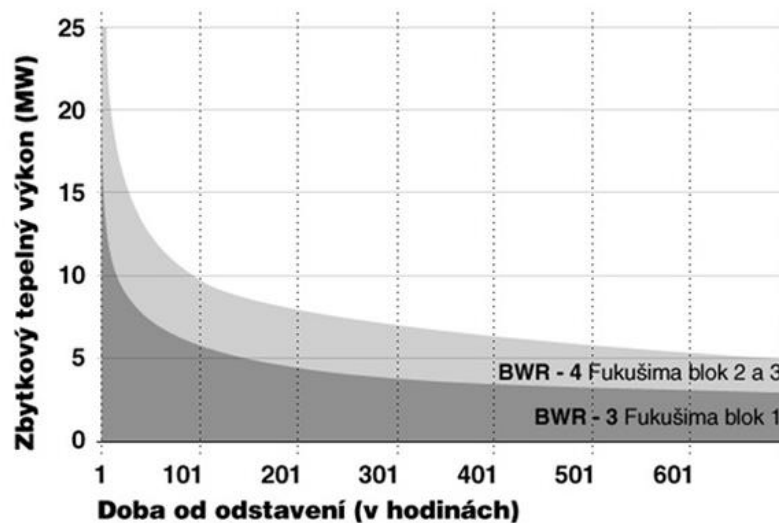
Jaderné elektrárny mají velmi přísné bezpečnostní standardy, a pokud dojde k nějaké neočekávané situaci, kterou může způsobit buď technický problém, nebo právě vliv přírody (zemětřesení, hurikán), dochází k okamžitému odstavení jejich reaktorů. To si dovolím rozdělit na 2 fáze, kdy v první dochází k zasunutí tyčí (regulačních a havarijních), které pohlcují neutrony a zastaví tak řetězovou reakci (v případě

elektrárny samozřejmě řízenou). Například již tento nejdůležitější úkon se nepodařilo provést v Černobyli. Druhá fáze je postupné dochlazení reaktoru. Přesto, že regulační tyče jsou zcela zasunuty, stále pokračuje rozpad nahromaděných štěpných produktů a teplo tak v reaktoru dále vzniká. Je tedy třeba mít ještě po dlouhou dobu zajištěné spolehlivé a fungující chlazení reaktoru.

V době zemětřesení byly ve Fukušimě I v provozu 3 reaktory, které pracovaly na plný výkon. Prvním klíčovým úkolem po zemětřesení, zastavit štěpnou reakci, zvládnou všechny reaktory skvěle. A to i přes to, že fukušimské reaktory patří celosvětově k těm nejstarším, které byly v provozu. Stavět se totiž začaly již v 60. letech minulého století a zemětřesení dalece přesáhlo hodnoty, na které byly elektrárny projektovány [10]. Ve druhé fázi musí být zajištěno chlazení a odvod zbytkového tepla, vlivem zemětřesení však došlo k přerušení dodávky elektrického proudu do elektrárny. Pro tyto případy jsou v elektrárnách náhradní zdroje elektřiny, dieselagregáty. Ty zemětřesením poškozeny nebyly, v pořádku naběhly a začaly dodávat elektrárně potřebnou elektřinu. Pouze ale do té doby, než dorazila k elektrárně přívalová vlna tsunami, což bylo přibližně za hodinu. Elektrárna neměla šanci se jí ubránit, byla totiž dimenzována na vlnu o výšce 6 metrů, dorazila ale vlna o výšce 14 metrů. Zaplavila a zničila všechny dieselagregáty a většinu elektrických rozvodů. Reaktory se tak ocitly bez chlazení.

Teplo produkované ve fukušimských reaktorech po tsunami, i jeho pokles v čase, velice hezky popsal jaderný fyzik Dušan Kobylka, z katedry jaderných reaktorů FJFI ČVUT, cituji: „V okamžiku zemětřesení reaktor 1. bloku elektrárny Fukušima I ve své aktivní zóně vytvářel zhruba 1 400 megawattů tepla. Teplo se mění u těchto elektráren na elektřinu s účinností asi 31,8 procent. Výroba elektřiny činila zhruba 460 MW (tedy necelou polovinu jednoho bloku Temelína). Silnější reaktory 2. a 3. bloku vyráběly zhruba 780 MW elektřiny. V jejich nitru tedy vznikalo přes 2 400 MW tepla. Po hodině, kdy v elektrárně přestala fungovat čerpadla poháněná dieselagregáty, činil tepelný výkon místo 2400MW zhruba 40 MW u silnějších reaktorů 2 a 3. Necelých 23 MW tepla vytvářel slabší, první blok.“ [13]

Obrázek 2: Tepelný výkon fukušimských bloků 1-3 v závislosti na čase



Zdroj: KOBYLKA Dušan, 2011 [13]

Z obrázku i citace plyne, že množství produkovaného tepla v prvních hodinách klesá téměř exponenciálně. Ohromným úspěchem tedy bylo, že se povedlo odvádět teplo po zemětřesení, po první hodině totiž klesl tepelný výkon více než padesátinásobně. I tak ale zůstalo u dvou výkonnějších bloků 40 MW tepelné energie, kterou je třeba odvádět. Pokud se tak neděje, začne se v reaktoru velmi rychle zvyšovat tlak i teplota a chladicí voda se odpařuje. Pokud toto odpařování nekompenzujeme dodávkami vody nové, hladina vody v reaktoru se dále snižuje a v nejhorším případě dojde k odhalení paliva, což ještě více zhorší jeho chlazení a teplota tím začne dále rapidně růst.

Palivo, používané ve fukušimských reaktorech, se potahuje vrstvou zirkonia, které zabraňuje radioaktivním jádrům, aby se za běžného provozu dostala z paliva ven. Problém ale nastává ve chvíli, kdy se teplota paliva začne zvyšovat, jak už bylo výše zmíněno, při odhalení paliva. Při teplotě nad 800 °C začne vrstva zirkonia oxidovat, čímž vzniká oxid zirkoničitý, další teplo, ale hlavně vzniká nebezpečný a výbušný vodík. Z paliva, které má poškozenou ochrannou vrstvu se začnou uvolňovat radioaktivní nuklidy, převážně jód (^{131}I) a cesium (^{137}Cs). Pokud teplota dosáhne 1850 °C, začne se ochranná vrstva tavit a při teplotě nad 2400 °C se taví samotné palivo. [28]

V chladicích systémech se za normálních okolností používá demineralizovaná voda. Prvním důvodem je, aby se v reaktoru a chladícím potrubí netvořily usazeniny a druhým důvodem je to, že v takové vodě vzniká pouze minimum radioizotopů. V havarijním stavu, pokud tlak dosáhne nebezpečných hodnot, se přistupuje k odpouštění páry, která je tak jen mírně radioaktivní. V našem případě muselo dojít i k tak extrémnímu opatření, že se do chlazení musela pumpovat i mořská, agresivní voda, což samozřejmě znamená korozi a úplné zničení reaktorových nádob. V dalších podkapitolách popisují poškození jednotlivých reaktorů, jejich chlazení a chlazení bazénů vyhořelého paliva.

2.1.1 Fukušima I – blok 1

Po zemětřesení došlo k odstavení reaktoru, ovšem za necelou hodinu, kdy dorazila vlna tsunami, došlo ke ztrátě všech zdrojů elektrické energie a přestalo tak fungovat standardní chlazení. Na všech reaktorech je ale pro tyto případy nainstalován systém izolovaného chlazení, což je v jednoduchosti čerpadlo, poháněno párou z reaktoru. Chladicí voda je brána ze zásobníku, který je ale u tohoto reaktoru velmi malý. Tento systém je soběstačný a na elektrické energii nezávislý, ale pouze do té doby, než voda v zásobníku dosáhne 100 °C, poté přestává chladicí okruh fungovat. To se stalo velmi brzy a zhruba po třech a půl hodinách se stačilo vypařit takové množství vody, aby se palivo začalo obnažovat. Prioritním cílem bylo samozřejmě doplnění vody, aby se chlazení alespoň částečně obnovilo, to se podařilo až po 12 hodinách. Teploty a tlaky byly na nebezpečně vysokých hodnotách a tak se muselo přistoupit k vypouštění radioaktivní páry. Když k tomu došlo, následovala exploze, kterou způsobil nahromaděný vodík, což potvrdilo, že palivo bylo již obnaženo. Výbuch zničil budovu reaktoru a poškodil zařízení pro manipulaci s palivovými kazetami v bazénu vyhořelého paliva. Naměřená efektivní dávka po odpouštění páry byla v areálu elektrárny 1015 μSv za hodinu. Novou vodu se podařilo začít pumpovat do reaktoru až zhruba po 28 hodinách od tsunami a výpadku chlazení, čímž se celá situace stabilizovala. Do vody se přidával bór, aby se zpomalila štěpná reakce. Vodíkovou explozí naštěstí nebyla poškozena těsnost primárního kontejnmentu.

