

SELHÁNÍ A ZNEUŽITÍ RADIOLOGICKÝCH A JADERNÝCH MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ

Dana PROCHÁZKOVÁ - Zdenko PROCHÁZKA - Jan PROCHÁZKA

FAILURE AND ABUSE OF RADIOLOGICAL AND NUCLEAR MATERIALS AND TECHNOLOGIES



Sustainability - Environment - Safety '2016

ABSTRAKT

PRÁCE OBSAHUJE VÝSLEDKY STUDIA JADERNÝCH ÚTOKŮ, JADERNÝCH TESTŮ, NEHOD A HAVÁRIÍ SPOJENÝCH S JADERNÝMI MATERIÁLY. JEJICH ŠETŘENÍ JE PROVÁDĚNO Z DŮVODU VÝZKUMU PODMÍNEK PRO ZAJIŠTĚNÍ BEZPEČNOSTI KRITICKÉ INFRASTRUKTURY, JELIKOŽ JADERNÁ ZAŘÍZENÍ PATŘÍ MEZI JEJÍ KRITICKÉ OBJEKTY. DOPADY NA LIDI A DALŠÍ VEŘEJNÁ AKTIVA PŮSOBÍ JAK ÚMYSLNÉ ZNEUŽITÍ RADIOLOGICKÝCH I JADERNÝCH MATERIÁLŮ, TAK PROVOZ ZAŘÍZENÍ POUŽÍVAJÍCÍCH RADIOLOGICKÉ A JADERNÉ MATERIÁLY. Z KRITICKÉHO HODNOCENÍ PŘÍČIN NARUŠENÍ ŽIVOTNÍCH PODMÍNEK LIDÍ VYPLÝVÁ VELKÁ ROLE LIDSKÉHO FAKTORU; KDYŽ NEJDE O ÚMYSL, VĚTŠINOU JDE O: ORGANIZAČNÍ HAVÁRIE, TJ. ŠPATNÁ KULTURA BEZPEČNOSTI; CHYBNÉ LIDSKÉ ÚKONY; NEBO NEDOSTATEČNÉ ZNALOSTI.

KLÍČOVÁ SLOVA: jaderná zařízení; jaderné testy; jaderné útoky; nehody; havárie; rizika; dopady; bezpečnost

ABSTRACT

THE WORK CONTAINS THE RESULTS OF STUDY OF NUCLEAR ATTACKS, NUCLEAR TESTS, INCIDENTS AND ACCIDENTS CONNECTED WITH NUCLEAR MATERIALS. THEIR INVESTIGATION IS PERFORMED FROM THE REASON OF RESEARCH OF CONDITIONS FOR ENSURING THE SAFETY OF CRITICAL INFRASTRUCTURE, SINCE NUCLEAR FACILITIES BELONG AMONG ITS CRITICAL FACILITIES. IMPACTS ON HUMANS AND OTHER PUBLIC ASSETS CAUSE BOTH, THE INTENT ABUSE THE RADIOLOGICAL AND NUCLEAR MATERIALS AND THE OPERATION OF FACILITIES USING THE RADIOLOGICAL AND NUCLEAR MATERIALS. FROM THE CRITICAL ASSESSMENT OF CAUSES DISTURBING THE HUMAN LIVING CONDITIONS IT FOLLOWS THE BIG ROLE OF HUMAN FACTOR; IF THE INTENT DOES NOT GO ON, MOSTLY IT GOES ON: ORGANIZING ACCIDENT, I.E. THE BAD SAFETY CULTURE; WRONG HUMAN OPERATION; OR INSUFFICIENT KNOWLEDGE.

KEY WORDS: nuclear facilities; nuclear tests; nuclear attacks; incidents; accidents; risks; impacts; safety

1. Úvod

Jaderné materiály a jaderná zařízení patří v současné době mezi velmi sledované. Jaderné elektrárny i další jaderná zařízení v současné době patří mezi kritické objekty, jež jsou sledovány v souvislosti se zajišťováním bezpečnosti nadnárodních uskupení a států v souvislosti s ochranou kritických infrastruktur. Proto v rámci výzkumu musíme také věnovat pozornost jaderné oblasti a jaderným zařízením. Cílem předložené práce není ani pozastavit používání jaderných materiálů, ani zakázat používání technologií; jde v ní o objektivní vyhodnocení faktů, ze kterých se lze poučit a na jejich základě pak zlepšit nakládání s jadernými materiály a postupy spojené s jadernými technologiemi.

Je pravdou, že od svržení bomb na Hiroshimu a Nagasaki má lidstvo velké obavy z jevů, při kterých dochází k uvolnění radioaktivního záření, explozi a k uvolnění velkého množství tepla. Obavy lidstva posílily jak dopady jaderných testů, tak dopady havárií civilních jaderných zařízení, které pomáhají naplňovat potřeby lidí a

zajišťovat jim kvalitní život.

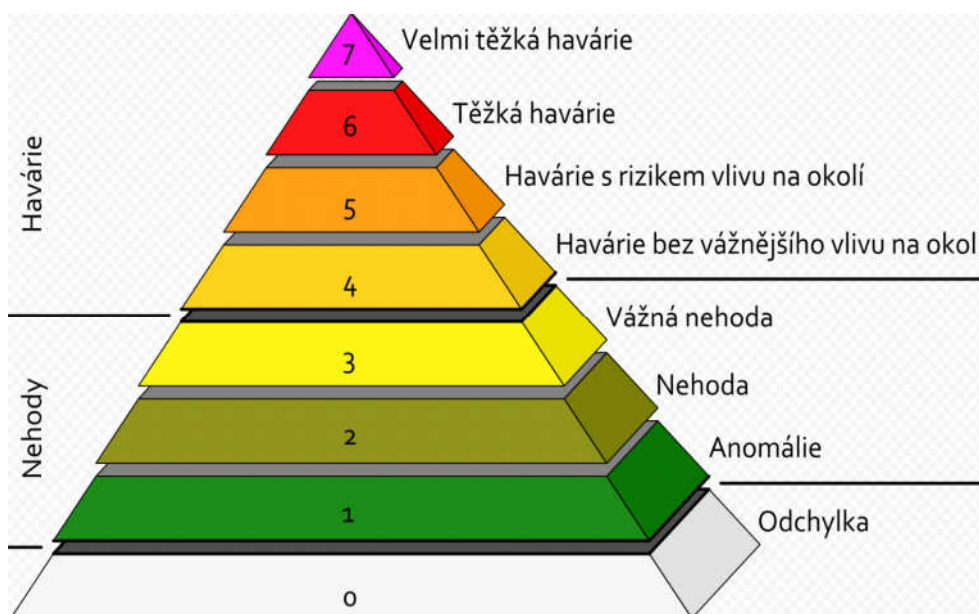
Jelikož jaderná zařízení jsou významnými prvky energetické a výrobní infrastruktury, jsou potřebná, a proto je nutné zajistit jejich bezpečnost. Prvním krokem je poučit se z minulých havárií, pochopit rizika a jejich dopady v souvislostech. Na základě poznání je pak možné udělat kvalifikovaná opatření pro bezpečnost a ochranu občanů, veřejných aktiv, samotných jaderných zařízení a vůbec celého státu.

Jelikož platí, že když chceme získat relevantní poznatky o předmětné oblasti, tak musíme vycházet z teoretických znalostí a experimentálních údajů a zkušeností, tak jsme v rámci výzkumu zaměřeného na bezpečnost energetické infrastruktury soustředili pozornost na jaderná zařízení. Proto jsme sestavili na základě dostupných údajů databázi, která obsahuje jak souhrn jaderných havárií, jejich příčin a dopadů, tak souhrn vojenských jaderných útoků a testů a jejich dopadů [1].

Předložená práce uvádí jak údaje o vybraných jevech, jejichž vyhodnocení přineslo nové poznatky, tak vybrané závěry především z pohledu bezpečnosti složitých technologických celků, mezi něž jaderná zařízení bezesporu patří.

2. Velikost jaderných událostí - mezinárodní stupnice

Mezinárodní stupnice jaderných událostí (The International Nuclear Event Scale – INES) je osmistupňová stupnice, zavedená Mezinárodní agenturou pro atomovou energii v roce 1990 pro posuzování poruch a havárií jaderných zařízení. Stupně 7 až 4 se označují jako havárie, 3 až 1 jako nehody, 0 nemá bezpečnostní význam, obrázek 1.



Obr. 1 - Stupnice INES [2].

Stupeň 7 - Velmi těžká havárie - Major accident, největší možná havárie se vyznačuje:

- únikem velkého množství radioaktivních materiálů z jaderného zařízení (například z aktivní zóny energetického reaktoru) do okolí, obsahující směs radioaktivních štěpných produktů s dlouhými i krátkými poločasy rozpadu (s aktivitou přesahující 10^4 TBq ^{131}I nebo jiných podobně biologicky významných radionuklidů),
- možností akutních zdravotních účinků; zpožděných zdravotních účinků v rozsáhlé oblasti s možností zasažení více než jednoho státu,
- dlouhodobými důsledky pro životní prostředí.

Příklady: exploze čtvrtého bloku jaderné elektrárny Černobyl, Kyjevská oblast, Ukrajina, 26. dubna 1986; a exploze prvního, druhého a třetího bloku jaderné elektrárny Fukushima I, Prefektura Fukushima, Japonsko, 11. března 2011.

Stupeň 6 - Těžká havárie - Serious accident se vyznačuje:

- únikem radioaktivních materiálů do okolí (s řádovou aktivitou 10^3 až 10^4 TBq ^{131}I nebo jiných podobně biologicky významných radionuklidů),
- potřebou uplatnit opatření pro snížení pravděpodobnosti zdravotních následků na obyvatelstvo zahrnutých v místních nouzových plánech.

