

doc. Ing. Jozef Sabol, DrSc.
prof. Ing. Bedřich Šesták, DrSc.
Fakulta bezpečnostního managementu PA ČR v Praze
Katedra krizového řízení

Důsledky největších jaderných havárií: Černobyl vs. Fukušima

Úvod

V roce 2016 uplynulo rovných **30 let od jaderné havárie na jaderné elektrárně v Černobylu**, tehdy na území bývalého Sovětského svazu, nyní Ukrajina, a **pět let od havárie na jaderně-energetickém komplexu Fukušima-Daiči** (nebo Fukušima 1, dále jako Fukušima) v Japonsku. Je proto vhodná příležitost zrekapitulovat obě tyto havárie v kontextu současné situace ve využívání jaderné energie ve světě i České republice (ČR). Situace se v této oblasti neustále vyvíjí, přičemž je velký důraz kladen na bezpečnost jaderných elektráren za všech možných předvídatelných okolností a scénářů.

Jaderná energetika je založena na využití procesů, které jsou na atomární úrovni. Všechny prvky ve vesmíru totiž sestávají z atomů. Atom se skládá z jádra a elektronů. Jádro je tvořeno neutrony a protony. Některá jádra jsou stabilní, zatímco některá podléhají samovolnému radioaktivnímu rozpadu. Tento rozpad může být také vyvolán interakcí neutronů nebo jiných částic se stabilními jádry. V jaderných reaktorech se tepelná energie vyrábí **štěpením jader** vhodných těžkých prvků, kde významnou roli hraje především uran-235. Jeho jádro obsahuje 143 neutronů a 92 protonů, tj. dohromady 235 těchto částic, proto U-235. Je třeba připomenout, že každý prvek se může vyskytovat v několika různých modifikacích (izotopech), které se odlišují počtem neutronů v jejich jádru. Přírodní uran má rovněž několik izotopů, z nichž pro účely jaderné energetiky má největší význam právě U-235, protože je efektivně štěpitelný pomocí neutronů. Přitom přírodní uran obsahuje pouze 0,72 % štěpitelného U-235. Proto je nutné použít poměrně komplikované a náročné technologické postupy k tomu, aby se z přírodního uranu získalo potřebné množství U-235.

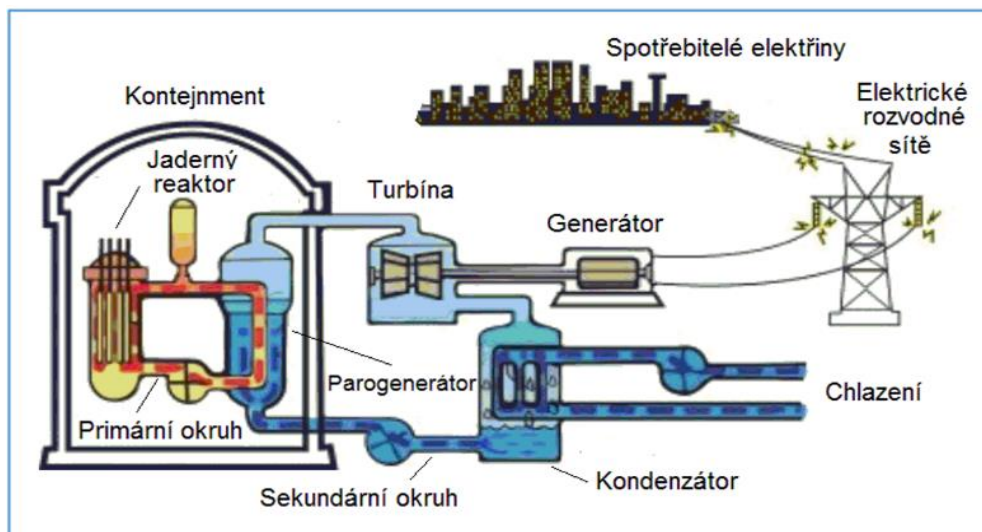
K vlastnímu **štěpení jádra U-235** dochází tehdy, když toto jádro zasáhne neutron, který ho následně rozštěpí na dva kusy (jádra lehčích prvků). Tato jádra se v daném prostředí pohybují a ztrácejí tam svou energii, která se mění na teplo. Výsledkem každé štěpné reakce je uvolnění několika neutronů, které iniciují štěpení dalších jader U-235. Pokud bychom toto štěpení příslušným způsobem neregulovali, došlo by k neřízené štěpné řetězové reakce, která by vedla k uvolnění obrovské energie, podobně jako je tomu u jaderné zbraně. V jaderných reaktorech se však tato reakce udržuje na bezpečné úrovni a vzniklé teplo se nakonec využívá k výrobě elektrické energie.

Jaderné elektrárny využívají tepelnou energii, produkovanou jaderným palivem obsahujícím štěpný materiál v reaktoru, na elektrickou energii. Princip **výroby elektrické energie v jaderných elektrárnách** je obdobný jako je tomu v klasických

elektrárnách na fosilní paliva, s tím rozdílem, že v jaderné elektrárně tepelnou energii dodává reaktor, kdežto u ostatních elektráren je to kotel.

Charakteristika jaderných elektráren

Zjednodušené schéma uspořádání **typické jaderné elektrárny** s tlakovodním reaktorem je na obr. 1. Základní princip je založen na získávání tepelné energie pomocí jaderného štěpení, které probíhá v jaderném palivu uvnitř reaktorové nádoby. Tato energie se v parogenerátoru mění na páru, která potom předává svou energii přes turbínu generátoru. Tento generátor mění mechanickou energii turbíny na elektrický proud.



Obr. 1. Schematické uspořádání hlavních prvků jaderné elektrárny.¹

Kritickou součástí elektrárny je především samotný jaderný reaktor a také primární okruh, odkud při netěsnostech mohou uniknout radioaktivní látky do okolního prostředí. Současné jaderné elektrárny mají velmi účinnou ochrannou bariéru v podobě kontejnmentu, který zabrání úniku radioaktivity mimo reaktorovou budovu. Za normálních okolností se do okolí dostává pouze zanedbatelné množství radioaktivních výpustí, rozsah podléhá přísné kontrole. Pokud jde o ozáření obyvatelstva, vliv těchto výpustí představuje pouze zlomek dávky, kterou každý z nás obdrží z přírodního radiačního pozadí (přírodní radionuklidy a kosmické záření). Jen pro srovnání, je to ozáření, které je nižší než dávka, kterou obdrží cestující při letu z Prahy do New Yorku (v důsledku vyšší intenzity kosmického záření).

Pokud však na jaderné elektrárně dojde z nějakých důvodů k nehodě nebo havárii, při které dojde k poškození jaderného reaktoru nebo i kontejnmentu, do životního prostředí se mohou dostat radionuklidy z poškozené aktivní zóny reaktoru. To byl právě případ jaderných havárií v Černobylu i Fukušimě, kde se z reaktorů dostalo ven velké množství radioaktivních látek.

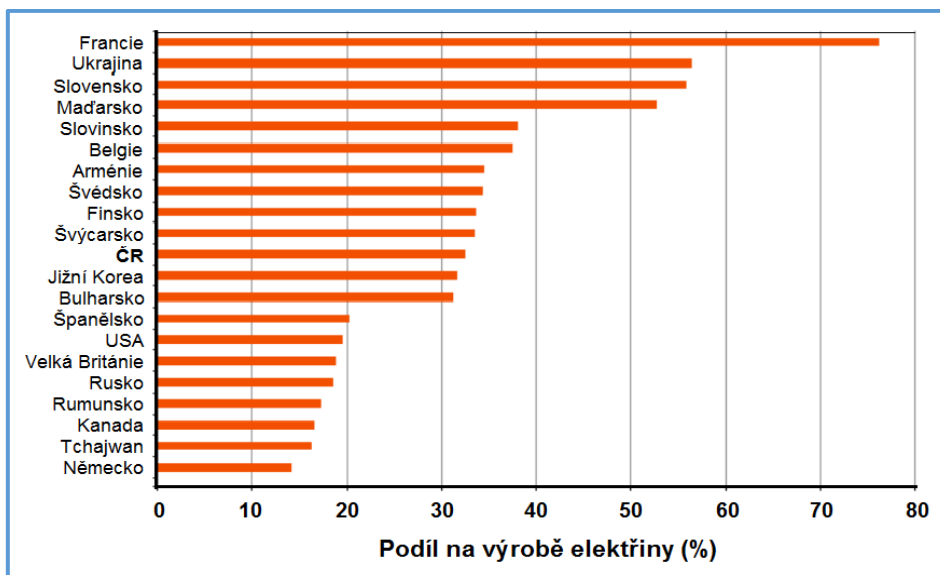
I když princip výroby elektřiny v jaderných elektrárnách je v zásadě obdobný, existuje několik variant konkrétního řešení. Schéma jaderné elektrárny znázorněné na