V současné době je již dostavěna nová budova, která hermeticky uzavřela výbuchem poškozenou původní budovu. Tím se velmi snížilo další šíření radioaktivity po areálu elektrárny. Stále vysoká radioaktivita je ovšem v budově, v blízkosti reaktoru, v březnu 2013 to bylo 60 mSv/hodinu. Vnitřek kontejnmentu se povedlo prozkoumat kamerou, konstrukce je nepoškozená. [28], [30], [31], [32]

2.1.2 Fukušima I – blok 2

Třetí, a právě i tento druhý blok, měly výhodu v tom, že chlazení zde po výpadku elektřiny funguje delší dobu. Je to kvůli tomu, že je ve spodní části reaktorů umístěna toroidní nádrž, která obsahuje miliony litrů chladicí vody. Chlazení tak u tohoto bloku vydrželo nejdéle ze všech, téměř tři dni. Ovšem po zastavení chladicího okruhu se palivo začalo obnažovat už po třech a půl hodinách. Nahromaděný vodík způsobil explozi přímo v primárním kontejnmentu. Budova bloku, ani jeřáby pro manipulaci s palivem tak poškozeny nebyly. Mořskou vodu se podařilo přivést až po dalších třech hodinách. 15. března 2011 ale došlo k masivnímu úniku radioaktivity do ovzduší z kontejnmentu, který byl pravděpodobně poškozen výbuchem. Toto byl největší únik radioaktivních látek a je hlavním zdrojem kontaminace Fukušimi i jejího okolí.

Zde se v lednu 2012 podařilo zavést kameru, aby byl prozkoumán vnitřek kontejnmentu. Výška hladiny vody byla zhruba 60 cm, což znamená, že někde voda stále unikala. Radiace v budově je velmi vysoká, v březnu 2013 bylo změřeno 880 mSv/hod. To zatím znemožňuje práci lidí a tak je pomocí robotů monitorována radiační situace, aby bylo možno naplánovat postup odklizení trosk a dekontaminaci budovy. Plášť budovy zde naštěstí výbuchem poškozen nebyl, přesto ale zcela netěsní, na čemž se podepsala hlavně tsunami. Nyní se tedy práce soustřeďují na utěsnění této budovy. [28], [30], [31], [32]

2.1.3 Fukušima I – blok 3

Tento blok se stejně jako druhý také dokázal samovolně chladit delší dobu i po výpadku elektřiny, po dobu 12 hodin. Aktivní zóna se začala obnažovat až po zhruba 7,5 hodinách, což je nejdelší čas ze všech tří reaktorů po výpadku standardního

chlazení. Po několika minutách se podařilo přivést do reaktoru mořskou vodu a opět bylo třeba část radioaktivní páry vypustit do ovzduší, což opět způsobilo výbuch nahromaděného vodíku. Nejprve v budově třetího bloku a o několik hodin později i výbuch v budově čtvrtého bloku, jelikož ventilační systémy těchto dvou bloků jsou spolu propojeny. Naměřený dávkový příkon byl u třetího bloku 1204 μSv za hodinu. Budova nebyla poškozena tak rozsáhle jako u prvního bloku a těsný zůstal i primární kontejnment. Ovšem zařízení na manipulaci s palivovými kazetami bylo zcela zničeno a jeho trosky, i trosky budovy, napadaly do bazénu vyhořelého paliva. V podstatě celé patro, kde se nachází bazén s vyhořelým palivem, bylo zasypáno troskami.

U tohoto bazénu se tedy jako u prvního ze všech začalo s kontrolou paliva, jestli nebylo poškozeno a neuniká do bazénu. Pomocí kamery bylo zjištěno, že palivo je v pořádku. Trosky je ale možné začít vyzvedávat až po dokončení nové budovy, aby se nešířila radioaktivita. [28], [30], [31], [32]

2.1.4 Fukušima II, bazény vyhořelého paliva

V elektrárně Fukušima II jsou naštěstí následky nehody o dost mírnější než v případě Fukušimi I. Přestože tsunami zde dosahovala v podstatě stejné výšky a zaplavila většinu zařízení elektrárny, nejdůležitější část poškozena nebyla. Tou jsou dieselagregáty. Po tsunami bylo chlazení nějakou dobu nefunkční, protože byla zničena elektroinstalace a rozvaděče. Během této doby se postupně zvyšovaly teploty a tlaky v reaktoru, uvažovalo se tak o vypuštění páry z prvního reaktoru. Díky správné funkci izolovaného chlazení, kterým mimo bloků č. 2 a 3 u Fukušimi I disponuje i Fukušima II, nedošlo k obnažení paliva a vypouštěná pára by tak byla jen velmi mírně radioaktivní. Nakonec ale ani to nebylo třeba, protože chlazení se povedlo u všech 4 reaktorů dostatečně včas obnovit a reaktory tím zcela stabilizovat. Během 6 měsíců probíhaly úklidové práce, povedlo se odklidit všechny trosky a elektrárnu vyčistit.

Situace se také zkomplikovala u bazénů vyhořelého paliva, nejvíce u čtvrtého bloku Fukušimi I. Reaktor zde byl zcela bez paliva, všechno bylo 3 měsíce před zemětřesením přesunuto právě do bazénu, jeho aktivita tak byla stále vysoká. Bylo zde zároveň připraveno palivo nové, 204 palivových kazet. Kazet vyhořelého paliva zde bylo 1331. V bazénu vyhořelého paliva třetího bloku bylo 514 vyhořelých a 52 nových palivových kazet. Situace zde byla poměrně vážná, protože pokud se bazény nechladí, jejich teplota

rychle roste a voda se odpařuje. Voda má kromě chladicího efektu i funkci stínění radioaktivního záření, které vzniká rozpadem jader v kazetách paliva. Po několika dnech po havárii byl proveden pokus doplňovat vodu do bazénů z helikoptéry, příliš úspěšný ovšem nebyl. Nakonec se to povedlo pomocí výkonných tlakových stříkaček, nouzově musela být opět využita mořská voda. V bazénu prvního bloku bylo 292 použitých a 100 čerstvých článků, a protože nejvyšší teplo produkují články vyhořelé, nebyla situace v tomto bazénu tak kritická jako právě u čtvrtého bloku. Všechno palivo by se mělo přemístit do společného bazénu. Tam je jich možné sice uskladnit 6840, ovšem v tomto bazénu je zaplněno 6375 pozicí a tak je třeba nejdříve část pozic uvolnit. Pokud jsou články dostatečně dlouho v bazénu, mohou být umístěny do suchého ocelového kontejneru.

Budova čtvrtého bloku byla silně poškozena výbuchem vodíku, který se tam dostal ze třetího bloku, v současné době jsou již ale všechny trosky z budovy odklizeny a tak mohla být zahájena likvidace tohoto bloku. Bylo sejmuto víko primárního kontejneru a poté i víko reaktorové nádoby. Vodu v bazénu se povedlo zcela vyčistit a v červenci 2012 byly vyjmuty a prozkoumány 2 čerstvé palivové články, které se měly doplnit do reaktoru. Ukázalo se, že jsou v pořádku a mohou se všechny přesunout do společného bazénu. V současné době probíhá stavba nového zařízení pro manipulaci s palivovými články a přesouvání by mělo začít v listopadu tohoto roku. [28], [30], [31], [32]

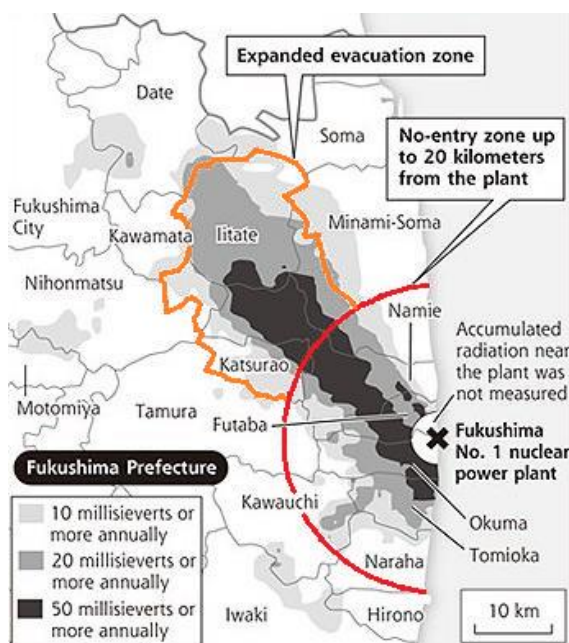
2.2 Následky pro okolí elektrárny a pro Japonsko

Největší vliv fukušimské nehody je únik radioaktivních látek mimo primární kontejnment, které unikly z druhého reaktoru. Dále pak při odpouštění páry, což bylo nutné pro udržení bezpečných tlaků v reaktorech. Tato pára je ještě před vypuštěním filtrována, což ještě podstatně snižuje její radioaktivitu. Přesto ale dávkový příkon přesahoval 1 Sv za hodinu, v okolí obou bloků, kde se pára odpouštěla. K dalšímu snižování efektivní dávky dochází samovolně a v prvních dnech téměř exponenciálně, protože majoritním radionuklidem je jód, s poločasem rozpadu 8 dní. Příloha C graficky znázorňuje dávkový příkon, můžeme vidět, že špička byla po vodíkovém výbuchu a výrazné zhoršení radiační situace nastalo po dešti. Protože poté již k dalším únikům nedocházelo, vidíme postupné, ze začátku velmi rychlé snižování efektivní dávky.