Příklady: provozní havárie v závodě na přepracování vyhořelého paliva v závodě Majak na Urale v Čeljabinské oblasti, Ruská Federace 29. září 1957.

Stupeň 5 - Havárie s nebezpečím pro okolí - Accident with off-site risk se vyznačuje:

- únikem radioaktivních materiálů do okolí (s aktivitou stovek až tisíců TBq ^{131}I nebo jiných podobně biologicky významných radionuklidů),
- potřebou částečného uplatnění opatření pro snížení pravděpodobnosti výskytu zdravotních následků na obyvatelstvo, zahrnutých v místních havarijních plánech (např. evakuace, ukrytí),
- těžkým poškozením jaderného zařízení. Může zahrnovat těžké poškození velké části aktivní zóny energetického reaktoru, velkou havárii s vysokou kritičností, nebo velký požár či explozi uvolňující značné množství radioaktivity uvnitř zařízení.

Příklady: havárie ve vojenském zařízení Windscale Pile, Anglie, Spojené království, 10. října 1957; porucha druhého bloku jaderné elektrárny Three Mile Island, Pensylvánie, USA, 28. března 1979.

Stupeň 4 - Havárie bez vážnějšího vlivu na okolí - Accident without off-site risk se vyznačuje:

- únikem radioaktivních materiálů do okolí s následkem vysoké dávky pro nejvíc zasaženou skupinu obyvatel v řádu několika mSv (tj. na hranici limitů pro obyvatelstvo),
- malou potřeou aplikovat havarijní opatření na ochranu obyvatelstva, s výjimkou místní kontroly potravin,
- významným poškozením zařízení (např. částečné tavení aktivní zóny v energetickém jaderném reaktoru a srovnatelné události v zařízeních bez reaktoru),
- ozáření jednoho nebo více zaměstnanců (řádově až jednotky Sv), s vysokou pravděpodobností rychlého úmrtí.

Příklady: havárie v jaderné elektrárně Saint Laurent, region Centre-Val de Loire, Francie, 17. října 1969; havárie v přepracovatelském závodě Sellafield, Anglie, Spojené království, 1973; havárie na prvním bloku jaderné elektrárny Jaslovské Bohunice, okres Trnava, Slovensko, 22. února 1977; havárie v jaderné elektrárně Saint Laurent, region Centre-Val de Loire, Francie, 13. března 1980; havárie při spouštění jaderného zařízení v Buenos Aires, Argentina, 1983.

Stupeň 3 - Vážná nehoda - Serious incident se vyznačuje:

- únikem radioaktivních materiálů do okolí nad povolené limity, s následkem dávky pro nejvíc zasaženou skupinu obyvatel v řádu desetin mSv (tj. zlomky limitů pro obyvatelstvo),
- nepotřebou opatření na ochranu obyvatelstva,
- důsledkem těžkého rozšíření kontaminace (několika tisíc TBq aktivity) uvnitř zařízení, způsobená selháním zařízení nebo provozní poruchou,
- ozáření zaměstnanců, které by mohlo způsobit akutní zdravotní následky,
- poruchou bezpečnostních systémů, která by mohla vést k havarijním podmínkám nebo k situaci, ve které by nebyly bezpečnostní systémy schopné „zabránit havárii, pokud by nastaly určité iniciační události“.

Příklad: havárie prvního bloku jaderné elektrárny Vandellòs, Katalánsko, Španělsko, 19. října 1989; havárie prvního, druhého a čtvrtého bloku jaderné elektrárny Fukushima II, Prefektura Fukushima, Japonsko, 12. března – 15. března 2011 havárie čtvrtého bloku jaderné elektrárny Fukushima I, Prefektura Fukushima, Japonsko, 15. března 2011.

Stupeň 2 – Nehoda - Incident se vyznačuje:

- technickou poruchou nebo odchylkou s významným selháním bezpečnostních opatření, ale se zbývající dostatečnou hloubkovou ochranou k vypořádání se s dodatečnými poruchami. Zahrnuje i události, které by byly klasifikovány stupněm 1, ale při kterých se odhalily významné organizační nedostatky nebo nedostatky v kultuře bezpečnosti,
- ozáření pracovníka překračující povolený roční limit nebo událost, která vede k přítomnosti významných množství radioaktivity uvnitř zařízení v prostorách, kde to projekt nepředpokládal, a které vyžadují opatření k nápravě.

Příklad: jaderná elektrárna Mihama, Prefektura Fukui, Japonsko, 2. září 1991.

Stupeň 1 – Anomálie - Anomaly se vyznačuje technickou poruchou nebo odchylkou od schváleného režimu, ale se zbývající významnou hloubkovou ochranou. Může k ní dojít v důsledku poruchy zařízení, lidské chyby nebo neexistence provozních postupů, a může nastat v jakékoliv oblasti, kterou stupnice pokrývá, například provoz jaderné elektrárny, transport radioaktivního materiálu, manipulace s jaderným palivem a skladování odpadů

Stupeň 0 – Odchylka - Deviation, no safety relevance se vyznačuje odchylkami, při kterých nejsou porušeny limity a podmínky (= LaP) provozu, a které jsou bezpečně zvládnuty v souladu s příslušnými postupy. Mezi příklady patří: jednoduchá náhodná porucha v redundantním (zdvojeném) systému, odhalená v průběhu periodických kontrol nebo zkoušek, plánované rychlé odstavení reaktoru, které probíhá normálně, neúmyslná aktivace bezpečnostních systémů, bez významných následků, úniky v rámci LaP, menší rozšíření kontaminace uvnitř kontrolovaného pásma bez širších důsledků pro kulturu bezpečnosti.

3. Data použitá pro výzkum

Jelikož jaderná zařízení patří do složitých kritických objektů, které náleží do základních kritických infrastruktur (výroba elektrické energie, výroba produktů pro průmysl, zdravotnictví, potravinářství apod.) je třeba se zabývat jejich bezpečností. Nejprve je však třeba poznat jak jejich technologie, tak dopady jejich selhání. Proto byla sestavena databáze dopadů radiačních a jaderných havárií, útoků s použitím jaderných materiálů a jaderných testů [1]; vybrané události jsou charakterizovány v práci [3]. Dále uvedeme jen několik příkladů:

Hiroshima (Japonsko, 6. 8. 1945)

Hirošima, přístav a průmyslové centrum Japonska se staly prvním terčem jaderné zbraně; USA, těsně před koncem 2. světové války, dne 6. srpna 1945 v 8h 15m svrhly na město atomovou bombu.

Nagasaki (Japonsko, 9. 8. 1945)

Nagasaki bylo druhým a do dnešních dnů posledním městem na světě, které zažilo jaderný útok. V 03:49 ráno 9. srpna 1945 letadlo USA Bockscar svrhlo bombu "Fat Man" na Nagasaki. Průmyslové škody v Nagasaki byly vysoké, takže 68-80 % průmyslové výroby bylo zničeno. Bomba byla o něco silnější než "Little Boy" nad Hirošimou, ale protože Nagasaki leží ve více nerovném terénu, tak poškození bylo menší.

Operace Crossroads (Maršalovy ostrovy, USA, 1. 7. a 25. 7. 1946)

Operace na atolu Bikini byly prvními testy nukleárních zbraní od testu Trinity v červenci 1945 a prvním výbuchem jaderných zařízení od svržení atomové bomby na Nagasaki 9. srpna 1945. Účelem bylo zjištění účinků jaderných zbraní na válečné lodě. V prostoru výbuchu bylo soustředěno pět bitevních lodí, čtyři křižníky, dvě letadlové lodě, 12 torpédoborců, osm ponorek, obchodní a výsadkové lodě. Obrázek 2 ukazuje oblak ve tvaru houby a vodní sloupec z podvodního jaderného výbuchu Baker ze dne 25. července 1946; fotografie byla pořízena z věže na Bikini ostrově ze vzdálenosti 3,5 míle (5,6 km) [3].



Obr. 2 - Oblak ve tvaru houby a vodní sloupec z podvodního jaderného výbuchu Baker ze dne 25. července 1946

Znečištění jezera Karačaj (SSSR, 1957)

Jezero Karačaj, které se nachází na jižním Uralu ve východním Rusku, bylo smetištěm (odpadištěm) pro jaderná zařízení Sovětského svazu. Bylo to způsobeno řetězcem nehod a havárií jaderných zařízení z přilehlých oblastí, s vysoce kontaminovaným radioaktivním odpadem. V jeho okolí leží jedna z nejvýznamnějších ruských továren na jaderné zbraně Majak (Majak), která byla postavena koncem roku 1940 72 km severovýchodně od Čeljabinsku. Odhaduje se, že se sediment na dně jezera skládá téměř výhradně z vysoce radioaktivního odpadu do hloubky zhruba 11 stop (3,4 m). Obyvatelé prokazatelně trpí důsledky ozáření [5].

Operation Plumbbob (Nevada, USA, 28. 5. – 7. 10. 1957)

Operace Plumbbob byla série jaderných testů, které probíhaly od 28. května do 7. října 1957 na Nevada Test Site, po Projektu 57 a předcházející Projektu 58/58A [6]. Byly to největší, nejdelší a nejkontroverznější ověřovací série v USA [6]. Operace se skládala z 29 výbuchů. Do akce bylo zapojeno dvacet jedna laboratoří. Testů se zúčastnilo přibližně 18 000 členy US Air Force, armády a námořnictva. Armádu zajímalo, jak by se průměrný voják – pěšák odolával fyzicky a psychicky nástrahám taktického jaderného boje. Bio-lékařským experimentům bylo podrobeno téměř 1200 prasat [6].