¹ Operation of a nuclear power plant [online].[cit. 2. 12. 2016]. Dostupné z: <http://nuclear-energy.net/how-nuclear-power-plant-work.html>

obr. 1 představuje její nejvíce rozšířenou modifikaci vycházející z tzv. tlakovodního reaktoru, kde voda slouží jako médium pro přenos tepelné energie a zároveň i jako moderátor neutronů (neutrony vznikající při štěpení mají vysokou energii, a proto se musí moderovat, protože tepelné, tj. pomalé neutrony jsou pro vyvolání dalšího štěpení účinnější). U některých dřívějších jaderných reaktorů se pro moderaci rychlých neutronů používá grafit (včetně Černobyly), řada elektráren, asi 21 % celkového počtu ve světě, je osazena varnými (jednookruhovými) reaktory (včetně Fukušimy).

V současné době je ve světě **v provozu celkem přes 440 jaderných reaktorů** s celkovým instalovaným výkonem 390 909 MW, což v celosvětovém měřítku představuje kolem 15 % veškeré vyrobené energie. Ve výstavbě je jich 59, přičemž jsou připraveny plány na výstavbu dalších 168 reaktorů.

Podíl procentuálního podílu jaderné energetiky na výrobě elektrické energie v zemích, kde je tento podíl vyšší než 10 %, je na obr. 2. Jaderné elektrárny jsou provozovány v ještě dalších devíti zemích, podíl výroby elektřiny z těchto zdrojů je však nižší než 10 %. Jedná se o následující země: Mexiko, Argentina, Jižní Afrika, Pákistán, Nizozemsko, Indie, Čína, Brazílie a Írán.¹



Obr. 2. Výroba elektřiny v jaderných elektrárnách v zemích s podílem nad 10 %.

Jak je vidět z obr. 2, ČR se ve výrobě elektrické energie pomocí jaderných energetických reaktorů řadí k předním státům ve světě. Mírové využití jaderné energie se stalo přirozenou součástí energetického systému řady vyspělých států. I přes určité přibrzdění rozvoje jaderné energie, nejdříve v posledních 30 letech v důsledku havárie v Černobyly a potom posledních pět let kvůli dopadům jaderné havárie ve Fukušimě, lze říci, že **jaderné elektrárny budou mít zásadní vliv na rozvoj energetiky a ekonomiky** i v budoucnu, a to i s ohledem na příznivé environmentální aspekty. Oprávněně můžeme konstatovat, že v současné době v celosvětovém kontextu neexistuje výhodnější alternativní energetický zdroj, který by byl schopen pokrýt rostoucí nároky na energii, a přitom nepřispíval ke zhoršování životního prostředí.

¹ *Jaderná energetika ve světě* [online]. [cit. 2.12.2016]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/jaderna-energetika/je-ve-svete.html>

Situace v České republice

V České republice jsou momentálně v provozu dvě jaderné elektrárny, a to **ETE Temelín a EDU Dukovany** (obr. 3).¹ Na žádné z těchto elektráren nedošlo dosud k žádné významnější nehodě. Perspektivně se počítá s tím, že se jedna nebo i obě tyto elektrárny rozšíří o další bloky.



a)



b)

Obr. 3. Pohled na jaderné elektrárny provozované v ČR, a) JE Temelín, b) JE Dukovany.

Jaderná elektrárna Temelín vyrábí elektřinu ve dvou výrobních blocích s tlakovodními reaktory VVER 1000. Výkon elektrárny je 2x 1055 MWe, což představuje asi 20 % kapacity výroby elektřiny v ČR. Po technologické stránce odpovídá tato elektrárna moderním světovým parametrům a splňuje nejpřísnější bezpečnostní standardy, k čemuž rovněž přispívá i konstrukce kontejnmentu a instalace dalších bezpečnostních systémů a bariér.

Důležitou součástí zajištění bezpečného provozu je vysoká odborná úroveň pracovníků, k čemuž ve značné míře přispívá i plnorozsahový simulátor, který je vlastně kopií blokové dozorny, ze které normálně operativní personál řídí skutečný blok. Na simulátoru se procvičují nejenom úkony spojené s normálním provozem elektrárny, ale i potenciální havarijní stavy či jiné scénáře, ke kterým by hypoteticky mohlo dojít.

Před uvedením JE Temelín do provozu (první blok elektrárny byl spuštěn 21. prosince 2000) byly v podstatě celé Jižní Čechy odkázány na dodávku elektrické energie z jiných oblastí, zejména z ekologicky zatížených severních Čech. Tato jaderná elektrárna umožnila nahradit již zastaralé a postupně odstavované bloky v uhelných elektrárnách.

Jaderná elektrárna Dukovany je mnohem starší než JE Temelín, elektrárna však prošla důkladnou modernizací a nyní vyhovuje veškerým mezinárodním bezpečnostním standardům. Jednotlivé bloky dukovanské elektrárny byly uváděny do provozu postupně v letech 1985-1988. Celkový instalovaný elektrický výkon elektrárny se postupně zvyšoval na dnešních 2040 MW. V elektrárně jsou celkem čtyři bloky, každý s tlakovodním reaktorem typu VVER 440 umožňujícím výrobu elektřiny

¹ *Jaderná energetika v České republice* [online].[cit. 2. 12. 2016]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/je-v-cr.html>

na úrovni 510 MW. JE Dukovany je první provozovanou jadernou elektrárnou v ČR, na které se dosud nevyskytly žádné významnější nehody.

Jako všude ve světě, kde se provozují jaderné elektrárny, i v ČR se ochraně a bezpečnosti těchto jaderně energetických zařízení věnuje mimořádná pozornost. Navíc, v Temelíně i na Dukovanech se provozuje jeden z nejspolehlivějších typů jaderných reaktorů, jaké byly kdy vyvinuty. V těchto reaktorech, chlazených a moderovaných lehkou vodou pod tlakem, není z fyzikálních principů možné, aby v nich došlo ke vzniku situace podobné černobylské havárii. Kontrola nad jadernou bezpečností u nás spadá do gesce **Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB)**,¹ který v této oblasti úzce spolupracuje s Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (MAAE). Agentura MAAE (IAEA - International Atomic Energy Agency)² vždy hodnotila velmi vysoko úroveň bezpečnosti obou jaderných elektráren v ČR.

V ČR veškeré předpisy a požadavky na zajištění radiační ochrany a jaderné bezpečnosti včetně havarijní připravenosti vycházejí z tzv. **atomového zákona**,³ který byl nedávno aktualizován. Atomový zákon a mezinárodní úmluvy stanovují, mimo jiné, podmínky vykonávání činností, které souvisejí s využíváním jaderné energie a ionizujícího záření. Dále také stanoví pravidla radiační ochrany osob a ochrany životního prostředí. Nový atomový zákon akcentuje oblast havarijní připravenosti (nově „zvládání radiačních mimořádných událostí“), kde je také požadováno zpracování Národního programu monitorování a Národního radiačního havarijního plánu. Výkon státní správy a dozoru v oblasti jaderné bezpečnosti, radiační ochrany, havarijní připravenosti, respektive zvládání radiačních mimořádných událostí a monitorování radiační situace, je v působnosti SÚJB, který vydává příslušná povolení, schvaluje dokumentaci a provádí pravidelné kontroly na pracovištích se zdroji ionizujícího záření. Atomový zákon rovněž řeší i oblast monitorování radiační situace na území ČR, která kromě SÚJB zajišťují ministerstva, jiné správní orgány stanovené tímto zákonem a držitelé povolení stanovené zákonem. Řízením tohoto monitorování je pověřen SÚJB. Získaná data slouží pro hodnocení radiační situace, pro potřeby sledování a posuzování stavu ozáření a v případě radiační havárie pro rozhodování o opatřeních vedoucích ke snížení nebo odvrácení ozáření.