2.2.1 Radiační situace

Radioaktivita zamořila území elektrárny i rozsáhlou oblast mimo ni. Kam se radioaktivita bude šířit, ovlivňuje hlavně vítr, část tak byla zaváta do moře, kde se rychle rozředila a část šla do vnitrozemí. Kontaminaci vnitrozemí vidíme na obrázku níže.

Obrázek 3: Radioaktivní zamoření Japonska, říjen 2011



Zdroj: Vlastní barevné zpracování, 2013 dle [13]

Tím, že reaktory přežily zemětřesení a po tsunami se ještě nějakou dobu zvládly chladit, bylo dostatek času na provedení evakuace. To byl ohromně důležitý a klíčový moment, díky kterému byl dopad na obyvatelstvo jen velmi malý. Byla vyhlášena povinná evakuace všech obyvatel v okruhu 20 km od elektrárny, což je na mapě zobrazeno červenou barvou, týkalo se to přibližně 78 tisíc obyvatel. Dále pak nepovinná mezi 20 – 30 km od elektrárny, v tomto území byla vyhlášena takzvaná pohotovostní zóna, kde museli být lidé připraveni na okamžitý odchod, pokud by se situace změnila. To se týkalo asi 58 tisíc obyvatel, z nichž většina se odstěhovala dobrovolně. V průběhu několika dní, po vypouštění a úniku radioaktivity, byla povinná evakuace vyhlášena ještě na území, která jsou na mapě vyznačena nejtmaší barvou, jednalo se zhruba o dalších 10 tisíc lidí, na obrázku vyznačeno oranžovou barvou. [28]

Nyní, více než dva roky po havárii, se již většina evakuovaných mohla vrátit zpět. Zůstávají však i místa, kde to nebude v nejbližší době možné. Zasažená místa se obyvatelům otvírala postupně v průběhu let 2012 a 2013. Příloha B zobrazuje úbytek radioaktivního záření, území se dá rozdělit na 3 zóny, podle míry zamoření. První, kde je roční dávkový příkon nižší než 20 mSv, je připraveno k návratu lidí a zároveň zde stále probíhá snižování této roční dávky, cílem je 1 mSv. Pak už bude vliv Fukušimi necelá polovina ročního přirozeného pozadí. 1 mSv ročně je také maximální limit, který může civilní občan obdržet z umělých zdrojů. Dekontaminace probíhá odstraňováním několika centimetrů půdy, umělé povrchy jsou čištěny proudem vody pod vysokým tlakem. Druhou zónou je území, kde je nyní roční dávkový příkon je mezi 20 a 50 mSv, tam je cílem snížit tuto hodnotu pod 20 mSv do dvou let, toto území je nyní možno bezpečně navštěvovat. Třetí, nejvíce zasažená oblast, má roční dávku nad 50 mSv, dekontaminace zde zatím neprobíhá, hledá a plánuje se nejefektivnější způsob vyčištění. Dekontaminací vzniká ohromné množství radioaktivního odpadu, který je třeba někde skladovat. Jsou to tuny odstraněné zeminy a velké množství trosk. Ty vznikly při tsunami, nebo bouráním budov, které se nevyplatí dekontaminovat. Jako dočasné skládky se nabízí právě ty nejvíce zasažené oblasti, kde bude návrat obyvatel možný až za několik let, to se ovšem přirozeně nelíbí místním. [30]

Velmi sledovaným se svými 13 miliony obyvateli bylo i hlavní město Japonska Tokio, vzdálené přes 200 km od Fukušimi. Přirozená radioaktivita je zde velmi nízká, v porovnání třeba s naším územím, dosahuje zde totiž pouze 0,036 μ Sv za hodinu (0,32 mSv za rok). Zvýšená radioaktivita byla zjištěna první dny, průměrný příspěvek Fukušimi byl zhruba 0,14 μ Sv za hodinu. [Příloha C] Může se to zdát jako velké číslo, protože je to téměř 4x tolik, je třeba ale říci, že v součtu byla celková roční dávka pro obyvatele Tokia stále menší než třeba v České Republice. Příloha C ukazuje i další velice zajímavou věc a tou je efektivní dávka, kterou obdržíme uvnitř letadla ve výšce 10 km. Tato hodnota je 3,8 μ Sv za hodinu.

Tím, že obyvatelé byli z nejvíce zasažených území včas evakuováni, radiační zátěž na ně byla minimální. Potvrzuje to i výzkum Světové zdravotnické organizace (WHO) z roku 2013, jehož závěrem je, že dopady radiace budou nepozorovatelné. [33] Zdravotní stav je ovšem třeba dále sledovat a děje se to tak několika na sobě nezávislými zdroji, jako Mezinárodní agenturou pro jadernou bezpečnost, Greenpeace, japonskou vládou, dále pak občané byly vybaveni dozimetry, pro kontrolu aktuálního

dávkového příkonu. Kontrola je tak velmi dobrá. Kromě zdravotních dopadů jsou důležité ovšem také psychologické důsledky nehody. U lidí zasažených takovou nehodou se často projevuje strach, deprese a různé psychické poruchy. [6, str. 280]

Velmi pečlivě je sledována i kvalita potravin a zdrojů pitné vody, zde se radioaktivita měří v Becquerelech (Bq) na jeden kilogram, popř. na jeden litr. Japonské limity v pitné vodě jsou 300 Bq/l pro dospělé a 100 Bq/l pro kojence. Tyto limity naštěstí často překračovány nejsou, stalo se to pouze v prvních dnech po havárii, i tak jen velmi mírně. Překročeny byly i v Tokiu 22. a 23. 3. 2011, aktivita zde dosáhla 200 Bq/l, byl tak vyhlášen zákaz užívání pitné vody pro kojence. To přirozeně vyvolalo velkou paniku a způsobilo to okamžité vyprodání balené vody. Podobná situace je i s potravinami, jedná se hlavně o rybolov a pěstování rýže. Překročení hygienických norem je jen velmi vzácné, a pokud k němu dojde, je malé. Tento pozitivní stav je opět způsoben včasnou informovaností a prevencí. V prefektuře Fukušima se dokonce opět pěstuje rýže a byla již úspěšně dodána na trh, samozřejmě pod velmi přísnou kontrolou. To považuji za jakýsi psychologický průlom, že potraviny z bližšího okolí elektrárny jsou již bezpečné. Získání důvěry je důležité, aby se podařilo obnovit místní zemědělství, vrátit tím místním práci a život do normálu.

2.2.2 Japonská energetika

Tak závažná nehoda samozřejmě vedla k velké diskuzi o budoucnosti japonské jaderné energetiky. Navrhla se také řada nových opatření, pro zvýšení bezpečnosti jaderných elektráren, zejména zvýšení hrází proti tsunami a znásobení záložních zdrojů. Japonská vláda podobně jako ostatní vlády světa, včetně EU, vyhlásila po havárii povinné stress testy všech jaderných elektráren, s cílem zjistit, zda je jejich odolnost v případě dalšího zemětřesení a tsunami dostatečná. Měly by to být počítačové simulace, právě v případě zemětřesení, tsunami a výpadku elektřiny. Jak jsem již popisoval v kapitole o fukušimských jaderných elektrárnách, v Japonsku se vždy po 13 měsících provádí odstávka jednotlivých bloků kvůli údržbě a kontrole, poté se vždy rozhoduje v místním úřadu o jejich znovuvvedení do provozu. Od března 2011 tak neustále ubývalo japonských jaderných elektráren v provozu, protože místní úřady se rozhodly počkat právě na výsledky stress testů. Ke konci roku 2011 tak bylo v provozu pouze 5 reaktorů, rok po havárii už pouze dva reaktory a poslední byl odstaven

6. května 2012. Japonsko tak bylo zcela bez jaderných elektráren a nedostatek elektřiny pocítilo velmi výrazně, celou situaci navíc komplikuje nejednotnost rozvodné soustavy. Vláda proto musela nařídit celou řadu opatření, pro úsporu s elektřinou. Například snížením minimální teploty na 19 stupňů v zimním období, naopak navýšením teploty klimatizace na 28 stupňů v období letním, velcí odběratelé museli odběr rozložit na víkend nebo noc, aby nebyla odběrová špička pouze v pracovní dny. Muselo se dokonce přistoupit k tak radikálnímu kroku, jako je postupné vypínání proudu v době největších špiček, např. TEPCO vypínalo proud na 3 hodiny, vždy to v 5 oblastech po sobě. [31]

Nedostatek z jaderných zdrojů se kompenzuje spalováním fosilních paliv, úsporami a omezováním spotřeby. Protože Japonsko velkou většinu fosilních paliv musí dovážet, výrazně se to projevilo na růstu ceny elektřiny, ta stoupla o 10-20%. [35] To je samozřejmě velmi nebezpečné pro japonskou ekonomiku, kdy hrozí ztráta konkurenceschopnosti a toto riziko je zde vedle Číny a Jižní Koreje ještě mnohem větší než kdekoli jinde ve světě.