Santa Susana Field Laboratory (Kalifornie, USA, 1959)

Santa Susana Field Laboratory (SSFL) je komplex průmyslového výzkumu a vývoje umístěný na 1.080 ha v části jihokaliifornských Simi Hills v Simi Valley [7]. Byl používán hlavně pro vývoj a testování raketových motorů na kapalné palivo pro vesmírný program Spojených států od roku 1949 do roku 2006, jaderných reaktorů od roku 1953 do roku 1980 a výzkumu tekutých kovů od roku 1966 do roku 1998. Místo se nachází asi 7 mil (11 km) severozápadně od obce Canoga Park a asi 30 mil (48 km) severozápadně od centra města Los Angeles.

Energy Technology Engineering Center (ETEC) bylo umístěno v prostoru IV Santa Susana Field Laboratory. Specializovalo se na ne-nukleární testování komponentů pro přenos tepla z jaderného reaktoru pomocí tekutých kovů, místo vody nebo plynu. Reaktory, které se zde nacházejí, byly považovány za experimentální, a tudíž neměly žádné zadržovací (ochranné) konstrukce. Reaktory a vysoce radioaktivní komponenty byly umístěny bez velkých betonových kopulí, které obklopují moderní jaderné reaktory [7].

Sodíkový experimentální reaktor (Sodium Reaktor Experiment-SRE) byl experimentální jaderný reaktor, který byl v provozu od roku 1957 do roku 1964. Když byl 12. července 1957 uveden do provozu, tak byl prvním jaderným reaktorem, který dodával elektrickou energii do komerční elektrické sítě napájením blízkého města Moorpark. V červenci 1959 došlo k částečnému roztavení jádra reaktoru. Reaktor byl opraven a znovu uveden

do provozu v roce 1960. Naposled byl v provozu v roce 1964. Reaktor a podpůrné systémy byly odstraněny v roce 1981 a budova zbourána v roce 1999 [7].

Dle [17] nejméně čtyři z deseti jaderných reaktorů měly nehodu:

- V březnu 1959 došlo u experimentálního reaktoru AE6 k uvolňování štěpných plynů.
- V červenci 1959 došlo k částečnému nukleárnímu roztavení jádra, které je považováno za "nejhorší v historii USA", s uvolněním nezveřejněného množství radioaktivity, ale předpokládá se, že mnohem více než v katastrofě Three Mile Island v roce 1979. Další radioaktivní požár v roce 1971, zahrnoval hořlavé chladicí medium (NaK) kontaminované směsí produktů štěpení.
- V roce 1964 u SNAP8ER došlo k poškození 80% jeho paliva.
- V roce 1969 SNAP8DR zažil podobnou škodu na jedné třetině paliva.

SRE byl navržen a konstruován tak, aby bylo možné získat zkušenosti s používáním uranu v reaktoru k výrobě elektřiny. Palivové články byly provozovány za nevyzkoušených podmínek. Limity byly založeny na teoretických limitech bez operačních zkušeností. Obkladové materiály byly rovněž testovány s minimálními nebo žádnými zkušenostmi [7].

Během provozu SRE bylo provedeno několik testovacích cyklů (známé jako "run") k opravě a modifikaci systému. Během cyklu tři se SRE stal první jaderný reaktor ve Spojených státech s výrobou energie pro komerční elektrickou síť. Při cyklu osm byl na palivových článcích zaznamenán černý zbytek (o kterém se předpokládalo, že se rozloží při praní tetralinem). Tyto palivové články byly myty v prací buňce a vráceny do reaktoru. Reaktor byl vrácen do provozu pro zkoušky při vysokých teplotách. Během několika dalších cyklů došlo k několika anomálním teplotním hodnotám, při kterých se operátoři pokusili pochopit chování a příčiny. Na konci cyklu 13, bylo zřejmé, že došlo k něčemu, co narušilo přenos tepla v systému. Bylo rozhodnuto, že příčinou potíží byl únik tetralinu. SRE byl propláchnut plyným dusíkem, aby se odstranilo znečištění. Po cyklu 13, byl proveden pokus omýt palivové články. Během operace došlo k silnému výbuchu. Předpokládá se, že s tetralinem související produkty rozkladu způsobily zachycení podstatného množství sodíku na palivových tyčích tak, že zablokovaly odváděcí otvory. Nedošlo k žádnému zranění nebo úmrtí. Kvůli explozi již nebylo prováděno žádné další promývání. Měření uvnitř budovy reaktoru indikovalo extrémně vysokou úroveň radioaktivity v celé budově. Během několika dnů se radioaktivita snížila na normální úroveň, s výjimkou oblasti bezprostředně kolem mytí článků. Poslední cyklus 14 proběhl mezi 12. a 26. červencem roku 1959. Krátce po restartování reaktoru vykázaly dozimetry prudký nárůst radioaktivity uvnitř reaktorové budovy. Reaktor zůstal v provozu a byly dělány pokusy určit, odkud radioaktivita pochází. Radioaktivita se pak vrátila do normálu. Dne 13. července reaktor zažil řadu teplotních a radiačních výkyvů, kdy šlo o nečekané odchylky od předpokládaných podmínek. Hladina energie vzrostla z asi 4 MW až na asi 14 MW (70 % plného výkonu) po dobu asi dvou minut. Ukázalo se, že je nefunkční automatický ovládací spínač a reaktor byl odstaven. Přepínač byl opraven a reaktor byl pomalu restartován. Následující den monitory opět indikovaly zvýšenou úroveň radioaktivity v ovzduší uvnitř reaktorové budovy. Původ byl vypátrán a radioaktivita se opět snížila. Reaktor byl opět restartován, ale obsluha zaznamenala v příštích několika dnech neobvyklé chování. Výkon reaktoru se zvyšoval rychleji, než bylo očekáváno a byl neobvykle vysoký teplotní rozdíl mezi dnem reaktoru se vstupem sodíku a horní částí reaktoru s výstupem sodíku. Radioaktivita uvnitř reaktoru se rovněž zvýšila. Obsluha provedla několik pokusů tomu porozumět a upravit chování reaktoru. Dne 23. července, bylo rozhodnuto reaktor vypnout kvůli vysoké teplotě paliva a nepřijatelnému rozdílu teplot mezi dnem a horní částí reaktoru. 26. července byl reaktor vypnut a bylo zaznamenáno první poškození palivových článků [7].

V důsledku nehody, byly provedeny změny v SRE. Tetralin byl odstraněn, sodíkový systém byl upraven, čisticí proces mytí článků používá páru místo vody, byla zlepšena instrumentace a byla změněna geometrie palivových prvků. V září 1960 po obnovení a vyčištění začal SRE fungovat s novým jádrem reaktoru. Do doby nehody v červenci 1959 byl SRE provozován 10 344 hod., poté, co byly provedeny opravy s novým jádrem, byl SRE provozován po dobu dalších 26 716 hodin.

Ponorka K-19 (SSSR, 4. 7. 1961)

K-19 byla jednou z prvních dvou sovětských ponorek třídy 658, první generace jaderných ponorek vybavených jadernými balistickými střelami [8]. Loď byla postavena ve spěchu ve snaze dohnat USA v jaderných ponorkách. Před tím, než byla spuštěna, zemřelo v důsledku nehod a požárů 10 civilních pracovníků a námořník [8]. Dne 4. července 1961 prováděla ponorka cvičení v Severním Atlantiku v blízkosti jižního Grónska, když došlo k úplné ztrátě chladiva v chladicím systému reaktoru. Teplota v reaktoru nekontrolovaně rostla a reaktor neobsahoval záložní chladicí systém. Kapitán vydal drastické rozhodnutí a nařídil inženýrské sekci posádky vyrobit nový chladicí systém z odvzdušňovacího ventilu, aby se zabránilo jadernému zhroucení. To vyžadovalo pracovat po delší dobu při vysoké radiaci. S obětováním vlastních životů posádka sestrojila sekundární chladicí

system a udržela reaktor před zhroutilím. Všech sedm členů inženýrské sekce a jejich divizní důstojník zemřeli na ozáření během příštího měsíce [8]. Patnáct členů posádky zemřelo na nemoc z ozáření v průběhu následujících dvou let. Z obavy z možné vzpoury bylo nařízeno všechny ruční palné zbraně naházet do moře, pouze pět pistolí bylo distribuováno mezi nejvěrnější důstojníky. Ponorka zažila několik dalších nehod, včetně dvou požárů a srážky [8]. Řada nehod inspirovala členy posádky dát ponorce přezdívku Hirošima. Byla vyražena z provozu v roce 1990 [8].

Saint Laurent (Francie, 17. 10. 1969)

Jaderná elektrárna Saint Laurent se nachází v obci Saint-Laurent-Nouan, v regionu Centre-Val de Loire 28 km po proudu od města Blois a 30 km proti proudu od Orléans, má dva tzv. integrované reaktory kanálového typu s grafitovým blokem v tlustostěnné betonové nádobě z předpjatého betonu, které byly uvedeny do provozu v roce 1969 a 1971 (ukončení provozu v dubnu 1990 a v červnu 1992). Jsou chlazeny vodou z řeky Loiry. 3 200 palivových kanálů v každém z nich plní a vyměňuje dálkově ovládaný manipulátor na víku betonového bloku. Pětice kratších článků v každém kanálu se po odšroubování ocelového víka mění za plného výkonu bloku 450 MWe [9].

Při noční směně 17. 10. 1969 vložil operátor do snímáče manipulátoru děrnou pásku s programem automatické výměny několika článků. Spuštěný manipulátor se po chvíli zastavil a signalizoval, že adresovaný box čerstvých článků je prázdný. Operátor v rozporu s předpisy automatiku vyřadil a ručně navedl stroj k jiné přihrádce, v níž však místo článků ležely grafitové zátky [9]. Po jejich vložení se v kanálu zastavil průtok vody a zbývající články (asi 50 kg) se roztavily. Jakmile z nich uvolněné štěpné produkty kontaminovaly vody primárního okruhu, automatika reaktor odstavila a vyhlásila poplach. Zbavit reaktor taveniny a kontaminace trvalo více než rok a vyžádalo si mimořádné úsilí [9]. Ze závěrů komise EdF vyplynulo, že do programu se sice vloudila chyba, avšak operátor v několika bodech porušil předpisy, a byl proto potrestán třemi roky vězení. Podobná nehoda se opakovala v roce 1980 i na sousedním reaktoru. V obou případech vznikla značná škoda na zařízení i výpadku výkonu po dobu víc než jednoho roku, nikdo však neutrpěl zranění a mimo elektrárnu neunikla radioaktivita [9].