Důležitou součástí ochrany obyvatelstva před radiačním nebezpečím je i vhodná forma **komunikace s veřejností**, neboť tím se zajistí, aby veřejnost vnímala radiační a jaderné riziko realisticky a nepodléhala různým dezinformacím, které neúměrně zveličují nebezpečí spojené s využíváním záření a jaderné energie. Informovaná veřejnost potom lépe spolupracuje při likvidaci případné radiační nebo jaderné havárie, čímž se do značné míry eliminují nebo minimalizují psychologické důsledky takové situace. Tento postup a spolupráce s veřejností je důležitá také z hlediska posílení a implementace bezpečnostních opatření a standardů, kde jakékoli jaderné nehody jsou zneužívány protijadernými organizacemi v jejich demagogickém tažení proti využívání jaderných technologií.

Kromě dodržování přísných bezpečnostních opatření během provozu, mimořádné úsilí se věnuje také havarijní připravenosti, která má za cíl snížit dopad následků takové mimořádné události na personál elektrárny a na obyvatelstvo v jejím

¹ SÚJB [online].[cit. 2.12.2016]. Dostupné z: www.sujb.cz

² International Atomic Energy Agency [online].[cit. 2.12.2016]. Dostupné z: www.iaea.org

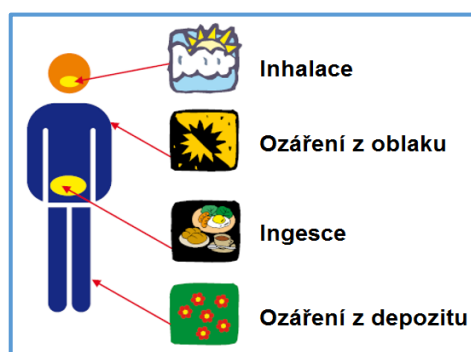
³ Atomový zákon, Sbírka zákonů č. 263/2016, 14. července 2016.

okolí na co nejnižší míru. Pro hodnocení závažnosti nehod a havárií doporučuje MAAE stupnici, která slouží ke kategorizaci mimořádných situací, k nimž může na jaderné elektrárně dojít (obr. 4). Jedná se o **mezinárodní stupnici jaderných událostí INES** (International Nuclear Event Scale),¹ která představuje osmistupňovou škálu, zavedenou v r. 1990 pro posuzování poruch a havárií jaderných zařízení. Za nehody se považují události, které nevyvolají deterministické účinky a na dávky obyvatelstvu v okolí elektrárny nemají významnější dopad. To však neplatí pro pracovníky JE, kde se takové případy mohou vyskytnout.



Obr. 4. Kategorizace stupně nehod a havárií na jaderných elektrárnách.

Za více než 50 let provozování jaderných elektráren ve světě byla pouze havárie v Černobylu, a potom i havárie ve Fukušimě, označeny stupněm 7. Naopak ani jeden případ nemusel být označen stupněm 6. Havárie stupně 5 byly dosud dvě, a to na JE Windscale (Velká Británie) a na JE Three Mile Island (USA). V bývalém Československu byla nejzávažnější havárie označena stupněm 4. Postihla JE Jaslovské Bohunice, kde 22. února 1977 došlo k požáru jednoho palivového článku. Přitom z hlediska důsledků jakékoli nehody nebo havárie posuzujeme míru ozáření osob jako součet dvou příspěvků: vnější ozáření pronikavým ionizujícím zářením (ozáření z radioaktivního oblaku a depozitu na povrchu) a ozáření vlivem vstupu radionuklidů do organismu osob, což zahrnuje inhalaci a ingesci radioaktivních látek (obr. 5).



Obr. 5. Cesty ozáření osob při zasažení radioaktivním zamořením ze země, ze vzduchu a potravinovým řetězcem.

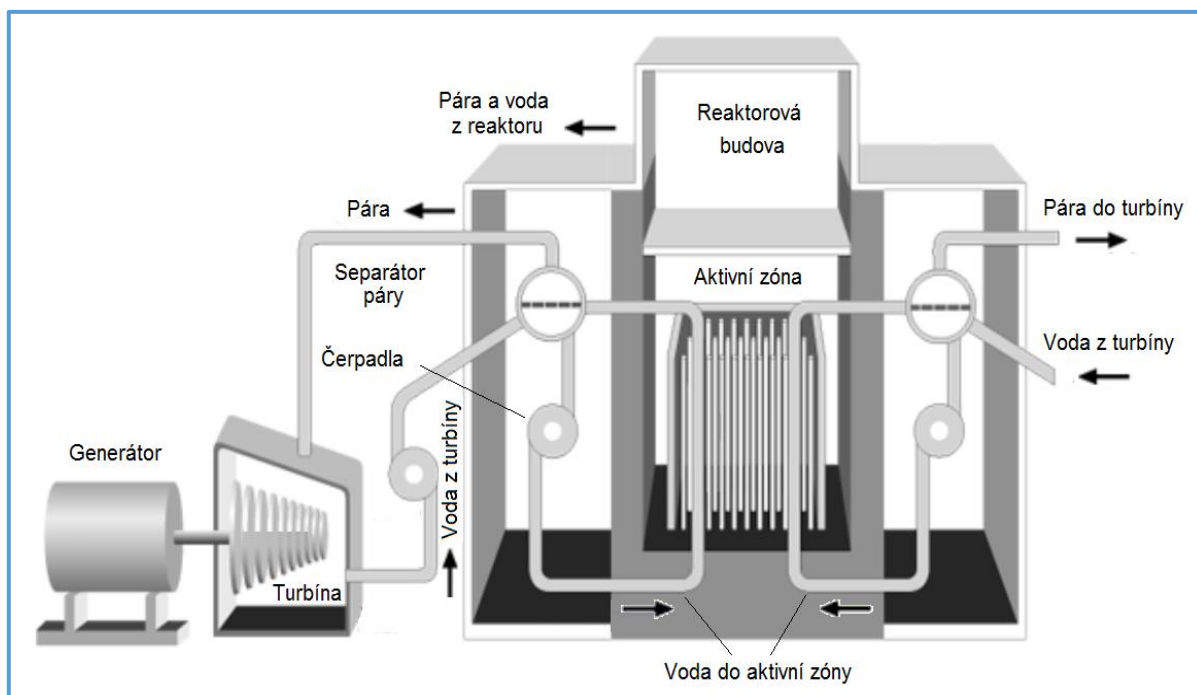
¹ INES User's Manual, IAEA, Vienna, 2013.

Jaderná havárie v Černobyli

K havárii došlo na 4. reaktorovém bloku komplexu JE v Černobyli, kde byly před havárií v provozu 4 bloky, každý s reaktorem typu **RBMK** (Reaktor Boľšoj Moščnosti Kanaľnyj), tj. kanálový reaktor vysokého výkonu. Jedná se o lehkovodní grafitový reaktor, který se používá výhradně na území bývalého Sovětského svazu. Tento typ reaktoru (RBMK-1000) byl instalován ve všech čtyřech blocích v černobylské jaderné elektrárně a počítalo se s jeho použitím i v nedostavěném 5. a 6. bloku. Ovšem po černobylské nehodě se od další výstavby tohoto typu reaktoru upustilo a dnes se již nestaví. Celkem jich bylo postaveno 17, z toho 11 je ještě v provozu (JE Kursk - 4 bloky, JE Leningrad - 4 bloky, JE Smolensk - 3 bloky). Po černobylské nehodě byly všechny tyto reaktory značně modernizovány a do roku 2025 by měly být již vyřazeny z provozu.

Černobylská jaderná elektrárna byla v době havárie jednou z největších na světě a zároveň měla i přidružený strategický program vojenského charakteru, protože se v ní vyrábělo také plutonium pro jaderné zbraně.