Ve třech západojaponských prefekturách (Fukui, Osaku, Kyoto) byl nedostatek elektřiny největší, odstaveno zde bylo celkem 13 reaktorů. Díky tomu si potřebu opětovného spuštění alespoň některých reaktorů uvědomovali i zdejší obyvatelé, souhlasila s tím více než polovina. Starosta města Ohi (prefektura Fukui) po náročném jednání s obyvateli, kde bylo samozřejmě i mnoho odpůrců, tak na jaře schválil spuštění reaktorů na svém území, žádost byla předána guvernérovi prefektury Fukui a na základě jednání s vládou bylo povoleno spuštění dvou jaderných reaktorů v elektrárně Ohi. Příprava na spuštění elektráren začala v červnu, spuštěny byly v červenci a plného výkonu dosahovaly oba dva na konci července 2012. Jak je ale vidět, postup schvalování je poměrně složitý. Výhodou zde bylo to, že tato elektrárna již měla dokončené stress testy, ty byly dokončeny mimo těchto dvou reaktorů ještě u jednoho.

Podstatnou změnou je vytvoření nového nezávislého úřadu NRA (Nuclear Regulation Authority), který začal fungovat 19. září 2012. Do té chvíle tento úkol nesl úřad, který spadl pod ministerstvo průmyslu, a protože Japonsko má a mělo jaderný průmysl velmi rozvinutý, byl to jakýsi střet zájmů. To prý bylo také jedno z nejvýznamnějších pochybení, jak ho analyzovala nezávislá vyšetřovací komise ustanovená japonským parlamentem. [12] Nově tak tento úřad spadá pod ministerstvo životního prostředí a v lednu 2013 již navrhl celou řadu opatření, která by měla zvýšit

bezpečnost jaderných elektráren, např.: na bezpečných místech, odolných proti tsunami, musí být k dispozici dostatek záložních zdrojů elektřiny, zásob vody pro havarijní chlazení, ve všech reaktorech se musí vybudovat zařízení, která umožní přímo do reaktorů pod vysokým tlakem pumpovat vodu. Na všechny bloky by mělo být instalováno filtrační zařízení, které v případě upouštění páry z reaktoru sníží radioaktivitu až o tři řády. [16] Tato opatření by navíc měla být v červenci tohoto roku přijata jako zákon.

Rozestavěny jsou v současné době dva jaderné reaktory, dalších 12 bylo před zemětřesením v plánu postavit. To je nyní pozastaveno. Japonská vláda pracuje na nové energetické koncepci, která by měla ukázat, s jakým podílem vyrobené elektřiny z jaderných zdrojů se bude v budoucnu počítat. V tomto roce již byl předložen návrh a je velmi opatrný v tom, udělat nějaké výraznější změny a závazky. Vládní návrh tak předpokládá, že se nebudou stavět nové reaktory, ty, které jsou ale již ve výstavbě, se dostavět mohou. Také se počítá s větším využitím obnovitelných zdrojů a uvažuje se dokonce i odstoupení od jaderné energetiky, není však stanoveno pevné datum, což opět dává prostor pro případnou změnu, pokud by se situace s obnovitelnými zdroji nevyvíjela podle předpokladů. V plánu jsou ale již i konkrétní projekty, jako výstavba větrné farmy o výkonu 1 GW [15], solární elektrárny s výkonem 70 MW [11]. Japonsko také uzavřelo významnou dohodu s USA o dovozu břidlicového plynu, kterého by se po roce 2017 mělo dovážet více než 800 000 tun [18], za podstatně nižší cenu než je cena plynu v současnosti. V září 2013 budou opět pro údržbu odstaveny v současnosti dva jediné fungující jaderné reaktory v Japonsku, jestli se do té doby podaří spustit nějaké další, zatím není jasné. Pokud ne, Japonsko tak bude opět zcela bez jaderné energetiky a náročná úsporná opatření budou muset pokračovat.

3. NÁSLEDKY HAVÁRIE PRO SVĚT

3.1 Ekologické dopady

Jaderná havárie ve Fukušimě byla v dubnu 2011 ohodnocena sedmým, nejvyšším stupněm závažnosti na stupnici INES (International Nuclear Event Scale). Tuto stupnici zavedla v roce 1990 Mezinárodní agentura pro jadernou bezpečnost (IAEA), její rozsah je 0-7. Havárie tak dostala stejné hodnocení, jako ta černobylská, čili *velmi těžká havárie*. [8] Podle mého jsou ale světové dopady Fukušimi mnohem mírnější, než tomu bylo v případě Černobylu, stupnice totiž bere v úvahu pouze jediný faktor a tím je množství uniklých radioaktivních látek mimo kontejnment, v tomto případě více než 10^4 TBq. Zatímco v Japonsku nebyla sto a více kilometrů od elektrárny zjištěna vyšší aktivita než $1 \mu\text{Sv}$, v případě Černobylu bylo možné tuto hodnotu naměřit i v místech tisíc kilometrů vzdálených, například i v České republice. Dalším rozdílem je to, že v případě Japonska byly úniky radioaktivní páry řízené, v Černobylu došlo k výbuchu reaktoru a tím, že neměl kontejnment, palivo bylo rozptýlené po okolí elektrárny a radioaktivita dlouho unikala do životního prostředí. Největším a zcela zásadním rozdílem je ale samotný vliv na obyvatelstvo. Japonci měli dostatek času na evakuaci, zatímco v Černobylu nebyli občané několik dní vůbec o havárii informováni a zasahující pracovníci ani nevěděli, že se pohybují v radioaktivním prostředí. V České republice způsobila radioaktivita z černobylské havárie za první rok ekvivalentní dávku průměrně $0,36 \text{ mSv}$ u dětí a $0,22 \text{ mSv}$ u dospělých. Celkové dávky, kterými bylo ozářeno obyvatelstvo ve střední a západní Evropě, nepřekročily za první rok po havárii dvojnásobek ročního ozáření z přírodních zdrojů. [6, str. 281-282] Na našem území byla také zaznamenána radioaktivita z Fukušimi, podobně jako jinde ve světě. Ovšem v naprosto zanedbatelném množství, což je možné pouze díky tomu, že radioaktivita vznikající v jaderných elektrárnách se v přírodě nevyskytuje a snadno se tak zjistí.

V žádném případě neříkám, že japonská nehoda nebyla vážná, její dopady jsou ale spíše lokální a nepřekročily hranice Japonska. Pokud by tak stupnice INES měla opravdu reálně ohodnotit jadernou nehodu, měla by dle mého názoru být rozšířena o několik dalších hodnotících kritérií, zejména o reálné dopady na obyvatelstvo a velikost zasaženého území, nikoliv pouze množství uniklé radioaktivity.