Nyní elektrárna má v provozu dva tlakovodní reaktory (každý 900MWe) na kterých byl zahájen provoz v roce 1983. Dne 12. ledna 1987 v 9:30, vzhledem k výjimečným mrazům na Loiře, ledy ucpaly přívod vody z centrálního A1 (GCR), což vedlo ke ztrátě normálního chlazení. Došlo k automatickému vypnutí plyn-grafitového reaktoru. Chladicí systém potřebný k odstranění zbytkové energie selhal, protože dieslové generátory se nepodařilo spustit. Generátory se podařilo vrátit do provozu těsně před zhroutilím energetické sítě. Poté byla povolána armáda, aby výbušninami odstranila ledy, které blokovaly přívody vody [9].

Dne 12. května 2004 při zkoušce těsnosti nových parních generátorů jednoho z reaktorů u B závodu unikl do atmosféry radioaktivní sodík. Nehoda, která vyústila v automatické odstavení reaktoru, byla podle Francouzského jaderného dozoru bezvýznamná pro životní prostředí [9]. Dne 19. srpna 2011 byl jeden reaktor po poruše zastaven [9].

Sellafield (Anglie, Velká Británie, 26. 9. 1973)

Sellafield (původně zvaný Windscale) je vesnice na severozápadu Anglie v hrabství Cumbria, kde sídlí hlavní jaderné středisko v Anglii. Zahrnuje několik továren na přepracování jaderného paliva, už odstavenou jadernou elektrárnu Calder Hall a několik reaktorů a továren civilního i vojenského zaměření. Sellafield je provozován skupinou British Nuclear Group (větev British Nuclear Fuels). Komplex Windscale/Sellafield je označován jako nejradioaktivnější místo v západní Evropě. Dne 26. 9. 1973 došlo k nehodě v přepracovacím závodě B-204, kdy bylo 35 zaměstnanců kontaminováno rutheniem-106. Provoz byl poté zavřen z důvodu oprav a úprav, ale nikdy již nebyl znovu otevřen [10].

Three Mile Island (Pennsylvánie, USA, 28. 3. 1979)

Ostrov Three Mile Island leží uprostřed řeky Susquehanna přibližně 16 km od Harrisburgu, hlavního města státu Pennsylvánie v USA. Na ostrově stojí jaderná elektrárna se dvěma tlakovodními reaktory o výkonu 1000 MW (tj. temelínského typu). Na druhém bloku TMI-2 došlo v roce 1979 k velké havárii [11]. V období nehody byl druhý blok elektrárny v provozu méně než tři měsíce. I během takto krátké doby zde došlo k několika závadám. Ale provozovatel elektrárny, společnost MetEd, spěchal - tím, že spustil reaktor již 30. prosince 1978, ušetřil na daních 100 milionů dolarů.

Havárie začala poměrně nevinně ve středu 28. března 1979 ve 4:00 ráno. Vypovědělo službu čerpadlo sekundárního potrubí a turbína, napojená na potrubí se automaticky odpojila. Ačkoliv již nevyráběl elektřinu, pracoval reaktor dál na plný výkon, což vedlo k růstu teploty a tlaku v hlavním chladicím potrubí a k

automatickému spustění dalších kontrolních mechanismů. Nejprve se otevřel přetlakový pojistný ventil, aby snížil narůstající tlak v potrubí (asi tak jako tryska na Papinově hrnci), a poté se reaktor zastavil [11].

Ani jedna z těchto událostí nebyla neobvyklá, došlo k nim již několikrát. Tentokrát se však situace vyvíjela jinak. Jenže pojistný ventil se zablokoval v otevřené poloze. Tlak v potrubí proto stále klesal, zatímco nádrž, do které ústil, brzy přetekla. Radioaktivní voda zaplavila prostor kolem reaktoru. Proto na řídicím pultu zazněly poplašné signály. Obsluha reaktoru věděla, že nastal problém, ale neznala jeho příčinu - kontrolka ukazovala, že se pojistný ventil normálně zavřel. Současně selhala náhradní čerpadla, která měla začít chladit reaktor. Byla totiž mimo provoz kvůli v té době probíhající údržbě. Indikátory toho, že čerpadla nefungují, byly náhodou zakryty pohozenými papíry, takže ani tohoto varovného signálu si obsluha nevšimla. Tlak chladicí vody v reaktoru rychle klesal a nastávaly problémy. Reaktor, i když byl již zastaven, totiž ještě stále setrvačností vyráběl asi 6 % tepelného výkonu, který bylo potřeba odvádět a reaktor chladit [11].

Naštěstí se spustila havarijní čerpadla, která do reaktoru začala pumpovat hektolitry chladicí vody. Opět však zasáhl člověk: pracovníci obsluhy špatně pochopili situaci a jedno z havarijních čerpadel ručně zastavili. Během několika minut začala voda v reaktoru vřít. Teplota prudce stoupala a začaly prskat palivové tyče. Aniž si to operátoři reaktoru uvědomovali, reaktor se začínal tavit. A od této chvíle unikaly radioaktivní plyny pod tlakem přímo na oblohu nad okolím elektrárny. Rozsah havárie společnost MetEd několik dní tajila [11]. ***Teprve po dvou dnech mohly vládní úřady nařídit evakuaci tisíců těhotných žen a dětí.*** V nastalé panice se tisíce lidí rozhodly oblast opustit ve svých autech. Svá obydlí opustilo dalších 200 000 lidí, kteří nedůvěřovali oficiálním údajům a raději byli opatrní. Této nehodě jen těsně (12 dnů před havárií) předcházela film Čínský syndrom (The China Syndrom) z roku 1979 popisující podobnou nehodu i proto byla veřejnost k událostem v elektrárně tak citlivá. Aby vláda zastavila hromadný útěk obyvatel, přijel 1. dubna 1979 na demonstrativní osobní návštěvu elektrárny tehdejší americký prezident James Carter a pensylvánský guvernér Richard Thornburgh [11].

Následně byla jmenována komise pro vyšetření havárie. Ta označila za bezprostřední příčinu havárie závadu na bezpečnostním ventilu. Zároveň upozornila na pochybení personálu a jeho nedostatečný výcvik ve zvládání mimořádných situací. V té době však již byla největší část uniklé radioaktivity rozptýlena daleko za hranicemi evakuované oblasti. Předpokládá se, že do atmosféry bylo vypuštěno cca 2,5 miliónu curie radioaktivního plynu [11].

Následná vyšetřování prokázala, že společnost MetEd tajila a zkracovala důležité informace o havárii reaktoru a únicích radioaktivity. Během nehody se filtry umístěné na větracích komínech, kterými radioaktivita unikala, ucpaly a přestaly fungovat. Záznamy z měřicích zařízení se podle tvrzení firmy MetEd záhadně „ztratily“! Monitorovací síť nefungovala správně, sběr vzorků proběhl narychlo a chaoticky a velká většina klíčových údajů chybí nebo je nespolehlivá [11].

„Důsledkem tajemní a manipulací je, že dodnes nikdo neví, kolik tehdy uniklo radioaktivních látek,“ říká Dr. Ernest Sternglass, profesor radiologie na Pittsburské univerzitě [11]. „Lidé byli vystaveni mnohem vyšším dávkám, než je oficiálně uváděno,“ říká Dr. Bernd Franke, ředitel Institutu pro výzkum energie a životního prostředí, který prováděl rekonstrukci úniku radioizotopů. „Vyskytovala se místa s lokální vysokou úrovní radiace, která vůbec nebyla odhalena.“ Během týdne po havárii pociťovalo mnoho lidí příznaky ozáření - silná kovová příchuť v ústech, záněty pokožky, pálení a slzení očí, nevolnost, zvracení a průjemy. Někdy potíže vyústily v nevyléčitelné záněty nebo ve zvýšení počtu bílých krvinek. Navzdory jasně doloženým příkladům však oficiální studie konstatují, že únik neměl žádný vliv na okolní prostředí. Některé z těchto oficiálních studií byly kritizovány odborníky, např. Dr. Hutchinsonem, profesorem epidemiologie Harvardské univerzity [11].

Existují však i studie, které škody na zdraví a životním prostředí potvrzovaly. Již roku 1980 vypracoval tajemník Státního oddělení pro zdravotní péči studii, která dokazuje mimořádný výskyt dětí s potížemi se štítnou žlázou. Další studii vypracovala roku 1984 Dr. Aamodtová se svým manželem. Zjistila, že výskyt rakoviny převyšuje celostátní průměr několikanásobně [11].