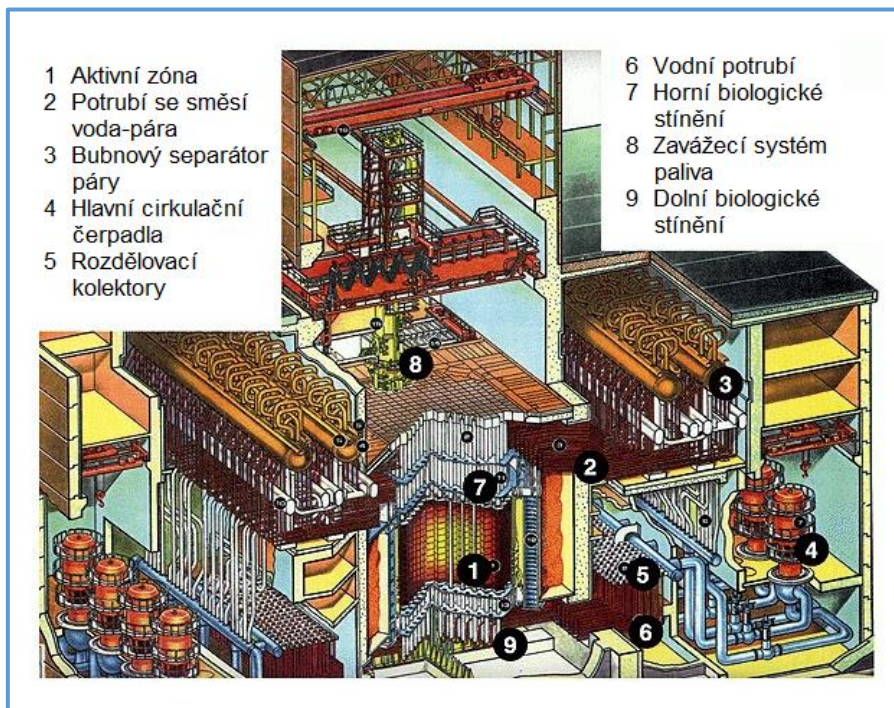
Blokové schéma elektrárny s jaderným reaktorem RBMK, na němž se prováděl experiment, který vedl ke ztrátě kontroly nad reaktorem a následnému výbuchu, je na obr. 6. Pro tento reaktor je charakteristické, že palivové články jsou umístěny každý v samostatném kanálu, kam se zesponu čerpá studená voda, cestou nahoru se voda ohřívá na vysokou teplotu. Nahoře odchází parovodní směs do separačního bubnu. V separačním bubnu se odděluje voda od páry. Pára potom putuje do turbíny a voda se pak vrací přes čerpadla zpět do reaktoru.



Obr. 6. Hlavní součásti 4. bloku JE v Černobyli¹

¹ *The Chernobyl Gallery* [online]. [cit. 2. 12. 2016]. Dostupné z: <http://chernobylgallery.com/chernobyl-disaster/cause/>

Detailnější pohled do útrob budovy jaderného rektoru je na obr. 7, odkud je zřejmé neobvyklé a poměrně komplikované uspořádání jednotlivých systémů.



Obr. 7. Uspořádání reaktoru a dalších systémů uvnitř reaktorové budovy¹ 4. bloku.

Jaderná havárie v Černobylu se stala 26. dubna 1986 a má přívlastek největší jaderné nehody v historii jaderné energetiky. Výbuch, který nastal v 1:23:40 h ráno tento den, byl způsoben souhrnem více faktorů. Kromě toho, že jaderný reaktor nesplňoval dnes již běžné bezpečnostní standardy, měl i nízkou míru automatizace. Během prováděného experimentu se měl v reaktoru ověřit setrvačný doběh turbogenerátoru. Neodpovědnými zásahy do řízení reaktoru nekontrolovatelně vzrostl jeho výkon, což způsobilo přehřátí paliva a destrukci jeho povrchu. Krátce po započetí prováděného experimentu nastaly dva výbuchy. Podle některých vyšetřovatelů havárie bylo po vytažení prakticky všech absorpčních tyčí z aktivní zóny reaktoru a po zpozorování stoupajícího výkonu reaktoru již nemožné jakýmkoli způsobem havárii zabránit. Ostatní ochranné systémy byly vypnuty, některé z nich byly dokonce mimo provoz. Následovala první exploze páry a vodíku. Ta odhodila 1200 tunovou betonovou desku reaktoru a poškodila střechu. Po pár vteřinách následovala druhá exploze. Z obnažené aktivní zóny reaktoru začaly unikat radioaktivní látky. Tento únik se podařilo zcela zastavit až po deseti dnech.

Z polohy Černobylu (obr. 8a),² v těsné blízkosti hranice s Běloruskem a poměrně blízko hranice s Ruskou federací, je zřejmé, že kromě oblasti na sever of Kyjeva, bylo zasaženo i území Ruska. Havárie způsobila totální destrukci reaktoru (obr. 8b).³

¹ Budowa reaktora RBMK -1000 [online]. [cit. 2. 12. 2016]. Dostupné z: <http://ncbj.edu.pl/rbmk-reaktor-z-czarnobyla/budowa-reaktora-rbmk>

² Ukrajina: Ve stínu velkého Ruska [online]. [cit. 2. 12. 2016]. Dostupné z: <http://www.stoplusjednicka.cz/ukrajina-ve-stinu-velkeho-ruska>

³ Černobyl – 25 [online]. [cit. 2. 12. 2016]. Dostupné z: <http://chernobyl-25.webnode.cz/>

Původní sovětská vyšetřovací verze určila jako hlavní příčinu chyby operátorů a selhání lidského faktoru. Pozdější analýzy IAEA však poukázaly i na konstrukční a koncepční chyby reaktoru a systému regulace. Později se ukázalo, že svou roli sehrála i konstrukce samotného reaktoru.



a)



b)

Obr. 8. Geografická poloha Černobylu (a) a pohled na 4. blok JE bezprostředně po havárii, kdy se vrtulníky snaží shazováním písku a olověných destiček zmírnit únik radioaktivních látek z reaktoru.

Po nesmírném úsilí se podařilo podstatně zastavit **únik radioaktivity**, celý proces však mohl být mnohem účinnější, pokud by se s havárií tohoto druhu předem počítalo. Později byla kolem reaktoru vybudována masivní ocelová a betonová konstrukce, kterou je zničený reaktor dosud překryt. Tento **sarkofág** (obr. 9a) však již dosluhuje, a proto se mezitím s obrovskými náklady zkonstruoval nový sarkofág, s jehož instalací se počítá v r. 2017 (obr. 9b). Tato ohromná konstrukce by měla zabezpečit utěsnění reaktoru na dobu nejméně 100 let. Nový kryt má po dokončení instalace zamezit případnému úniku radiace z narušeného sarkofágu a jeho postupné rozebrání s cílem bezpečného uložení radioaktivního materiálu.



a)



b)

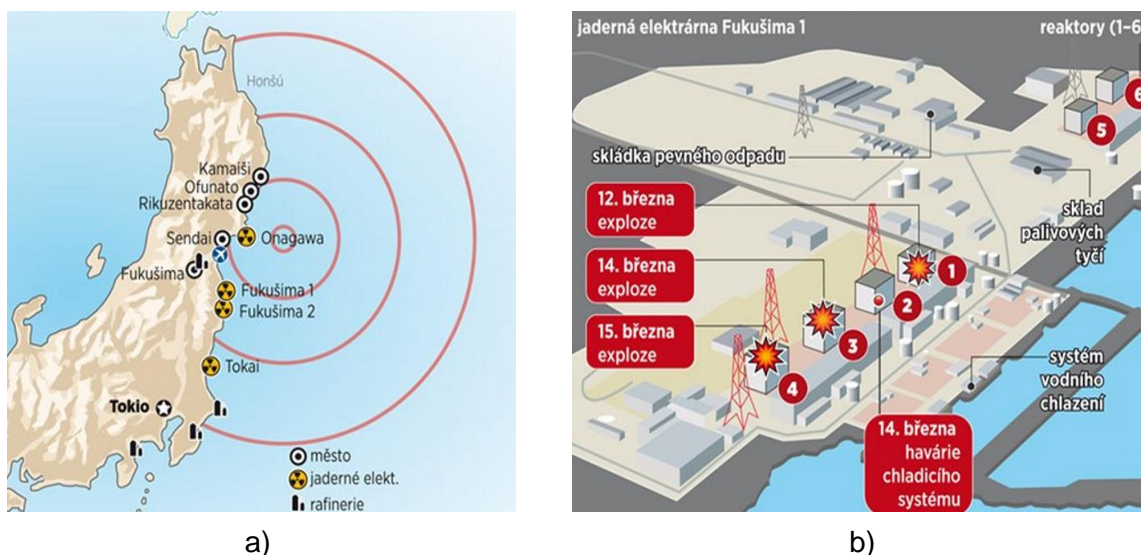
Obr. 8. Pohled na současný sarkofág (a) a na novou obří konstrukci nového sarkofágu.