3.2 Pohled na jadernou energetiku

Názory na jadernou energetiku se formovaly hlavně pod vlivem různých nehod a tak právě i fukušimská nehoda opět vyvolala velkou diskuzi o bezpečnosti jaderných elektráren. Většina států se rozhodla udělat zátěžové testy a důkladné posouzení všech rizik s cílem zjistit, jestli nemůže nastat podobně vážná nehoda jako v Japonsku. Testy provedla i EU, ve které je 143 jaderných elektráren. Výsledky byly zveřejněny v říjnu 2012 a podle nich mají všechny jaderné elektrárny vysoké bezpečnostní standardy a nehrozí žádné nebezpečí. Přesto je ale třeba dalšího zlepšování, aby se úroveň zabezpečení dostala ještě výše. [4] Dále jsou zajímavé i výsledky ze dvou českých jaderných elektráren, které hodnotil Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Podle něj je situace zvladatelná i při velmi extrémních podmínkách, jako zemětřesení, záplavy, ztráta elektrického napájení i ztráta odvodu tepla z reaktoru a to jak z personálního, administrativního, tak i technického hlediska. [19] Opět byla navržena řada opatření, z nichž některá již byla realizována, v Dukovanech proběhlo např. zpevnění všech konstrukcí proti velmi silnému zemětřesení. [19]

S bezpečností evropských jaderných elektráren tedy můžeme být spokojeni, přesto některé státy přehodnotily své energetické koncepce, s jádrem některé již nepočítají vůbec, jiné v omezené míře. Nejradikálnější v tomto směru bylo Německo, které po havárii uzavřelo 7 jaderných elektráren a rozhodlo o úplném odstoupení od jádra do roku 2022. Nejedná se zde ovšem o žádný zásadní obrat, už v roce 2000 se totiž německá vláda dohodla s jaderným průmyslem na opuštění jádra do roku 2021 a v plánu bylo i zavření sedmi výše zmíněných elektráren. Protože by to ale bylo pro Německo drahé, premiérka Angela Merkelová rozhodla o prodloužení životnosti některých elektráren až do roku 2036, což mělo získat finance na obnovitelné zdroje. Po fukušimské nehodě ale opět Angela Merkelová, tentokrát již jako kancléřka, rozhodla o dřívějším odchodu od jádra, což je vlastně pouze návrat k původnímu plánu. Bohužel již v situaci, kdy Německo vyrábí mnoho elektřiny ze solárních elektráren, vyprodukovaná elektřina z těchto zdrojů je pro koncové odběratele dražší, proto je také patrný nárůst ceny elektřiny přes 10%. Velmi nebezpečné je to pro německý průmysl, kdy se dražší cena elektřiny promítne do ceny výrobků a tudíž hrozí opět ztráta konkurenceschopnosti. Podobnou, bezjadernou cestu si zvolilo i Švýcarsko a Itálie. Švýcarsko již nechce stavět nové reaktory, pouze nechá dosloužit ty stávající, jejich

životnost končí v roce 2035. Švýcarsko ovšem v roce 2009 vyprodukovalo z jádra 40,4% elektřiny [7], cílem je nahradit tento podíl obnovitelnými zdroji, což bude náročné. V Itálii se před japonským zemětřesením uvažovalo o zrušení zákazu výstavby jaderných elektráren, tento zákaz nakonec zůstal. Švédsko původně také vyhlásilo odchod od jádra, to bylo ovšem později zrušeno a nyní se plánuje výstavba nových reaktorů. Pouze ovšem ale jako náhrada těch, kterým končí životnost, nechce dále zvyšovat podíl z jádra. [25], [26]

Ve zbytku světa je ale situace odlišná a v plánu nebo ve výstavbě je mnoho nových reaktorů. Do provozu se po Fukušimě uvedly nové bloky ve Velké Británii, Rusku, USA i Íránu. Ve výstavbě jsou bloky v Bulharsku, Bělorusku, Slovensku, Francii, Finsku, Kanadě, Turecku, v plánu jsou desítky nových reaktorů, hlavně v Rusku, ale i na Ukrajině. Ještě výraznější je ale výstavba nových reaktorů v rozvojových zemích, v Číně a Indii. V Číně bylo po Fukušimě připojeno hned několik nových bloků, desítky jsou jich nyní ve výstavbě, do roku 2015 plánuje Čína spustit okolo 26 nových reaktorů. Jižní Korea uvedla v roce 2012 do provozu hned 4 nové reaktory, další jsou také ve výstavbě. [25], [26]

O žádném útlumu jaderné energetiky po Fukušimě, až na 3 evropské země, se tedy rozhodně nedá mluvit, v příštích letech budou uváděny do provozu desítky nových reaktorů a to hlavně v Číně, Indii, Jižní Koreji a Rusku. V Číně se dokonce povedlo postavit a uvést do provozu jaderný blok za 4 roky, což je ve srovnání s Evropou ohromná rychlost. [25], [26] Vidím v tom dva negativní dopady, které v Evropě v budoucnu pocítíme. Jednak zvyšující se energetickou závislost na Rusku a poté technologické zaostávání evropského průmyslu, které bude způsobeno vyšší cenou elektřiny a přesunem technologií do Číny, Indie a Jižní Koreje.

4. LIKVIDACE HAVÁRIE V JE FUKUŠIMA

4.1 Radiační situace v elektrárně

Nejvíce radioaktivity uniklo v prvních dnech po havárii, úniky však pokračovaly i po obnovení chlazení, odpařovala se totiž voda z bazénů z vyhořelého paliva. Tato pára byla ale radioaktivní jen málo a celkovou radiační situaci už téměř neovlivňovala, ta naopak postupem času klesala, ze začátku velmi intenzivně. Velké zlepšení nastalo, když se podařilo obnovit standardní chlazení, což se u všech třech bloků povedlo do července 2011. Výrazně tím klesla teplota reaktorů, všech jejich částí a právě i bazénů s palivem. Povedlo se také opravit zařízení, které kontroluje atmosféru uvnitř reaktorů. Do reaktoru je totiž za normálních okolností dodáván dusík, který zabraňuje výbuchu, pokud by se náhodou v reaktoru začal tvořit vodík. Tento systém byl zprovozněn do konce roku 2011 u dvou reaktorů, v únoru 2012 pak také u třetího reaktoru, umožnilo to vyčištění radioaktivní atmosféry v reaktorech a tím další podstatné snížení radioaktivity.

Většina trosk je již z elektrárny odklizená, zajímavě se řešila fixace radioaktivního prachu, který větrem poletoval po areálu elektrárny. Použit byl speciální polymerový postřík, s příměsí pilin a papíru, který jednoduše zatuhne na zemi, na budovách, nebo troskách a zabrání šíření radioaktivity. [2] Již je také postavena nová budova nad prvním blokem, ta nad druhým poškozena nebyla. Celkový dávkový roční příjem se těmito kroky podařilo snížit na hodnotu nižší než je 0,1 mSv. Připomínám, že průměrné přirození pozadí, např. u nás je 2,4 mSv za rok.

Ohromným problémem je ale radioaktivní voda, která se časem nahromadila v elektrárně. Tsunami úplně zaplavila všechny podzemní prostory, voda byla později kontaminována úniky radioaktivity, v některých místech jen mírně, ale naopak v druhém bloku je tato voda velmi silně radioaktivní. Skladovací prostory jsou omezené a největší problémy byly v prvních dnech, této situaci pomohl až tanker s kapacitou 18 tisíc tun radioaktivní vody, který po několika dnech připlul k elektrárně. Radioaktivní voda však i v současné době v elektrárně dál přibývá. V podzemních prostorech prosakuje pozemní voda a musí se také zachytávat voda dešťová. Muselo probíhat různé čerpání a přečerpávání mezi nádržemi, aby bylo možné radioaktivní vodu s různou intenzitou záření uskladnit. V dubnu 2011 se dokonce muselo do moře

vypustit přes 10 tisíc tun slabě radioaktivní vody, aby se v zásobnících uvolnilo místo na více kontaminovanou vodu. Nové nádrže na vodu jsou neustále budovány, v současné době (stav k 29. 5. 2013) dosahují její kapacity 240 tisíc tun vody a uskladněno je přibližně 237 tisíc tun vody. V polovině srpna mají být vybudovány zásobníky s celkovou kapacitou 280 tisíc tun vody, uloženo má být 250 tisíc tun, je tedy vidět rostoucí rezerva skladových zásob. [22] Aby bylo možno vodu vyčistit, začala AREVA budovat dekontaminační zařízení ALPS, spuštěno bylo v únoru 2013. Vyčistí 1200 tun vody denně a odstraňuje z ní 62 různých radioaktivních prvků, což jsou v podstatě všechny, které mají nějaký radiační vliv. Je zde ovšem problém s jedním radionuklidem, s tritiem. Je to totiž izotop vodíku (^3H), který je vázaný ve vodě a nejde ho chemicky od vody oddělit. [21]