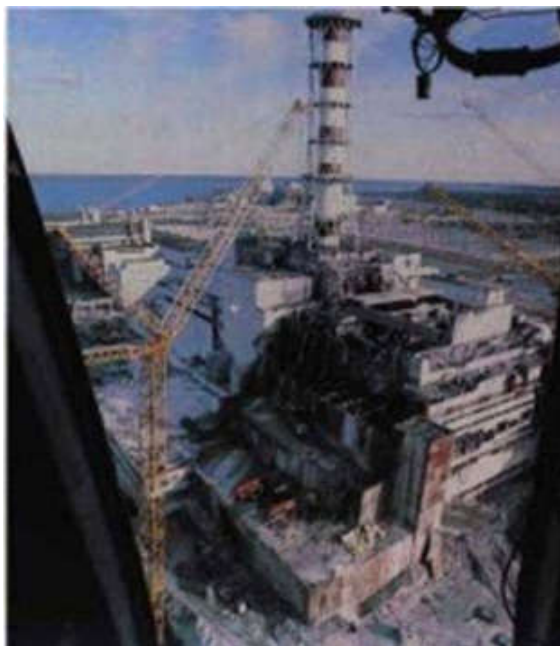
Přestože k úniku radioaktivity došlo, velkou část zachytil ochranný obal reaktoru. Až v roce 1985 pak bylo možné ověřit stav reaktoru uvnitř, když klesla radiace na takovou úroveň, aby to dálkově řízené kamery vydržely. Jeho stav se příliš nelišil od toho, v jakém se nacházel po havárii ten černobylský, u něj však došlo k poškození i ochranného obalu. A teprve až koncem 80. let mohly začít dekontaminační práce v areálu reaktoru, které skončily v roce 1993. První reaktor elektrárny stále pracuje a vyrábí elektřinu, licenci má až do roku 2034 [11].

Podle MAAE, nehoda Three Mile Island byla významným mezníkem v globální rozvoj jaderné energetiky. V letech 1963-1979 se počet rozestavěných reaktorů na celém světě každý rok zvyšuje s výjimkou roku 1971 a 1978. V návaznosti na tuto událost počet reaktorů ve výstavbě v USA klesal každý rok od roku 1980 do roku 1998. Mnoho objednávek na reaktory bylo zrušeno. Celkem 51 US jaderných reaktorů bylo zrušeno od 1980 do 1984 [11].

V době incidentu TMI byla schválena výstavba 129 jaderných elektráren, ale z těch pouze 53 bylo dokončeno. Proces zdlouhavé kontroly ještě více zkomplikovala černobylská katastrofa o sedm let později [11].

Černobyl (SSSR, 26. 4. 1986)

Černobyľská jaderná elektrárna se nachází ve městě Pripjat v Ukrajinské sovětské socialistické republice bývalého Sovětského svazu. Je považována za nejhorší havárii jaderné elektrárny v historii a spolu s havárií jaderné elektrárny Fukushima Daiichi za jednu ze dvou, které jsou klasifikovány nejvyšším stupněm 7 [12]. V Černobyli sehrál významnou úlohu vodík, který je asi nejčastější příčinou nehod. Vodík, souvisí s provozem jaderných zařízení, voda se v nich v důsledku záření rozkládá na kyslík a vodík a nahromaděný vodík způsobuje výbuch. V technických oborech se někdy hovoří o stigmatu vodíku - nehoda vzducholodi Hindenburg, zkáza raketoplánu Challenger. Obrázek 3 ukazuje blok zničený výbuchem.



Obr. 3 – Čtvrtý blok jaderné elektrárny zničený výbuchem.

K havárii v Černobyli došlo 26. dubna roku 1986 v 1 hodinu 23 minut na 4. bloku jaderné elektrárny Černobyl. Těsně po havárii zemřelo 31 osob (zaměstnanců elektrárny nebo hasičů), přes 140 lidí bylo zraněno a více než 100 000 evakuováno. Skutečný rozsah havárie byl zveřejněn až po několika dnech. Od roku 1986 znají slovo Černobyl lidé na celém světě [12].

Vše začalo den před havárií, kdy bylo zahájeno plánované odstavení 4. bloku elektrárny. Před odstavením měl být proveden celkem běžný experiment. Měl ověřit, jestli bude elektrický generátor (poháněný turbínou) po rychlém uzavření přívodu páry do turbíny schopen při svém setrvačném doběhu ještě zhruba 40 vteřin napájet čerpadla havarijního chlazení [12]. Tato elektřina je pro bezpečnost reaktoru životně důležitá: pohání chladicí čerpadla, regulační a havarijní tyče, osvětluje velín i řídicí pult. Plánovaný průběh experimentu zněl: Snížení výkonu na 25-30 % (700-1000 MW tepelných), což je nejnižší výkon, při kterém je povolen provoz tohoto typu reaktoru. Dále odstavení první ze dvou turbín, následné odpojení havarijního chlazení (aby nezačalo působit během testu) a nakonec přerušení přívodu páry [12].

Popis experimentu a havárie je v databázi [1]. Již v okamžiku výbuchu zahynuli dva lidé: jednoho srazila exploze z výšky a druhý uhořel. Mezi první oběti patřili také hasiči, kteří nebyli vybaveni ochrannými pomůckami, respirátory ani obleky. To se týkalo dokonce i jednotek, které sloužily přímo na elektrárně [12]. Osudné bylo také to, že hasiči netušili, co je příčinou ohně, tedy že všude kolem nich hoří vysoce radioaktivní zbytky reaktoru. Hasiči v té době stále ještě zalávali trosky reaktoru vodou. Radioaktivní tavenina ale měla teplotu přes 2000° C, takže voda se při styku s ní rozkládala na vodík a kyslík, které vzápětí explodovaly. Navzdory dobrému úmyslu a vinou neinformovanosti tak hasiči situaci ještě zhoršovali. Během pěti hodin po explozi se podařilo zabránit šíření ohně na další budovy elektrárny, zejména na sousední třetí reaktor [12]. Třetí blok byl odstaven až čtyři hodiny po výbuchu čtvrtého reaktoru! Ještě 16 hodin po výbuchu se sám předseda

komise ÚV KSSS pro jadernou energii divil, kde se vzaly kusy grafitu povalující se po celém areálu elektrárny - domníval se, že jde o materiál pro stavbu 5. a 6. bloku elektrárny, která v té době probíhala. Teprve po mnoha hodinách zjistila armáda šokující skutečnost - že úroveň radiace těchto úlomků je velmi velká. Za pouhých 15 minut byl člověk v blízkosti takového předmětu odsouzen k akutní smrti z ozáření. Vojáci, zejména piloti helikoptér, které na reaktor shazovaly písek, olovo a další materiál, nebyli zpočátku vůbec chráněni proti radiaci. Trvalo tři dny, než armáda svépomocí vybavila helikoptéry alespoň základním stíněním, které chránilo posádku [12].

V jaderné elektrárně bylo v době havárie přes 400 zaměstnanců, tento počet se ještě zvýšil o hasiče. Zahynulo 31 lidí, z toho 28 na následky z ozáření a tři na následky zranění při výbuchu. Akutní nemocí z ozáření různého stupně bylo postiženo 203 lidí. Z okruhu 30 km od elektrárny a dalších silně zamořených oblastí bylo evakuováno 116 000 obyvatel. Prvomájové dny v hlavním městě Ukrajiny Kyjevě (asi 90 km od jaderné elektrárny Černobyl) patřily v jeho historii k nejčistším. Od rána do noci projížděly ulicemi kropící vozy a neúnavně splachovaly z asfaltu prach obsahující radioaktivitu. U všech vchodů do obytných domů, úřadů, obchodů i kostelů ležely vlhké hadry a lidé si o ně dlouze čistili podrážky svých bot. Za lístek na rychlík do Moskvy, který stál 15 rublů, se platilo 100 i více. Reakce odpovědných orgánů na havárii a její důsledky byly v prvních dnech velmi neuspořádané a v některých směrech až trestuhodně nedbalé, zejména pokud jde o podávání objektivních informací. Mnoho lidí v nejvíce zamořených oblastech obdrželo významné dávky (někteří až dvacetkrát více než obdrží během jednoho roku průměrný člověk kdekoli na Zemi, tedy přepočteno na dny to znamená, že někteří byli ozáření během výbuchu 7308 krát více než jiný den). Určení případných pozdějších následků je však složité, avšak platí, že jakýkoliv přírůstek obdržené dávky znamená určité zvýšení pravděpodobnosti vyvolání rakoviny. Úmrtnost se v obci zasažené explozí zvýšila až třikrát. Přes 40 tisíc dětí trpí nemocí štítné žlázy, dvanáctkrát se zvýšila onemocnění anémií, velmi vzrostl výskyt leukémie. Na Ukrajině bylo touto havárií postiženo 1,5 mil. lidí včetně 250 000 dětí, v Bělorusku žije 1,2 mil. lidí na zamořeném území a asi 3,5 mil. osob v oblastech se zamořenou půdou [12].

Příčiny této katastrofy by se daly stručně shrnout takto: Dvě porušení trvale platných předpisů, jedno nedodržení postupu experimentu a úmyslné zrušení tří automatických ochran reaktoru. Dále musíme také jako příčinu uvést špatnou koncepci Černobylského reaktoru RBMK 1000 (je "nestabilní", má kladnou zpětnou vazbu), který se podstatně liší od tlakovodních reaktorů, které jsou nejrozšířenější ve světě a nemůže u nich nekontrolovaně vzrůst výkon tak jako u reaktoru v Černobylu. Mělo by být zdůrazněno, že výbuch reaktoru v Černobylu nebyl výbuch nukleární (jako jaderná bomba), ale šlo o výbuch "klasický". První výbuch způsobil přetlak v uzavřeném prostoru a druhý vodík [12].

Po zkušenostech z Černobylu jsou dnešní jaderné elektrárny jištěny tak, aby jejich bezpečnost na obsluhu vůbec nezávisela. Jednotlivé důležité systémy jsou zdvojené i ztrojené a nedají se vyřadit z činnosti. Dnes se používají reaktory především tlakovodní, které jsou uzavřené do mohutné neprodyšné železobetonové obálky (kontejnment). V kontejnmentu je reaktor s celým primárním okruhem. Kontejnment snese tlak až 0,6 MPa. V případě havárie se vzniklá pára a tlak v kontejnmentu rychle automaticky likviduje mohutnými havarijními studenými vodními sprchami s přísadou bóru tzv. barbotážním systémem (bór pohlcuje neutrony). V kontejnmentu vznikne naopak podtlak, takže nic neuniká ven. A právě ochranný tlakový kontejnment u varného reaktoru v Černobylu chyběl. Nic nemohlo tak poškodit rozvoj jaderné elektroenergetiky, jako právě tato událost. Všechny informační prostředky o katastrofě informovaly, a někdy i neobjektivně, aby vyhověly mimo jiné i tlakům různých zájmových skupin zaměřených proti jaderné energetice, která se začínala stávat velkou konkurencí všech dosavadních zdrojů a způsobů výroby energie [12].