Exploze vyvrhly do okolí jaderné elektrárny 4 % z celkových 114 tun paliva. Silné úniky radioaktivity z hořícího reaktoru se podařilo výrazně omezit až deset dní po osudných explozích. Celkový únik radioaktivity přesáhl 2×10^{18} Bq (Bq je jednotkou aktivity radionuklidu a odpovídá jednomu rozpadu za sekundu).

Jaderná havárie ve Fukušimě

K havárii došlo v březnu r. 2011, tedy po 25 letech od Černobyli. Příčinou bylo mimořádně **silné zemětřesení**, které vyvolalo **vlny tsunami** dosahující výšky téměř 40 metrů. Tyto vlny zasáhly JE Fukušima, kde se s takovou jejich výškou a intenzitou nepočítalo (obr. 9). Vlnami tsunami bylo postiženo zejména východní pobřeží Japonska, kde se nachází několik jaderných elektráren. Největší poškození utrpěla elektrárna Fukušima. Rozsah havárie byl ohodnocen stupněm 7, což je nejvyšší možný stupeň na mezinárodní stupnici jaderných mimořádných událostí (stejný jako v případě Černobyli).

Pravděpodobný scénář havárie ve Fukušimě je takový, že nejdříve došlo k závažnému poškození tří tlakových nádob reaktoru a při obnažení paliva vznikal vodík. Ten měl být příčinou tří mohutných explozí, které měly za následek únik radiace do okolí elektrárny. Přes 150 000 obyvatel z okolí elektrárny muselo být evakuováno.



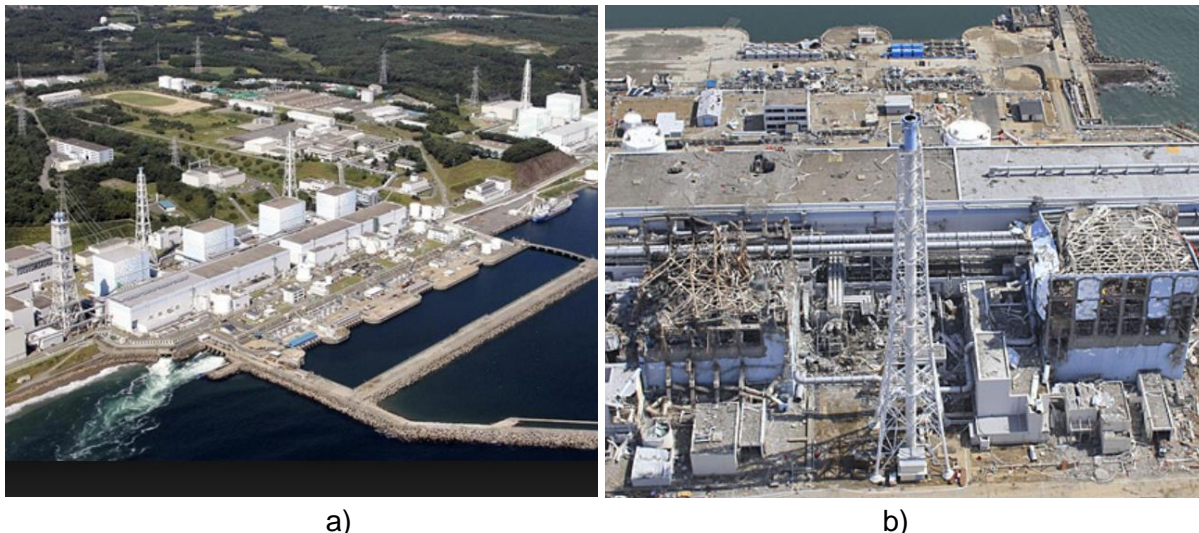
Obr. 9. Poloha epicentra zemětřesení, které vyvolalo tsunami (a) a jaderný komplex Fukušima 1 po zemětřesení a tsunami.¹

Ze začátku se zdálo, že k vážné větší škodě na elektrárně nedojde, protože všechny reaktory zasažené zemětřesením se automaticky vypnuly. Avšak i reaktor, kde neprobíhá řetězová reakce, produkuje tepelnou energii rozpadem radionuklidů uvnitř aktivní zóny. Toto teplo se musí odvádět, jinak by došlo k enormnímu zvýšení teploty, kde je nebezpečí výbuchu a rozrušení reaktoru. A právě k tomu ve Fukušimě došlo, neboť došlo ke ztrátě všech šesti externích zdrojů napájení v důsledku poškození zemětřesením. Odvod tepla potom zajišťovaly nouzové dieselové generátory umístěné v suterénech turbínových budov. Nedostatkem účinného

¹ *Jaderný komplex Fukušima po zemětřesení a tsunami* [online].[cit. 2.12.2016]. Dostupné z: http://zpravy.idnes.cz/foto.aspx?foto1=JB39d1fd_jap.jpg

chlazení nejdříve došlo k závažnému poškození tří tlakových nádob reaktorů, kde při obnažení paliva vznikala vodík. Ten byl příčinou **tří mohutných explozí**, které měly za následek únik radioaktivních látek do okolí elektrárny. Přes 150 tis. obyvatel z okolí elektrárny muselo být evakuováno.

Na obr. 10a jsou fotografie jaderného komplexu Fukušima před nehodou a také pohled na poškozené dvě reaktorové budovy způsobené havárií (obr. 10b).



Obr. 10. Jaderná elektrárna Fukušima před havárií (a)¹ a pohled na zničené dva reaktorové bloky po havárii (b).²

Důsledky havárie v Černobylu

Nový sarkofág, kterému se říká „Oblouk“, má skutečně tvar obřího oblouku 105 metrů vysokého, 150 metrů dlouhého a 260 metrů širokého. Po dokončení ho po kolejích přisunou nad elektrárnu, kterou hermeticky uzavře. Během příštích 100 let by tento moderní sarkofág měl efektivně izolovat reaktor od vnějšího okolí a zamezit tak úniku jakýchkoli radioaktivních látek z jeho útrob. Stavba nového sarkofágu je financována z mezinárodních zdrojů a darů a dosud se náklady vyšplhaly na necelých 60 miliard korun.

Dopad této havárie se projevil zejména velkým únikem radioaktivity v prvních dnech po havárii, což vedlo k rozsáhlé **radioaktivní kontaminaci** nejenom bezprostředního okolí elektrárny (především na území Běloruska), ale i ve vzdálenějších místech, kam radioaktivní látky zanesl mrak. Vzhledem k měnícím se meteorologickým podmínkám, kdy vítr často měnil směr a déšť vymýval radioaktivní látky ze vzduchu, zamoření blízkých i vzdálenějších území vykazovalo značné nehomogenity. Ozáření obyvatel bylo zejména v důsledku vnějšího záření emitovaného uniklými radionuklidy přítomnými ve vzduchu a usazenými na povrchu půdy a různých dalších objektů a předmětů.

¹ *Fukushima nuclear accident* [online]. [cit. 2. 12. 2016]. Dostupné z: http://energyeducation.ca/encyclopedia/Fukushima_nuclear_accident

² *Fukushima nuclear accident* [online]. [cit. 2. 12. 2016]. Dostupné z: <http://isis-online.org/studies/category/fukushima-nuclear-accident>

Katastrofa si bezprostředně vyžádala 31 mrtvých (pracovníci elektrárny a hasiči, kteří likvidovali požár), 237 lidí bylo postiženo akutní nemocí z ozáření různého stupně, velkými dávkami záření bylo zasaženo několik tisíc pracovníků, kteří se podíleli na likvidaci následků havárie. Z oblasti o poloměru 30 km od zničeného bloku bylo trvale evakuováno 135 tis. obyvatel, tisíce čtverečních kilometrů půdy zůstávají dodnes kontaminovány.