4.2 Návrh na likvidaci havárie

Likvidace havárie bude zcela dokončena až ve chvíli, kdy budou úplně demontovány všechny poškozené reaktory. Tento náročný úkol bude trvat mnoho let, v blízkosti reaktorů je stále velmi vysoká radiace a lidé tam nemohou dlouhou dobu pracovat. Navrhují tedy usilovně pokračovat v důsledné dekontaminaci v budovách jednotlivých bloků, nejnáročnější to bude v druhém bloku, kde je radiace největší. Aby bylo možné radiaci odstranit, musí se nejprve za pomoci dálkově řízených robotů podrobně zmapovat všechna patra elektrárny. Lidé by takového mapování nebyli schopní, museli by se z nejvíce kontaminovaných oblastí ihned přesunout do bezpečí. Jakmile budou nalezena všechna silně radioaktivní místa, musí se právě zde začít s dekontaminací, opět pomocí robotů. Roboti mohou tato místa omýt vodou, která bude zachycena a pomocí ALPS vyčištěna. Některé silně radioaktivní trosky mohou převézt do dostupnějších míst, kde budou vyčištěny nebo uskladněny. Na některá místa by také bylo možno použít fixačního postřiku, který by umožnil dřívější přístup lidí, ty totiž dokáží provést dekontaminaci mnohem efektivněji než dálkově řízené stroje. Tuto dekontaminaci je třeba přednostně provést u bazénů s vyhořelým palivem, následně tyto bazény vyklidit a přesunout tak největší množství radioaktivního materiálu mimo poškozené budovy. To nejvíce pokročilo u čtvrtého bloku elektrárny, kde je již voda v bazénu úplně vyčištěna, odsolena, palivo bylo zkontrolováno a nic tak nebrání přesunu do připraveného společného bazénu. Po čtvrtém bloku by měl následovat první,

protože tam nedošlo k čerpání mořské vody, bazén tak není znečištěn. Potom třetí a nakonec druhý, nejkontaminovanější blok. Jakmile budou bazény vyklizeny, navrhuji provést dekontaminaci v blízkosti reaktorů, aby bylo možné přistoupit k jejich samotné likvidaci. Ty se musí nejdříve zcela zaplnit vodou, což velmi zlepší stínění a sníží se tím efektivní dávka, kterou pracovníci v jejich blízkosti obdrží. Opět musí nejprve proběhnout průzkum všech reaktorů, aby se určil jejich stav a poškození. K tomu se použijí kamery a dozimetry. Dozimetrem se dá nepřímo určit, jestli došlo k tavení paliva, pokud totiž bude radioaktivita pod úrovní palivových článků vyšší než u nich, bude zřejmé, že došlo k jejich tavení a skapávání roztaveného paliva. Pokud bude zjištěno tavení paliva ve větší míře, bude jeho odstranění tím nejnáročnějším úkolem, protože se to bude muset provádět ve velmi silné radioaktivitě a v omezeném prostoru. Jakmile se podaří zbavit reaktorovou nádobu radioaktivního materiálu, přistoupí se k jejich postupné demontáži a totální likvidaci.

Informaci o tom, kolik radioaktivní vody uskladněné v elektrárně se již podařilo vyčistit, jsem nikde nedohledal. Předpokládám ale, že to budou již tisíce tun vody. Tato voda je tak mimo tritium zbavena všech radionuklidů. Doporučil bych situaci řešit tím, že voda bude za přísné kontroly pomalu vypouštěna do moře. Tritium se totiž ve vodě vyskytuje i za normálních okolností, kde vzniká interakcí záření z vesmíru a molekul vody. Vypouštění do moře je dle mého názoru lepší varianta, než hromadění této vody v nádržích, protože při tak velkém uskladněném množství může snadno dojít k nějakým netěsnostem a neřízenému úniku vody do životního prostředí. Uskladněním po nějakou dobu neklesne významně ani jejich aktivita, protože poločas rozpadu tritia je o něco více než 12 let. Musí se to však provést v oblasti, kde neprobíhá lov ryb, aby nehrozila jejich kontaminace. Vypouštět se musí pouze takové množství, aby se radioaktivita ihned rozředila pod hygienické limity.

ZÁVĚR

V úvodní kapitole bakalářské práce jsem uvedl základní jednotky a vztahy týkající se radioaktivity a přirozeného pozadí, aby bylo jasné, jak velký radiační vliv Fukušima měla. Poté jsem podrobně popsal poškození fukušimských jaderných reaktorů, věnoval jsem se třem nejvíce zasaženým ve Fukušimě I. Nejvážněji zde byl poškozen druhý blok, ze kterého také uniklo nejvíce radioaktivity. Radiační vliv na obyvatelstvo byl díky včasné evakuaci malý, mnohem větší vliv měla nucená evakuace obyvatelstva, která v nich přirozeně vyvolala strach a také odpor k jaderné energetice.

Japonsko si ovšem uvědomuje svou závislost na elektřině z jádra, proto se i po takto závažné nehodě znovu uvedly do provozu dva bloky dříve odstavené elektrárny, aby se alespoň částečně uspokojil velký nedostatek elektřiny. Předcházely tomu úspěšné stress testy a složité vyjednávání. Japonsko tedy bude nejspíš v provozování jaderných elektráren pokračovat, stejně jako většina světa. Minimálně do té doby, než se podaří efektivněji vyřešit ukládání elektřiny a bude tak možno efektivněji využívat obnovitelné zdroje elektřiny.

Náročná bude úplná likvidace prvních třech poškozených reaktorů Fukušimi I, předcházet tomu musí dekontaminace všech budov, odstranění paliva z bazénů, detailní průzkum reaktorových nádob a paliva v nich. Za pozitivní vliv nehody můžeme považovat zvýšené bezpečnostní standardy, které se přijaly ve všech jaderných elektrárnách na světě.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČEZ: Jaderná energetika. [online]. [cit. 2013-03-21]. Dostupné z:
[http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-
cez/ete/technologie-a-zabezpeceni/7.html](http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/technologie-a-zabezpeceni/7.html)
- [2] Conservativerefocus: *Fukushima: Nuclear Plant Workers Using Polymer Mixed With Paper* [online]. 2011 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z:
[http://www.conservativerefocus.com/blog5.php/2011/04/03/fukushima-nuclear-
plant-workers-using-polymer-mixed-with-paper-and-sawdust-to-clog-drainage-
pipes](http://www.conservativerefocus.com/blog5.php/2011/04/03/fukushima-nuclear-plant-workers-using-polymer-mixed-with-paper-and-sawdust-to-clog-drainage-pipes)
- [3] Dgr4quake: *Ibaraki & Tokyo Radioactivity* [online]. 2011 [cit. 2013-04-30].
Dostupné z: <http://.wordpress.com/ibaraki-radioactivity/>
- [4] European Commission: *Nuclear energy stress tests*. [online]. 2012 [cit. 2013-02-14]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/energy/nuclear/safety/stress_tests_en.htm
- [5] General Electric (GE): *Mark I Containment Report*. [online]. 2011 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: [http://files.gereports.com/wp-content/uploads/2011/10/NEI-
Mark-1-White-Paper.pdf](http://files.gereports.com/wp-content/uploads/2011/10/NEI-Mark-1-White-Paper.pdf)
- [6] HÁLA, Jiří. Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie. 1. vyd. Brno: Konvoj, 1998, s. 278-280. ISBN 80-85615568
- [7] International Energy Agency (IEA): *Electricity/Heat in Switzerland in 2009* [online]. 2009 [cit. 2013-03-14]. Dostupné z:
http://www.iea.org/stats/electricitydata.asp?COUNTRY_CODE=CH
- [8] International Atomic Energy Agency (IAEA): *IAEA Briefing on Fukushima Nuclear Accident* [online]. 2011 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z:
<http://www.iaea.org/newscenter/news/2011/fukushima120411.html>
- [9] International Energy Agency (IEA): *Electricity/Heat in Japan in 2009* [online]. 2009 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z:
http://www.iea.org/stats/electricitydata.asp?COUNTRY_CODE=JP

- [10] Japan Nuclear Technology Institute: *Examination of Accident at Tokyo Electric Power Co., Inc.'s Fukushima Daiichi Nuclear Power Station and Proposal of Countermeasures* [online]. 2012 [cit. 2013-03-11]. Dostupné z: http://www.gengikyo.jp/english/shokai/Tohoku_Jishin/report.pdf
- [11] Japandailypress: *Kyocera claims to build largest solar plant in Japan*. [online]. 2012 [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <http://japandailypress.com/kyocera-claims-to-build-largest-solar-plant-in-japan-11693>
- [12] Japanese government: *Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission*. [online]. 2013 [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: http://www.nirs.org/fukushima/naiic_report.pdf
- [13] KOBYLKA, Dušan (Katedra jaderných reaktorů FJFI ČVUT): *Jak chladne Fukušima a proč by se situace měla uklidňovat?* [online]. 2011 [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/jak-chladne-fukusima-a-proc-by-se-situace-mela-uklidnovat-pkb-/veda.aspx?c=A110316_175123_veda_mla
- [14] Ministry of Economy, Trade and Industry. The Strategic Energy Plan of Japan [online]. 2010 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: http://www.meti.go.jp/english/press/data/pdf/20100618_08a.pdf
- [15] NewScientist: *Japan to build world's largest offshore wind farm*. [online]. 2013 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://www.newscientist.com/article/dn23082-japan-to-build-worlds-largest-offshore-wind-farm.html>
- [16] Nuclear Regulation Authority (NRA): *Draft New Safety Standards for Nuclear Power Stations* [online]. 2011 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: http://www.nsr.go.jp/english/data/new_safety_standards.pdf
- [17] Reuters, převzato z: <http://zpravy.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/japonsti-podnikatele-lobbuji-za-jadro-914879>
- [18] Reuters: *Tepco to buy US shale gas via Mitsubishi, Mitsui - Nikkei*. [online]. 2013 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.reuters.com/article/2013/02/01/tepco-sempraenergy-nikkei-idUSL4N0B15RN20130201>