Některé státy (např. Itálie, Španělsko, Švédsko, Rakousko) dočasně pozastavily nebo zpomalily další realizaci svých jaderných programů. Na odstranění následků havárie se podle některých zdrojů mohlo podílet až 600 000 osob, z nichž asi 150 000 potřebuje dnes zvláštní pozornost a péči [12].

Goiânia (Brazílie, 13. 9. 1987)

Ve městě Goiânia, v brazilském státě Goiás, byl z opuštěného nemocničního areálu ukraden starý zdroj radioterapie. Následně s ním manipulovalo mnoho lidí, což mělo za následek čtyři úmrtí. Asi 112 tisíc lidí byly vyšetřeno na radioaktivní kontaminaci a u 249 bylo zjištěno, že mají významnou hladinu radioaktivního materiálu v nebo na svém těle. Z několika míst musela být odstraněna ornice, a několik domů bylo zničeno. Všechny věci uvnitř těchto domů byly odstraněny a vyšetřeny [13].

Časopis Time označil nehodu jako jednu z "nejhorších jaderných katastrof", a Mezinárodní agentura pro atomovou energii jej nazvala "jednou z nejhorších světových radiologických nehod" [13].

Zaragoza (Španělsko, 10. – 20. 12. 1990)

V uvedené době došlo na oddělení radioterapie na klinice v Zaragoze k radiační havárii. Při nehodě bylo zraněno nejméně 27 pacientů a 11 z nich zemřelo. Všichni ze zraněných byli pacienti trpících rakovinou a podstupují radioterapii [14]. Dne 7. prosince 1990 provedl technik údržbu urychlovače elektronů. Dne 10. prosince se přístroj po opravách vrátil do provozu. Na den 19. prosince byl naplánován Španělskou radou pro jadernou bezpečnost každoroční přezkum přístroje, ale z byrokratických důvodů bylo toto hodnocení odloženo. Následně Španělskou radou pro jadernou bezpečnost bylo zjištěno, že výkon elektronového urychlovače byl příliš vysoký, proto dne 20. prosince 1990 byla jednotka odstavena a byla znovu dána do provozu 8. března 1991[14].

San Juan de Dios (Kostarika, 1996)

V nemocnici v San Jose ve městě San Juan de Dios došlo k nehodě s radioterapickou jednotkou Alcyon II. Během procesu kalibrace prováděného na zdroji ^{60}Co dne 22. srpna 1996 došlo k chybě při výpočtu dávky, což vedlo k závažnému předávkování pacientů. K náhodnému přexponování pacientů léčených radioterapií došlo během srpna a září 1996. Chyba kalibrace byla zjištěna 27. 12. 1997. Nadměrnou dávku záření dostávalo 114 pacientů, 13 zemřelo na poškození související s radiací [15].

Panama City (Panama, 2000 - 2001)

Národní onkologický institut ION (Instituto Nacional Oncologico) je specializovaná nemocnice pro léčbu rakoviny. Mezi srpnem 2000 a březnem 2001 pacienti léčení ozařováním u rakoviny prostaty a rakoviny děložního čípku obdrželi smrtelné dávky radiace, což mělo za následek 17 úmrtí a 11 zranění [16].

Sellafield (Anglie, Velká Británie, 19. 4. 2005)

19. dubna 2005 bylo objeveno 83 000 litrů radioaktivního odpadu z ThORP (Thermal Oxide reprocessing plant), který unikl z prasklého potrubí do betonové jámy. Na mezinárodní stupnici jaderných událostí (INES) byla kvalifikována jako událost úrovně 3 [17].

Palma (Malorka, Španělsko, září 2010)

Na radiofarmakologické jednotce nukleární medicíny v nemocnici Son Dureta došlo k vážnému přestupku. Po tři týdny v září 2010, byla opomenuta kontrola kvality radioaktivních léčiv s techneciem-99, používaných pro scintigrafii [18].

Fukushima Daiichi (Japonsko, 11. 9. 2011)

Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, též Fukušima I, se nachází na 3,5 km² ve městech Okuma a Futaba v okrese Futaba v prefektuře Fukushima. První část byla uvedena do provozu v roce 1971, poslední v roce 1979. Má šest reaktorů s vroucí vodou (BWR). Se svým výkonem 4,7 GWe byla jednou z 15 největších jaderných elektráren na celém světě. Elektrárnu vlastní a provozuje společnost TEPCO. Při zemětřesení, které vyvolalo nadprojektové tsunami v roce 2011, došlo v elektrárně k vážné havárii, 4 reaktory byly zničeny a radioaktivní látky unikly do okolí [19]. Obrázek 4 ukazuje srovnání dvou časových okamžiků – vlna tsunami na moři před elektrárnou a vlna tsunami v jaderné elektrárně.

Fukushima Daini Nuclear Power Plant, též Fukušima II, se nachází ve městech Naraha a Tomioka v okrese Futaba v prefektuře Fukushima. Byla dána do provozu 20. 4. 1982.

V lednu 1989 se zlomilo ve sváru ostří oběžného kola čerpadla chladicí kapaliny reaktoru v bloku 3, což způsobilo velké množství kovových nečistot v celém primárním okruhu. V důsledku toho byl reaktor na dlouhou dobu vypnut [19].

Po zemětřesení a tsunami Tóhoku se všechny čtyři reaktory typu BWR ve Fukušimě II automaticky vypnuly.

Havárie japonské jaderné elektrárny Fukušima I společnosti TEPCO v roce 2011 byla nejhorší jaderná havárie od Černobylu 1986 a po ní jediná další havárie označená na stupnici INES nejvyšším stupněm 7. Katastrofa vznikla následkem zatopení elektrárny ničivou vlnou tsunami 11. března způsobenou mimořádně silným zemětřesením v oblasti Tóhoku.



Tsunami se blíží k JE Fukushima JE po průchodu tsunami

Obr. 4 – Jaderná elektrárna a dopady způsobené vlnou tsunami.

Při havárii došlo s velkou pravděpodobností k závažnému poškození tří tlakových nádob reaktoru. Při obnažení paliva v reaktoru vznikl vodík, který byl následně příčinou tří mohutných explozí. Tyto exploze zásadně přispěly k úniku a rozptýlení štěpných produktů, které dočasně způsobily okolí elektrárny neobyvatelným a také dočasně ekonomicky znehodnotily široké oblasti jinak velmi úrodné zemědělské půdy. Příčiny havárie je nutné hledat již v čase před samotnou havárií – nedostatečná připravenost personálu na možné havarijní stavy, zanedbávání připomínek regulačních úřadů, chyby v japonské legislativě týkající se regulačních úřadů a k havárii svojí měrou přispěly i kulturní předpoklady, zejména japonská hierarchie [19].

Přes 150 000 obyvatel muselo být evakuováno z potenciálně nebezpečného okolí elektrárny z důvodu šíření štěpných produktů, ale prozatím nebyla potvrzena žádná úmrtí nebo nemoci způsobené ozářením. Více než 1000 evakuovaných obyvatel zemřelo na následky samotné evakuace, ať již kvůli pokročilému věku, nebo z důvodu chronických onemocnění [19].

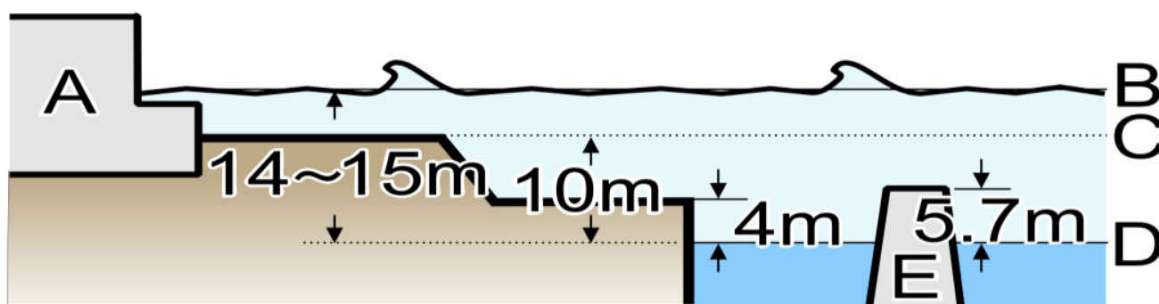
Ničivá katastrofa tedy odhalila spoustu chyb v přístupu společnosti TEPCO k jaderné bezpečnosti, dále ukázala na roztržitost vedení po katastrofě a odhalila nebezpečnou laxnost kontrolních úřadů. Všechny tyto faktory vyústily do havárie, jež podle vyšetřovací komise založené japonským parlamentem byla „man-made“, neboli zapříčiněna člověkem. Člověkem se ovšem nemyslí jednotlivce, ale spíše celý systém. Celkově bylo také zanedbáváno informování veřejnosti ať již před havárií nebo v průběhu samotné havárie. Právě kvůli nedostatečné informovanosti japonské veřejnosti byla po havárii velmi prudká reakce vůči pokračování jaderné energetiky, což byl vedle bezpečnosti další z důvodů k odstavování zbylých japonských jaderných elektráren. Havárie se stala podnětem k politickým debatám o jaderné energetice po celém světě a vedla i k odborným debatám ohledně jaderné bezpečnosti. Kromě toho došlo ke vzniku nového jaderného regulačního úřadu, jenž oproti minulému nespadá pod Ministerstvo ekonomie, obchodu a průmyslu, ale pod Ministerstvo životního prostředí [19].