Okolo elektrárny existují dvě zóny o poloměru 10 km a 30 km. Ve vnitřní zóně je zákaz jakéhokoli pohybu s výjimkou exkurzí a osob, které pracují na elektrárně. V 30 km pásmu proběhla druhá etapa vyklizovacích prací, jejíž součástí byla skrývka milionů metrů krychlových zeminy kontaminované do hloubky 3 cm. Ze zamořené půdy rostou borovice s deformovanými korunami. Ve vnější zóně jsou vesnice, do kterých se především starší lidé rok po havárii vrátili. Dnes jich tam žije na 600. Dostávají finanční dávky od Ministerstva Černobylu a dvakrát týdně jim vozí autobus základní potraviny z území mimo zóny.

Aniž chceme zdravotní následky havárie Černobylu podceňovat, je namíste připomenout, že odhady počtu obětí v příštích 40 letech od havárie založené na lineárním modelu účinků nízkých dávek na obyvatelstvo dosáhly několik set tisíc úmrtí na pozdní účinky. Třicet let po havárii se naštěstí tyto spekulace, které někteří publicisté vydávají za realitu, nepotvrzují. Zatímco vysoké dávky záření vyřadí kontrolní biologický systém z provozu a navíc vyvolávají obrovské množství mutací, výzkumy naznačují, že nízké dávky působí podobně jako očkování, tj. povzbuzují opravný mechanismus poškozených buněk i DNA (radiační hormeze).

Existují rovněž výzkumné zprávy uvádějící, že organizmy držené v podmínkách, kdy je radiační zatížení nižší než normální, jsou postiženy škodlivě a zotavují se teprve tehdy, když jsou podmínky vráceny k normálu. Vliv vyšších dávek záření je popisován na zdravotním stavu lidí, kteří přežili atomové bombardování v Japonsku, případně zblízka zažili havárii jaderné elektrárny. Jak zjistili japonští výzkumníci, je úmrtnost mezi osobami, které přežily atomové bombardování s dávkami v rozmezí 10-90 mSv a 10-190 mSv na rakovinu nižší než u kontrolní skupiny, zejména co se týče leukémie a rakoviny tlustého střeva.

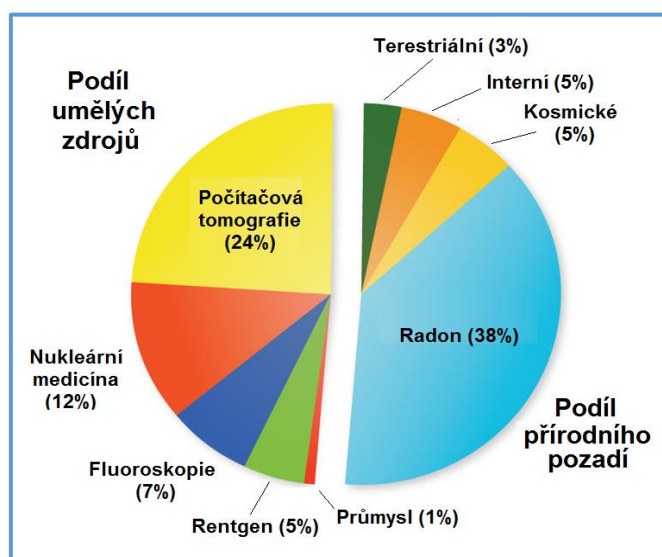
Leukémie je nejvýznamnějším negativním zdravotním účinkem, který souvisí se zářením. Vykazuje největší nadměrný výskyt u lidí, kteří přežili atomové bombardování, i u dalších vysoce exponovaných skupin. Nadměrný výskyt leukémie se však pozoruje pouze při dávkách větších než 200 mSv. Radioaktivní mrak však 27. 4. 1986 zasáhl i území tehdejšího Československa. Ze zdravotního hlediska byly nejdůležitějšími radioaktivními látkami cesium a jód. Jód s poločasem rozpadu 8 dní mohl být nebezpečný pouze v prvních týdnech po havárii, ohrožena byla hlavně štítná žláza u dětí.

Cesium s poločasem rozpadu 30 let se zapojilo do potravinového řetězce (např. houby, divočina) a bude v něm působit desítky let. Průměrný dávkový ekvivalent však vyhovoval platným předpisům, nelze však vyloučit, že mohl být v individuálních případech překročen. Byla přijata následující bezpečnostní opatření: zákaz spotřeby a distribuce mléčných výrobků z ovčího mléka, kravské mléko bylo užíváno pouze k výrobě dlouhozrajících sýrů, aby se obsažený radioaktivní jód stačil rozpadnout, a byla pozastavena distribuce dětské mléčné výživy.



Obr. 11. Radiační úroveň v okolí sarkofágu je stále ještě asi 70-krát vyšší než přírodní pozadí.¹ Dozimetr ukazuje, že ve vzdálenosti asi 300 m od reaktoru je úroveň kolem 7,1 $\mu\text{Sv/h}$ (hodnoty úrovně normálního přírodního pozadí se pohybují kolem 0,1 $\mu\text{Sv/h}$).

To však není nikterak alarmující úroveň, uvědomíme-li si, že efektivní dávka cestujících letadlem na trase Praha-Moskva bude kolem 7 μSv . Pro lepší orientaci posouzení velikosti ozáření z přírodních zdrojů a různých umělých zdrojů, resp. aplikací radiálních a jaderných technologií, je na obr. 12.



Obr. 12. Průměrné příspěvky k ozáření obyvatel z různých zdrojů ionizujícího záření (podíl jaderné energetiky je na úrovni desetin procenta).

Důsledky havárie v Černobyli dokreslují i následující číselné údaje: 5 mil. obyvatel stále žije v kontaminovaných oblastech Běloruska, Ruska a Ukrajiny; 116 tis. osob přemístěných z bezprostředního poloměru 30 km několik dní po havárii; 200 tun vysoce radioaktivního materiálu, který se ještě stále nachází v poškozeném reaktoru; 3×10^{19} Bq aktivita celkového množství radioaktivních látek, které se při explozi reaktoru dostaly do životního prostředí; 5 000 tun písku, olova, jílu a boru (kvůli absorpci

¹ *Technet CZ* [online]. [cit. 2.12.2016]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/cernobyl-havarie-0kx-/tec_tecnika.aspx?c=A160425_152556_tec_tecnika_mla

neutronů), které bylo shozeno z vrtulníků na hořící trosky reaktoru v prvních dnech po havárii; 300 000 tun betonu použitého ke konstrukci stávajícího sarkofágu kolem poškozeného reaktoru.

Radiologický dopad havárie lze charakterizovat následujícími údaji: kolem 50 osob, které zemřely v průběhu několika dní, resp. týdnů po havárii (28 z nich zemřelo na následky vysokých dávek bezprostředně po havárii); u 134 pracovníků elektrárny a hasičů byla potvrzena akutní nemoc z ozáření, střední dávka přes 500 tis. likvidátorů se pohybovala kolem 120 mSv; odhaduje se, že asi u 2,5 tis. likvidátorů způsobí ozáření rakovinu, 130 tis. z nich však stejně onemocní rakovinou v důsledku jiných příčin než z ozáření; většina evakuovaných osob obdržela dávku menší než 200 mSv.

Přírodní pozadí na území ČR se pohybuje okolo 3 mSv/rok, ale v Evropě jsou oblasti, kde přírodní pozadí dosahuje desítek, a ve světě dokonce stovek mSv ročně. Výpočty hodnot efektivní dávky, která zasáhne člověka žijícího na území naší republiky v důsledku černobylské havárie za období 1986 až 2056, se pohybují kolem 0,6 mSv.

Důsledky havárie ve Fukušimě

Výbuchy páry a vodíku a následných 10 dní trvající požár grafitového moderátoru uvolnil z aktivní zóny reaktorů do ovzduší cca 5 % celkového množství radioaktivního materiálu. Navíc zůstalo palivo uvnitř a téměř výhradně šlo o těkavější složku štěpných produktů. V první fázi byla ještě před únikem radioaktivity evakuována zóna do vzdálenosti 20 km od elektrárny o rozměru zhruba 700 km². Později podle dozimetrické situace ještě další oblasti směrem na severozápad od elektrárny s o něco menší rozlohou. Tam se jednalo naštěstí o velmi málo obydlené oblasti. Kritéria pro evakuaci byla dost podobná těm, která se uplatnila při havárii v Černobylu. Evakuováno bylo něco přes 100 000 lidí.