- [19] Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB): *Zátěžové zkoušky JE Dukovany a JE Temelín Česká Republika*. [online]. 2011 [cit. 2013-02-02]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/aktualne/Narodni_zprava_ceska_final_1.pdf
- [20] TEPCO: Nuclear TEPCO-Power Plants. In: [online]. 2010 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.tepco.co.jp/en/challenge/energy/nuclear/pdf/plants-e.pdf>
- [21] TEPCO: *Overview of the Multi-nuclide Removal Equipment (ALPS) at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station* In: [online]. 2013. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2013/images/handouts_130329_01-e.pdf
- [22] TEPCO: *Situation of storing and treatment of accumulated water* In: [online]. 2013. [cit. 2013-06-30]. Dostupné z: http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu13_e/images/130522e0201.pdf
- [23] TEPCO: The Effect of Earthquake Occurred in the Northern Part of Japan (as of 4:30 pm today). In: [online]. 2011. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11031101-e.html>
- [24] The University of Tokyo: 2011 Tohoku Earthquake. In: [online]. 2011 [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/eng/
- [25] WAGNER, Vladimír (Vědecký pracovník Ústavu jaderné fyziky AVČR): *Jaderná energetika v roce 2012*. [online]. Řež u Prahy, 2012 [cit. 2013-02-12]. Dostupné z: http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/transmutace/Jaderna_energetika_2011.htm
- [26] WAGNER, Vladimír (Vědecký pracovník Ústavu jaderné fyziky AVČR): *Jaderná energetika na prahu roku 2013*. [online]. Řež u Prahy, 2012 [cit. 2013-02-13]. Dostupné z: http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/transmutace/Jaderna_energetika_2012.htm
- [27] WAGNER, Vladimír (Vědecký pracovník Ústavu jaderné fyziky AVČR): *Jak jaderná energetika po Fukušimě?* [online]. Řež u Prahy, 2009 [cit. 2013-02-02]. Dostupné z: http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/fukusima/japonsko_Referendum.htm

- [28] WAGNER, Vladimír (Vědecký pracovník Ústavu jaderné fyziky AVČR): *Japonsko: přírodní katastrofa zasáhla čtyři jaderné elektrárny*. [online]. Řež u Prahy, 2009 [cit. 2013-03-11]. Dostupné z: http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/fukusima/japonsko_Osel.htm
- [29] WAGNER, Vladimír (Vědecký pracovník Ústavu jaderné fyziky AVČR): *Japonsko – země z třetí největší jadernou energetikou*. [online]. Řež u Prahy, 2009 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/transmutace/japonskojadro.htm>
- [30] WAGNER, Vladimír (Vědecký pracovník Ústavu jaderné fyziky AVČR): *Konec roku ve Fukušimě*. [online]. Řež u Prahy, 2011 [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/fukusima/Fukusima_2011_last.htm
- [31] WAGNER, Vladimír (Vědecký pracovník Ústavu jaderné fyziky AVČR): *Situace ve Fukušimě na začátku podzimu, rok a půl po havárii*. [online]. Řež u Prahy, 2012 [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/fukusima/Fukusima_srpen_2012.htm
- [32] WAGNER, Vladimír (Vědecký pracovník Ústavu jaderné fyziky AVČR): *Situace ve Fukušimě po dvou letech*. [online]. Řež u Prahy, 2013 [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/fukusima/Fukusima_unor_2013.htm
- [33] World Health Organization: *Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami*. [online]. 2013 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/78373/1/WHO_HSE_PHE_2013.1_eng.pdf
- [34] World nuclear news: *Radiation declines at Fukushima* [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: http://www.world-nuclear-news.org/rs_radiation_declines_at_fukushima_0603131.html
- [35] World financial: *Tepco raises electricity price by up to 18%* [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.ft.com/cms/s/0/e983ab08-40ed-11e1-8c33-00144feab49a.html#axzz2UIUZ7tIm>

SEZNAM TABULEK A GRAFŮ

Tabulka 1: Ozáření člověka z přírodních a umělých zdrojů.....	10
Tabulka 2: Reaktory v elektrárnách Fukušima I a II	15
Obrázek 1: Schéma reaktoru 1-5, Fukušima I	16
Obrázek 2: Tepelný výkon fukušimských bloků 1-3 v závislosti na čase	19
Obrázek 3: Radioaktivní zamoření Japonska, říjen 2011	24

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

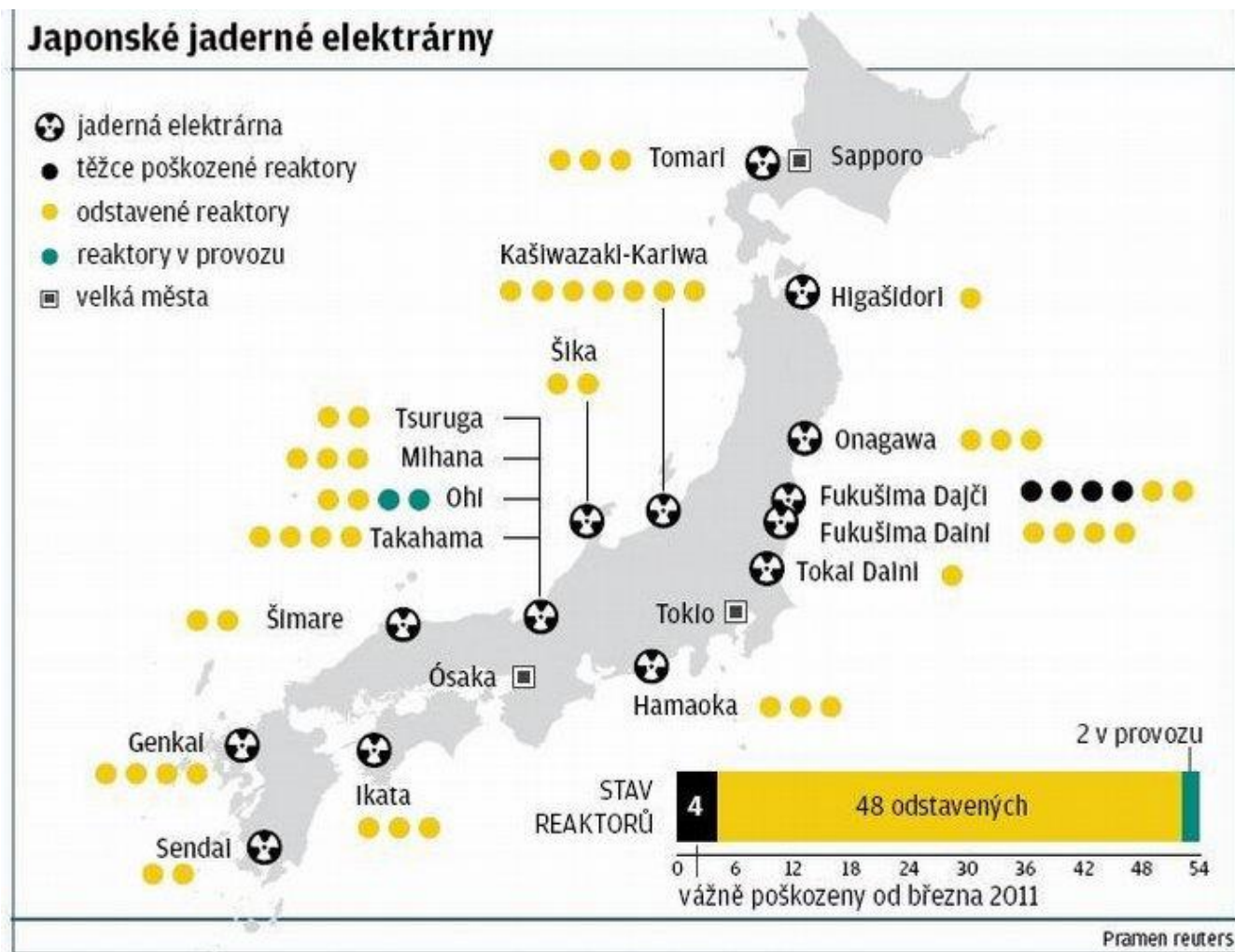
ALPS.....	Dekontaminační zařízení (<i>Advanced Liquid Processing System</i>)
AREVA.....	Francouzská státní korporace, zaměřující se na jadernou energetiku
CO ₂	Oxid uhličitý, skleníkový plyn
ČR	Česká republika
EU	Evropská Unie
GW.....	Gigawatt (10 ⁹ Wattů)
IEA.....	Mezinárodní agentura pro energii (<i>International Energy Agency</i>)
INES.....	Mezinárodní stupnice jaderných událostí (<i>Int. Nuclear Event Scale</i>)
JE	Jaderná elektrárna
MW	Megawatt (10 ⁶ Wattů)
TEPCO.....	Provozovatel JE Fukušima (<i>Tokyo Electric Power Co.</i>)
USA	Spojené státy americké (<i>United States of America</i>)
¹³¹ I.....	Radioaktivní nuklid jódu
¹³⁷ Cs	Radioaktivní nuklid cesia
mSv	Milisievert (10 ⁻³ Sievertů)
μSv.....	Mikrosievert (10 ⁻⁶ Sievertů)
TBq	Terabecquerel (10 ¹² Becquerel)