Bloky 1-4 leží na plošině, která se nachází 10 m nad mořskou hladinou. Bloky 5 a 6 jsou položeny o něco výše, nachází se 13 m nad mořskou hladinou. Elektrárna byla navržena na provoz bez poškození při vlnách do výšky 5,4 m až 5,7 m. Bezpečné hodnoty pro zemětřesení byly stanoveny podle stupnice PGA (Peak Ground Acceleration) kolem $0,45 \text{ g} = 4,415 \text{ m/s}^2$ - hodnoty se liší i podle směru otřesů (horizontální, vertikální), ale všechny se pohybují zhruba kolem uvedené hodnoty.

V době zemětřesení byly bloky 1-3 v normálním provozu a bloky 4-6 byly ve stavu plánované odstávky. Ihned po první známce seizmické aktivity došlo k okamžitému automatickému zastavení štěpné reakce (SCRAM) na všech blocích, jež byly v provozu. Zemětřesení poškodilo rozvodné elektrické sítě spojující elektrárnu s rozvodnami, následkem čehož byla elektrárna bez jakéhokoliv vnějšího zdroje elektrické energie. Z toho důvodu došlo k automatickému spuštění záložních diesel generátorů, díky kterým bylo možné spolehlivě odvádět zbytkové teplo z reaktoru pomocí systémů pro odvod zbytkového tepla. Při zemětřesení došlo k překročení hodnot, na které byla elektrárna navržena, ale prozatím se nepodařilo potvrdit, zda došlo k závažnému poškození elektrárny před zaplavením vlnou tsunami. Většina vyšetřovacích zpráv se přiklání k názoru, že nedošlo k

poškození vlivem zemětřesení [19].

Situace byla stabilní, dokud vlny tsunami vyvolané zemětřesením nezaplavily a nezničily záložní diesel generátory, čerpadla mořské vody, elektrické vedení uvnitř elektrárny a zdroje stejnosměrného napájení (baterie na blocích 1, 2 a 4). Obrázek 5 ukazuje zaplavení elektrárny. Vyjma bloku 6, kde zůstal provozu schopný vzduchem chlazený diesel generátor, byly všechny bloky bez zdroje střídavého napájení a bloky 1, 2 a 4 byly bez jakéhokoliv zdroje elektrické energie. Ztráta elektrické energie znemožnila použití měřících přístrojů a značně omezila funkce blokové dozory. Nebylo možné zjistit hodnoty hladiny vody a tlaku v reaktoru a další klíčové parametry, což v důsledku znamenalo zbytečné prostoje a nedostatečně rychlé reakce na rapidně se zhoršující stav havárie [19].



Obr. 5 - Viditelná úroveň zaplavení areálu elektrárny - čas zhruba 50 minut po zemětřesení.

A: Vlastní budovy elektrárny; B: Maximální výška Tsunami; C: Nadmořská výška areálu (bloky 1-4); D: Průměrná mořská hladina; E: Vlnolamy [19].

V důsledku ztráty elektrické energie a nedostatečné připravenosti provozovatelů na takovou situaci docházelo postupně ke ztrátě záložních systémů chlazení na jednotlivých blocích. Nejhorší situace byla z počátku na bloku 1, kde se dá předpokládat první poškození aktivní zóny okolo 19:00 v den havárie. Po obnažení paliva dochází k nárůstu teploty palivových proutků vyrobených ze slitiny zirkonia. Když povrchová teplota palivových proutků překročí 900 °C, výrazně se zvyšuje množství exotermické reakci zirkonia s vodní párou, při níž vzniká oxid zirkoničitý a vodík. Vodík unikl z tlakové nádoby reaktoru a hromadil se ve vrchním patře budovy. Po dosažení výbušné koncentrace došlo k jeho explozi a hoření, což se na bloku 1 stalo v 15:36 den po havárii. Výbuch vážně poničil vrchní patro a rozmetl trosky do širokého okolí, což dále zkomplikovalo snahy o zvládnutí havárie. Výbuch také narušil těsnost vrchního patra na bloku 2, proto v něm nedocházelo k hromadění vodíku a následnému výbuchu [19].

Postupem času došlo k obnažování a tavení paliva i na bloku 2 a následně i na bloku 3. Na bloku 4 k poškození aktivní zóny nedošlo, neboť v ní nebylo žádné palivo. K výbuchu na bloku 3 došlo stejným způsobem jako na bloku 1. Také na bloku 4 došlo k explozi vodíku, protože ten se k němu dostal z bloku 3, který s blokem 4 sdílí odvětrávací systém SGTS (Stand-by Gas Treatment System) [19].

Po ztrátě všech dostupných systémů chlazení se na jednotlivých blocích započalo se vsťikováním vody do tlakové nádoby reaktoru pomocí požárních cisteren. Aby bylo možné tohoto vsťikování docílit, museli operátoři složitě odtlačovat reaktor, čímž se dále zvyšovalo množství uniklých štěpných produktů. Nejdříve se do reaktoru dodávala slaná voda, která nahradila sladkovodní vodu. Tento způsob chlazení se používal do té doby, než se podařilo získat elektrické napájení, k čemuž došlo 22. března 2012 [19].

V prosinci 2011 došlo u všech reaktorů k dosažení stavu, při kterém je teplota v tlakové nádobě reaktoru pod 100 °C a únik štěpných produktů do atmosféry tak byl již minimální. Takovýto stav se nazývá studená odstávka („cold shut-down“). Bloky 5 a 6 byly již v době zemětřesení ve stavu studené odstávky a havárii se na nich přes počáteční problémy podařilo zvládnout bez poškození reaktorů [19].

V jedné z jímek, v nichž se zachycuje radioaktivní voda unikající z reaktoru č. 2, se 2. dubna objevila trhlinka. Následovaly neúspěšné pokusy o ucpání praskliny betonem a polymery. Nakonec bylo úspěšně použito až tzv. tekuté sklo. Tím se podařilo zastavit unikání vysoce radioaktivní vody přímo do Tichého oceánu. Přibližně ve stejné době bylo do oceánu řízeně vypuštěno 11 500 tun mírně radioaktivní vody, aby se uvolnily prostory pro skladování vysoce radioaktivní vody unikající z reaktorů do okolních budov [19].

Vzhledem k tomu, že při chlazení přehřátých reaktorů byla použita mořská voda, došlo k poškození chladicích

systémů. Navíc v několika reaktorech došlo k roztavení paliva. Japonský premiér Naoto Kan prohlásil, že elektrárnu bude potřeba odstranit. Japonsko již požádalo o pomoc s odstraňováním následků havárie francouzské jaderné korporace Areva a EDF a je možné, že do prací budou zapojeni i odborníci z jiných států. Poradce premiéra Keniči Macumoto sdělil 13. dubna médiím, že podle odhadu bude 20 let nejbližší okolí elektrárny neobyvatelné. Japonská vláda však toto prohlášení záhy dementovala [19].

Dochází také k odstraňování palivových souborů z bazénu pro vyhořelé palivo na bloku 4 [19].

Při havárii došlo k úniku velkého množství zdraví škodlivých štěpných produktů. Přesné množství není možné stanovit a odhady se značně různí. Podle jedné studie došlo např. k úniku až 20 500 TBq radioaktivního cézia-137. Pokud nepočítáme stále probíhající úniky do podzemních vod, do konce března 2011 došlo k úniku 99% z celkového množství uniklých štěpných produktů. V srpnu roku 2013 došlo k úniku 300 m³ radioaktivní vody, což bylo na stupnici INES ohodnoceno stupněm 3. Podle japonského ministerstva životního prostředí je možné naměřit roční dávku radiačního záření ve vzduchu o hodnotě 5 mSv na ploše zhruba 1800 km² v okolí elektrárny [19].

Z důvodu havárie došlo k znehodnocení zemědělské půdy v širokém okolí elektrárny a to hlavně césiem-137 s poločasem rozpadu 30 let. Znehodnocení je také zapříčiněno odporem obyvatel k produktům z širokého okolí elektrárny. Mimo to bylo potřeba omezit rybolov, neboť chycené ryby vykazovaly zvýšené úrovně radiace – příkladem budiž ryba chycená v únoru 2013, jež obsahovala 740 000 Bq/kg radioaktivního césia, což je hodnota překračující zdravotní limity 7400 – krát. Třebaže hodnoty radiace naměřené v dnešní době (k 2/2015) v zemědělských produktech z prefektury Fukušima jsou již bezpečně pod zdraví nebezpečnými hodnotami, strach stále přetrvává [19].

Havárie v jaderné elektrárně Fukushima I vyvolala mezinárodní politickou diskuzi o dalším využívání jaderné energie. V Německu tato havárie způsobila obrat v energetické koncepci, což v důsledku vedlo k tomu, že vláda neprodloužila jaderným elektrárnám provoz a navíc po bezpečnostních prověrkách bylo 7 z nich dočasně uzavřeno. Tento krok způsobil růst cen elektrické energie na německém trhu až o 18 % již v dubnu 2011. Bavorský odpor vůči atomu obnovil i snahy o odstavení JE Temelín. V roce 2015 se i v Německu jedná o možném a možná i nutném prodloužení provozu některých jejich jaderných elektráren po roce 2022 [19].

V samotném Japonsku pak došlo ke zrušení některých projektů nových bloků jaderných elektráren a s velkou pravděpodobností bude ukončen i japonský projekt rychlého reaktoru Mondžú ve městě Curuga. Tento projekt již dlouho provázely nehody. Reaktor byl v provozu dohromady asi jen rok, přestože byl spuštěn již v roce 1995. Zrušení projektu ale bude znamenat velkou ránu pro japonskou energetickou koncepci, neboť s přechodem na rychlé reaktory se počítalo [19].