Pracovníci podílející se na likvidaci havárie obdrželi dávky vesměs pod 100 mSv, pouze 6 pracovníků bylo ozářeno dávkou vyšší než 250 mSv. Ve Fukušimě nedostal žádný pracovník takovou dávku, aby u něj nastala nemoc z ozáření. Je třeba říci, že to bylo v prvním období po havárii a toto číslo se už hodně dlouho nemění. Při pracích na elektrárně se zúčastnilo postupně 21 022 pracovníků, z nichž 3 422 bylo z firmy TEPCO. Z nich 13 753 obdrželo efektivní dávku menší než 10 mSv.

Díky včasné evakuaci obyvatelstvo ve Fukušimě obdrželo dávky, které jsou zlomkem přírodního radiačního pozadí. Díky včasnému informování a kontrole vodních zdrojů a potravin, hlavně mléka, a možnosti zásobování z jiných oblastí se zabránilo ohrožení dětí radioaktivním jódem. To se potvrdilo i následnými testy, které byly prováděny celotělovými detektory. Očekává se, že následkem havárie nedojde ke zvýšení počtu rakovin štítné žlázy. Vzhledem k tomu, že efektivní dávky u obyvatel v okolí Fukušimy jsou relativně nízké (srovnatelné s pozadím), nelze předpokládat, že dojde k nějakému významnému navýšení počtu onemocnění zhoubnými nádory či jinými nemocemi v důsledku ozáření.

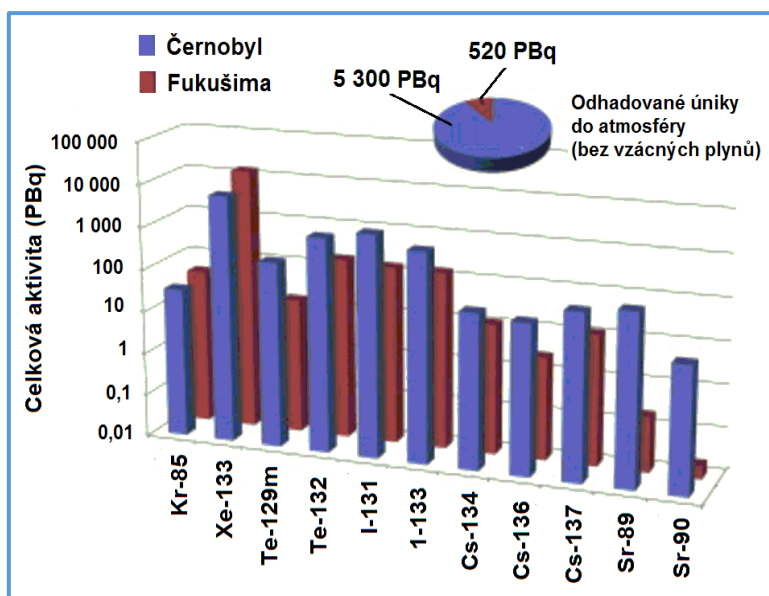
Jak dokládají výsledky monitorování, přestože černobylská havárie uvolnila tolik radioaktivní kontaminace jako 400 bomb z Hirošimy, byla její celková velikost asi 100× až 1 000× menší než kontaminace způsobená atmosférickými testy jaderných zbraní v polovině 20. století. Lze proto tvrdit, že ačkoli byla černobylská havárie obrovskou lokální katastrofou, nepřerostla v katastrofu globální.

Porovnání obou jaderných havárií

Mezi Fukušimou a Černobylem existuje **několik zásadních rozdílů**. Zatímco v Černobyli byla vyvržena i část vyhořelého paliva a ven se dostalo i plutonium a další transurany, ve Fukušimě udržel kontejnment a reaktorová nádoba prakticky všechno palivo uvnitř a ven se dostaly jen těkavější produkty štěpení. Než nastal ve Fukušimě únik radioaktivity, uplynulo dost času, aby se mohla provést evakuace obyvatelstva a pracovníci elektrárny se mohli na práci v radiačním prostředí připravit. V Černobyli zpočátku ani pracovníci, tím méně obyvatelé okolních sídel, nevěděli, že je prostředí okolo nich radioaktivní. Dozimetrická opatření u elektrárny a evakuace civilního obyvatelstva proběhla se značným zpožděním. I to bylo důvodem, proč byla celková dávka i dávka spojená s vnitřní kontaminací radioaktivním jódem dost vysoká.

Dalším důvodem, proč je radiologický dopad jaderné havárie ve Fukušimě mnohem menší než důsledky Černobyli, jsou rozdíly v poloze a okolím těchto dvou jaderných elektráren, včetně převažující meteorologické situace. V případě Černobyli většina radioaktivního spadu zasáhla velké plochy na území Ukrajiny, Běloruska a Ruska. Prakticky veškerý radioaktivní materiál se postupně deponoval na území v rozsahu asi 100 km na povrchu zasaženého terénu. Na východ od Fukušimy, pobřeží Japonska omývá Indický oceán, kam, v důsledku převažujícího směru větru, se dostala přes polovina radioaktivního spadu.

Přehled aktivity některých radionuklidů, které se dostaly do atmosféry po haváriích v Černobyli a Fukušimě, jsou ilustrovány na obr. 13 a v tab. 1 a 2.



Obr. 13. Srovnání jaderných havárií v Černobyli a Fukušimě z hlediska množství radionuklidů, které se dostaly do ovzduší.¹

¹ CULLEN, J. T. *Comparing the environmental impacts of the Chernobyl and Fukushima disasters* [online]. Dostupné z: <https://fukushimainform.ca/2014/11/21/comparing-the-environmental-impacts-of-the-chernobyl-and-fukushima-disasters/>

Tab. 1. Porovnání některých údajů týkajících se čtyř jaderných havárií.

Místo havárie	Windscale (1957)	Three Mile Islands (1979)	Černobyl (1986)	Fukušima (2011)
Úniky do atmosféry (PBq)				
I-131	0,74	0,00055-0,0008	1 700	100-500
Cs-237	0,22	-	86	6-20
Xe-133	16	90-500	6 500	10 000
Ozáření v důsledku radiojódů (mGy)				
Absorbovaná dávka ve štítné žláze	100 (děti) 10 (dospělí)	0,07 (max., dospělí)	50-5 000 (průměr evak.)	66 (max., děti) 24 (max., dosp.)

Tab. 2. Vlastnosti některých vybraných radionuklidů a jejich odhadované množství, které se dostalo do ovzduší z obou elektráren (n.a. – chybějící spolehlivé údaje).¹

Radionuklid	Poločas	Konverzní faktor (nGy.h ⁻¹)/(kBq.m ⁻²)	Odhadnuté úniky (PBq)	
			Černobyl	Fukušima
Zr-95	65,5 d	2,82	84	n.a.
Ru-103	39,3 d	1,85	168	n.a.
I-131	8,04 d	1,49	1 760	120
Te-132	3,25 d	0,79	1 150	29
Cs-134	2,07 r	5,97	47	9,0
Cs-137	30,1 r	2,18	85	8,8
Ba-140	12,8 d	0,57	240	n.a.
Np-239	2,36 d	0,60	400	n.a.

Závěr

Už je tomu něco přes 5 let, co v r. 2011 zasáhlo Japonsko silné zemětřesení, které se projevilo až čtyřicetimetrovými vlnami. Tato přírodní katastrofa ovlivnila zejména východní pobřeží Japonska, kde je provozováno několik jaderných elektráren, včetně jaderné elektrárny Fukušima. Minulý rok uplynulo také 30 let od havárie v Černobylu. Tato výročí byla vhodnou příležitostí zhodnotit příčiny obou havárií, jejich dopady na obyvatelstvo a životní prostředí, jakož i vzít si ponaučení z těchto mimořádných situací za účelem dalšího zlepšení konstrukce nových jaderných elektráren, kde se stále přísnější pozornost zaměřuje na radiační a jadernou bezpečnost.