SEZNAM PŘÍLOH

Obsah příloh:

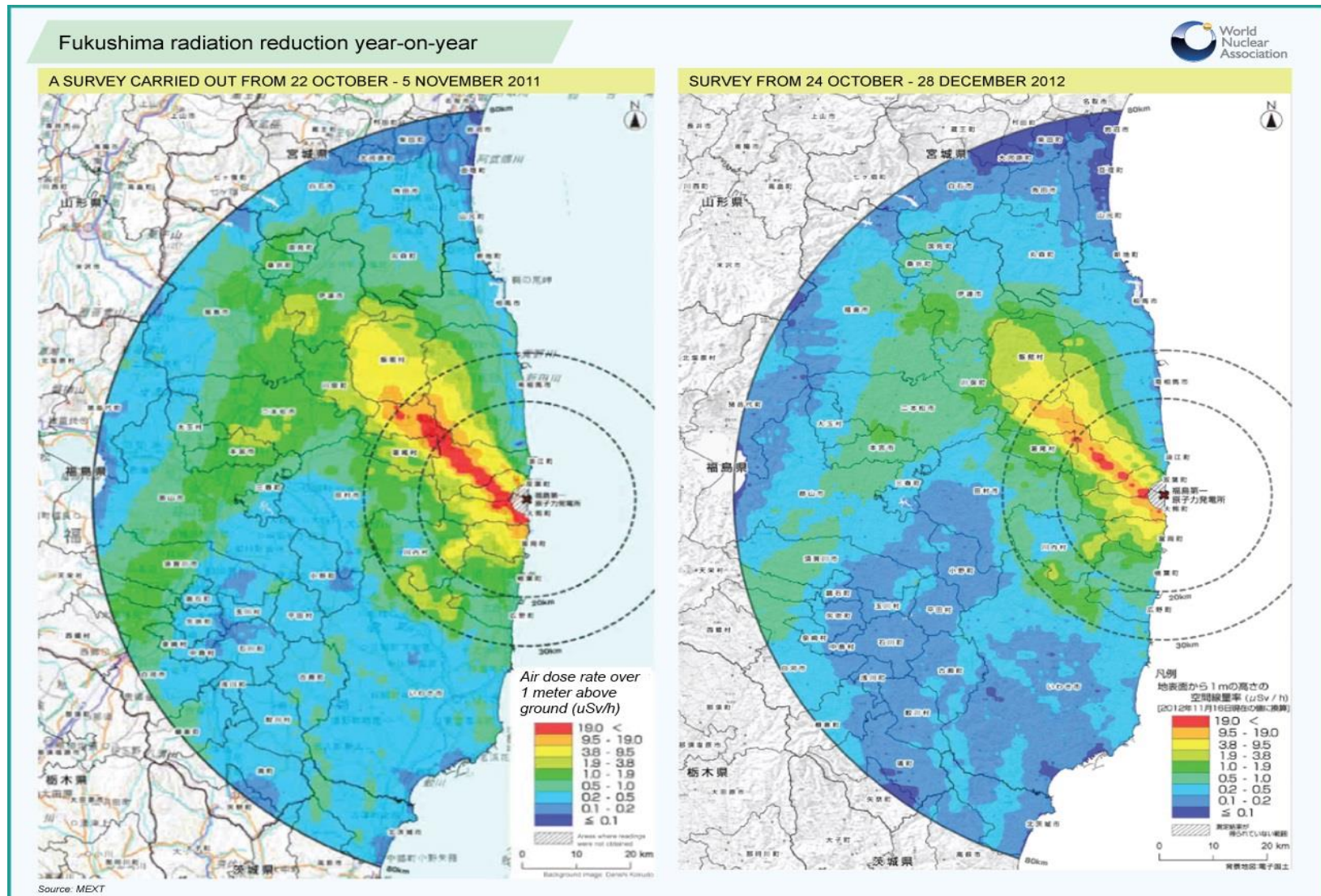
PŘÍLOHA A	1
PŘÍLOHA B	2
PŘÍLOHA C	3

Příloha A



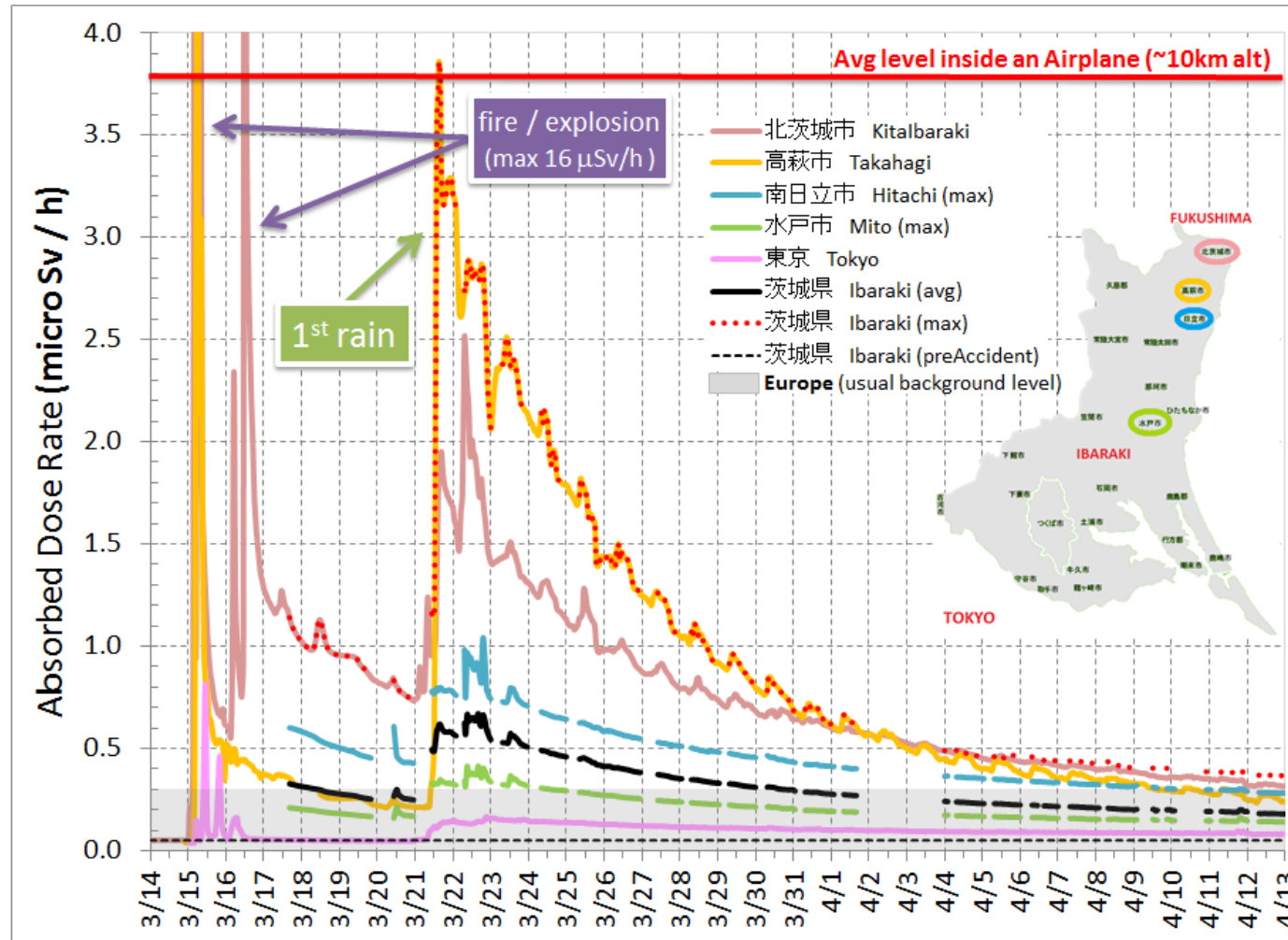
Zdroj: Reuters, 2012 dle [17]

Příloha B



Zdroj: World nuclear news, 2012 dle [34]

Příloha C



Zdroj: Dgr4quake, 2011 dle [3]