Podle zprávy japonské parlamentní vyšetřovací komise katastrofu nezavinila přílivová vlna tsunami, ale člověk. „Šlo o havárii způsobenou člověkem. Bylo ji možné předvídat a měla být předvídána. Dalo se jí zabránit a mělo se jí zabránit,“ uvádí komise. Zpráva kritizuje nekvalitní zákony regulující jadernou energetiku, nedostatečnost bezpečnostních opatření, chyby vedení elektrárny a státního dozoru i špatné reakce po nehodě. Zpráva proto doporučila posílit dozor vlády v oblasti jaderné energetiky [19].

4. Přehledné údaje o jaderných haváriích a testech

Na základě kritického posouzení údajů IAEA [20] a v databázi [1] jsme odvodili následující fakta:

- od r. 1954 (kdy byl zkonstruován první jaderný reaktor) již bylo více než 100 jaderných havárií a nehod na civilních objektech:
 - jaderné elektrárny (roztavení aktivní zóny: 1969 Vaud, 1979 Three Mile Islands, 1986 Černobyl, 2011 Fukushima, menší Idaho 1954....; únik radioaktivity: např. 1980 Saint Laurent, 1986 Hamm a další),
 - havárie v průmyslu (např. 1957 Majak u Čeljabinsku – výroba plutonia a přepracování vyhořelého paliva; 1957 Hanford v Richlandu – přepracování jaderného paliva; 1999 Tokaimura – přepracování jaderného paliva),
 - havárie v nemocnicích ((Mexiko, Brazílie, USA, Španělsko, Maroko, Thajsko, Jižní Afrika, Indie, Egypt, Izrael a další),
 - havárie v laboratořích (např. 1957 v Simi Valley (Kalifornie); Izrael, Čína, Estonsko, Maďarsko a další),
 - přeprava jaderných materiálů,
- od r. 1940 již bylo několik set jaderných havárií na vojenských objektech nebo úmyslných použití jaderných výrobků:
 - útoky (1945 Nagasaki, Hirošima),
 - vojenské reaktory (např. 1952 Ontario, 1957 Windscale (Sellafield a další),

- letecká přeprava bomb (záznamy jsou od r. 1950),
- jaderné ponorky (záznamy havárií jsou od r. 1963),
- jaderné testy (nadzemní: USA-1032, Rusko-792, VB-88, Francie-212, Indie-3, Čína-47, Pákistán, Severní Korea-3; nejvíce podzemních USA přes 1000 zkoušek v Pacifiku a více než 900 v Nevadě; Rusko – Semipalatinsk, Novaja Zemlja cca 600).

Na některých místech došlo k haváriím opakovaně, v řadě případů ze stejné příčiny, a proto jsou uvedeny v jednom bloku. Z hodnocení vyplývá, že:

- IAEA registruje 1266 jaderných nehod za posledních 12 let v 99 zemích,
- jaderné havárie a jaderné nehody se nevyhýbají žádnému typu reaktoru, žádné jaderné elektrárny a žádnému státu,
- dobře zvládají jaderné nehody jaderné elektrárny s tlakovodními reaktory typu PWR s kontejnmentem (tj. typ, který je v ČR),
- jsou jaderné elektrárny, které přežily jaderné nehody i jaderné havárie a po rekonstrukci obnovily provoz,
- mnoho firem tajilo jaderné nehody a havárie před světem i občany v okolí, a tím nedošlo k nasazení ochranných opatření u občanů,
- u mnoha jaderných havárií a nehod hrál významnou roli lidský faktor. Je skutečností, že i když bezprostřední příčinou byla technická závada nebo chybný úkon obsluhy, tak se vždy našly chyby v dlouhodobém řízení a kultuře bezpečnosti, což znamená, že události spadají do kategorie označované od r. 1981 jako organizační havárie.

Proto nezbyvá nic jiného, než konstatovat, že jaderná zařízení jsou složitá technologická zařízení typu systémy systémů [21], a proto v souladu s výsledky Charlese Perrowa z roku 1980 získanými po důkladné analýze jaderné havárie TMI [22] je třeba u nich mít po všech stránkách připravenou kvalifikovanou odezvu (personál, odpovědnosti, postupy, materiál, techniku).

Závěr

Jaderné materiály a technologie zlepšují kvalitu života lidí. Protože z aplikace poznatků z přírodovědných, technických i sociálních věd vyplývá, že nic není absolutní, tak je v každém technologickém zařízení nutno počítat s poruchami, nehodami, skoro nehodami i haváriemi. Z pohledu ochrany životů a zdraví lidí nás především zajímají jaderné havárie, které mají významné dopady na lidi, životní prostředí nebo samotné zařízení. Proto se musíme velmi dbát na bezpečnost jaderných zařízení, tj. kvalifikovaně pracovat s riziky, a protože v čase přibývají stále nová rizika, tak je třeba sofistikovaně řídit bezpečnost jaderných zařízení v čase, což platí pro všechna složitá technologická zařízení [21].

Kritické vyhodnocení shromážděných poznatků v databázi [1] ukázalo řadu skutečností, kterými lze zlepšit kulturu bezpečnosti při používání jaderných materiálů a jaderných technologií. Dokládá také fakt, že je chybou, že se pracovníci z příslušné oblasti nevěnují studiu minulých událostí; v řadě případů pak podceňují vznik možných škodlivých událostí a krutost jejich dopadů, anebo si neváží technických poznatků svých předchůdců a spoléhají jen na krásné scénáře získané řešením jednoduchých případů pomocí IT technologií.

***Poděkování** [zaradenie príspevku]*

Autoři děkují za podporu ČVUT v Praze (grant SGS2015-17).

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- [1] PROCHÁZKA, Z., PROCHÁZKOVÁ, D. Databáze jaderných událostí. *Archiv*. Praha: ČVUT.
- [2] [on-line] Available on - URL: https://cs.wikipedia.org/wiki/Mezin%C3%A1rodn%C3%AD_stupnice_jadern%C3%BDch_ud%C3%A1lost%C3%AD
- [3] PROCHÁZKA, Z., PROCHÁZKOVÁ, D., BOROVIČKA, D. Dopady vybraných jaderných havárií a testů. In: *Rizika podnikových a územních procesů a poznatky pro krizové řízení*. ISBN: 978-80-01-06033-9. Praha: ČVUT 2016, pp. 122-163.
- [4] [on-line] Available on - URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Operation_Crossroads

- [5] [on-line] Available on - URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Pollution_of_Lake_Karachay
- [6] [on-line] Available on - URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Operation_Plumbbob
- [7] [on-line] Available on - URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Santa_Susana_Field_Laboratory
- [8] [on-line] Available on - URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Soviet_submarine_K-19#Nuclear_accident
- [9] [on-line] Available on - URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Saint-Laurent_Nuclear_Power_Plant
- [10] [on-line] Available on - URL:
<https://books.google.cz/books?id=SPaxCwAAQBAJ&pg=PA56&lpg=PA56&dq=nuclear+accident+Sellafield+1973&source=bl&ots=qDACcHz3Ap&sig=k4eX6mAkRkaylCQwgJmUigQIPs&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwjaxrLE15XNAhVGsBQKHd3DAGMQ6AEIRjAE#v=onepage&q=nuclear%20accident%20Sellafield%201973&f=false>
- [11] [on-line] Available on - URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Three_Mile_Island_accident
- [12] [on-line] Available on - URL: <http://ucivozs.sweb.cz/cernoby11.html>
- [13] [on-line] Available on - URL: <http://www.processindustryforum.com/hottopics/nucleardisasters>
- [14] [on-line] Available on - URL:
https://en.wikipedia.org/wiki/1990_Clinic_of_Zaragoza_radiotherapy_accident
- [15] [on-line] Available on - URL:
https://en.wikipedia.org/wiki/1996_San_Juan_de_Dios_radiotherapy_accident
- [16] [on-line] Available on - URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Instituto_Oncologico_Nacional#Accident
- [17] [on-line] Available on - URL:
https://fr.wikinews.org/wiki/Fuite_de_d%C3%A9chets_nucl%C3%A9aires_%C3%A0_l'usine_de_retraitement_de_Sellafield,_en_Grande-Bretagne
- [18] [on-line] Available on - URL:
https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_whistleblowers#Nuclear_medicine_service_at_Hospital_Son_Dur eta
- [19] [on-line] Available on - URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Fukushima_Daiichi_nuclear_disaster
- [20] [on-line] Available on - URL: <https://iaea.org>
- [21] D. Procházková: D. Prochazkova: *Safety of Complex Technological Facilities*. ISBN: 978-3-659-74632-1. Lambert Academic Publishing, Saarbruecken 2015, 244p. ID:200303845
- [22] Ch. Perrow: *Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies*. Princeton: Princeton University Press 1984.

CONTACT ADDRESS

Author: **Dana PROCHÁZKOVÁ, doc., RNDr., PhD., DrSc.**
 Workplace: ČVUT v Praze, Fakulta dopravní
 Address: Konviktská 20, 110 00 Prague, Czech Republic
 E-mail: prochazkova@fd.cvut.cz

Author: **Zdenko PROCHÁZKA**
 Workplace: ČVUT v Praze, Fakulta dopravní
 Address: Konviktská 20, 110 00 Prague, Czech Republic

Author: **Jan PROCHÁZKA, RNDr., Ph.D.**
 Workplace: ČVUT v Praze, Fakulta dopravní
 Address: Konviktská 20, 110 00 Prague, Czech Republic
 E-mail: prochazka@fd.cvut.cz

RECENZIA TEXTOV V ZBORNÍKU

Recenzované dvomi recenzentmi, členmi vedeckej rady konferencie. Za textovú a jazykovú úpravu príspevku zodpovedajú autori.

REVIEW TEXT IN THE CONFERENCE PROCEEDINGS

Contributions published in proceedings were reviewed by two members of scientific committee of the conference. For text editing and linguistic contribution corresponding authors.