Stejně vážné, ne-li vážnější, však byly dopady rozporuplných informací a obrovské přehánění rozsahu následků obsažené ve zprávách médií a řadě pseudovědeckých publikací, dodnes se můžeme setkat s výčtem obětí sahajícím do

¹ IMANAKA, T. et al. *Comparison of the accident process, radioactivity release and ground contamination between Chernobyl and Fukushima*. Journal of Radiation Research, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1093/jrr/rrv074, Special Issue – Fukushima.

stovek tisíc. Nelze však podcenit psychologické a společenské dopady na obyvatelstvo. Obě havárie měly nepříznivý dopad na rozvoj jaderné energetiky ve světě. Několik zemí přijalo rozhodnutí pozastavit svůj jaderný program nebo úplně zavřít jaderné elektrárny (Německo chce tak učinit do r. 2022). Postupně se však v řadě zemí opět přistoupilo ke stavbě nových jaderných elektráren, např. Bělorusko, Finsko, Francie a Slovensko staví nové jaderné zdroje. Velký rozvoj v této oblasti se očekává v takových státech jako Čína (plánuje se výstavba 24 jaderných bloků), Rusko (8 nových bloků), Indie (6), USA (5) a Jižní Korea (4).

V případě Černobylu a Fukušimy se každopádně jednalo o těžké havárie, které se řešily s plným nasazením veškerých dostupných záchranných a zdravotnických kapacit. Přitom stále probíhá důkladná analýza důsledků těchto havárií a rozsáhlé monitorování radiační situace. Na základě získaných zkušeností se provedla řada opatření směřujících ke zvýšení bezpečnosti jaderných zařízení, která jsou bezprecedentní a nesrovnatelná se situacemi při jiných haváriích. Stačí vzpomenout havárii v chemické továrně v Bhopalu v Indii, kde zahynulo několik desítek tisíc lidí a bylo zamořeno rozsáhlé okolí tohoto místa vysoce toxickými látkami. Po této události nebyly podniknuty prakticky žádné kroky k tomu, aby se určil rozsah škod a důsledně dekontaminovalo postižené okolí.

Výskyt i relativně nevýznamných drobných nehod, natož havárií, v oblasti jaderných technologií má mnohem větší publicitu, než je to v jiných (nejaderných) případech. I proto vnímá veřejnost jaderné nebo i radiační nehody a havárie daleko více než jakékoli jiné mimořádné události v jiných oblastech. Je to způsobeno do značné míry i tím, že lidstvo se s prvním dopadem využití jaderných aplikací setkalo prostřednictvím horibilních zpráv o devastaci vyvolané po jaderném bombardování v Hirošimě a Nagasaki v Japonsku na konci 2. světové války. K radiofobii neinformované veřejnosti přispívá i okolnost, která by měla naopak představovat výhody při použití záření a jaderné energie, totiž možnosti měřit i velmi nepatrné úrovně záření. Dnes disponujeme monitory a dozimetry záření, které jsou schopny identifikovat radiační dávky mnohokrát menší, než s jakými se setkáváme normálně v našem okolí v důsledku stopové přítomnosti přírodních radionuklidů obsažených v půdě, horninách, ve vodě a ve vzduchu. Jinými slovy, když náš přístroj něco ukazuje a reaguje na změny přírodního pozadí, to ještě nemusí nic znamenat, protože úroveň záření se pohybuje v rámci fluktuací radiačního pozadí. Pro někoho to však může znamenat, že se v daném místě vyskytuje záření, které může ohrozit naše zdraví.

V současné době jsou rozpracovány postupy pro bezpečné nakládání se zdroji ionizujícího záření, radioaktivními a jadernými materiály, včetně opatření na minimalizaci ozáření za normálních i havarijních situací. Je třeba si uvědomit, že při využívání zdrojů ionizujícího záření a jaderné energie mohou existovat v podstatě jenom dvě situace: buď je vše normální, tj. v souladu s příslušnými bezpečnostními předpisy a standardy (kde riziko je tak nízké, že jej můžeme akceptovat vzhledem na pozitivní přínosy dané aplikace), nebo nastala nehoda či havárie, kde je prvořadou snahou takovou situaci vrátit co nejdříve do normálního stavu. Během radiačních nebo jaderných nehod může krátkodobě dojít k ozáření pracovníků i veřejnosti nad rámec stanovených limitů či referenčních úrovní, ale stále se bude jednat ještě o ozáření, které v převážné většině nepředstavuje žádné dramatické ohrožení zdraví ozářených osob. Úkolem radiační ochrany je vlastně reakce na tyto dva druhy situací: v prvním případě je snahou, aby ozáření bylo co nejnižší a v každém případě pod příslušnými

úrovněmi (zde očekáváme pouze stochastické účinky záření, tj. účinek se projeví s určitou pravděpodobností úměrnou výši ozáření), ve druhém případě se vysoké dávky mohou projevit na zdraví ozářené osoby, přičemž s velikostí dávky roste závažnost zdravotní újmy (např. při nízkých dávkách dochází ke zrudnutí nebo popálení kůže, zatímco extrémně vysoké dávky způsobí smrt ozářené osoby).

Literatura

- SABOL, Jozef a Bedřich ŠESTÁK. *Radiation protection quantities for the quantification of stochastic effects*. The 14th International Congress of the International Radiation Protection Association, Cape Town, South Africa, 9-13 May 2016.
- The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2–4), 2007.
- The Annex D - Health effects due to radiation from the Chernobyl accident*, UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly, Annex D, *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, 2008.
- MALÁTOVÁ, Irena. *Černobyl - co je nového po 30 letech*. Seminář SÚRO (Státní ústav radiační ochrany), 11. 3. 2016.
- WAGNER, Vladimír. *Fukušima - 5 let poté*. Seminář, Energetická komise AV ČR, 11. 3. 2016.
- TETSUJI, I., GOHEI, H., SATORU, E. *Comparison of the accident process, radioactivity release and ground contamination between Chernobyl and Fukushima*, *Journal of Radiation Research*, Vol. 56, Issue suppl 1, pp. i56-161.
- STEINHAUSLER, G. *Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts*. *Science of the Total Environment*, Vol. 470–471, 1 February 2014, pp. 800–817.
- Developments since the 2013 UNSCEAR Report on the levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident following the great East-Japan earthquake and tsunami*, UNSCEAR 2016 Report to the General Assembly, *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, United Nations, 2016.

RESUMÉ

V článku je stručně charakterizována oblast využívání jaderné energie na výrobu elektrické energie. I když současné moderní jaderné elektrárny jsou velmi bezpečné, nikdy není možné absolutně vyloučit možnost nehody nebo i havárie. Práce se zaměřuje na popis dvou největších nehod, k nimž došlo v Černobyli na Ukrajině a ve Fukušimě v Japonsku. Poučení z těchto havárií vedlo ke zpřísnění bezpečnostních opatření na jaderných elektrárnách, a to nejenom z hlediska konstrukce a bezpečnostních systémů, ale i rozpracováním důslednějších a účinnějších postupů při řešení důsledků takových potenciálních jaderných mimořádných situací, kde hlavním cílem je minimalizace jejich vlivu na ozáření osob a na radioaktivní kontaminaci životního prostředí.

Klíčová slova: jaderná elektrárna, jaderná havárie, Černobyl, Fukušima, ozáření osob, radioaktivní kontaminace.

S U M M A R Y

SABOL, Jozef, ŠESTÁK, Bedřich: CONSEQUENCES OF THE LARGEST NUCLEAR ACCIDENTS: CHERNOBYL VS. FUKUSHIMA

This article briefly characterizes the area of use of nuclear energy for electricity production. Although current modern nuclear power plants are very safe, it is never possible to completely exclude the possibility of an incident or accident. The paper pays attention to description of the two major accidents that occurred at Chernobyl in Ukraine and at Fukushima in Japan. Lessons learned from these accidents led to the strengthening of security measures at nuclear power plants, not only in terms of construction and safety systems, but also by developing consistent and efficient measures in dealing with the consequences of any potential nuclear emergencies, where the main objective is to minimize their impact on the exposure of people and environmental radioactive contamination.

Keywords: nuclear power plant, nuclear accident, Chernobyl, Fukushima, exposure of people to radiation, radio-active contamination.

