

## Jaderné katastrofy a mimořádné události

Již od samých počátků využívání jaderné energie docházelo k mimořádným událostem, při kterých umírali v důsledku ozáření lidé, většinou pracovníci jaderného výzkumu nebo technický personál jaderných elektráren. Největší jadernou katastrofou v dějinách však byly samozřejmě exploze jaderných pum nad městy Hirošima a Nagasaki. V těchto případech se jednalo o lidský záměr s politickým zdůvodněním – co nejrychleji ukončit válečný konflikt v Tichomoří. Exploze přežilo mnoho lidí, ale z nich pak mnoho zemřelo na akutní či pozdní následky ozáření. S jedinou částečnou výjimkou (Fukušima v r. 2011), všechny ostatní jaderné havárie a katastrofy byly důsledkem lidské chyby, nezodpovědnosti či nepozornosti. Nejhorší z nich byla jistě katastrofa v Černobyli v r. 1986.

K vyvolání lavinové štěpné reakce, vedoucí k jaderné explozi, je zapotřebí **kritické množství** vysoce obohaceného uranu nebo např. plutonia. Vedle toho musí být splněny i jisté geometrické předpoklady – materiál musí být vhodně uspořádán, např. do výsledného tvaru koule. Určité snížení kritického množství umožňuje přidání „zrcadlicího“ obalu nálože, odrážejícího neutrony. Může to být například vrstva uranu-238. V jaderné energetice se však pracuje jen s mírně obohaceným uranem, který v podstatě neumožňuje jadernou explozi. K tomu by ho muselo být shromážděno mimořádně velké množství. U výzkumných a zejména energetických reaktorů proto hrozí „jen“ prudké přehřátí a roztavení obsahu reaktorové nádoby, která ztratí těsnost – nastane tzv. *meltdown*.

Dále musíme vzít v úvahu (zejména s ohledem na události v Three Mile Island, Černobyli i Fukušimě – viz dále), že ani zastavení štěpné reakce regulačními a bezpečnostními tyčemi nevede k okamžitému ochlazení reaktoru na bezpečnou úroveň. Zastavený reaktor klesne se svým *tepelem* výkonem z tisíců MW nejprve jen na stovky MW, což je ještě pořád obrovský výkon, který nelze zvládnout bez intenzivního chlazení. Po uplynutí jednoho dne je tepelný výkon stále ještě na úrovni desítek MW, tedy malé tepelné elektrárny. Bez určitého chlazení se proto těleso reaktoru neobejde ještě delší dobu, dokud se nevyčerpá energie štěpných produktů s krátkou dobou života. Ale i potom bude palivo intenzivně hřát, dokud se nevyčerpají štěpné produkty s dlouhým poločasem přeměny.

S uvážením toho, že s částečnou výjimkou Černobyli nemáme spolehlivé údaje o mimořádných událostech v bývalém Sovětském Svazu, v literatuře jsou popisovány hlavně události se ztrátami na lidských životech nebo z jiných důvodů závažných, k nimž došlo především v USA.

28. 3. 1979 došlo k havárii v jaderné elektrárně **Three Mile Island** u Harrisburgu v Pensylvánii (USA). Vše začalo poruchou jedné z pump, která vracela kondenzovanou vodu k parogenerátorům, které byly vzápětí odstaveny. Náhradní čerpadla byla uvedena do provozu, ale měla uzavřené ventily po poslední údržbě. Než byly ventily otevřeny, vyvařila se v parogenerátoru všechna voda, což vedlo k přehřívání tzv. primárního okruhu a samotného reaktoru, což dále vedlo k jeho automatickému odstavení – zastavení štěpné reakce. I tak však reaktoru zůstalo 200 MW tepelného výkonu. Následovala série dalších poruch a chyb obsluhy, která vedla k úniku určitého množství radioaktivní vody do vnějších nádrží – uvolnilo se z ní pak poměrně značné množství radioaktivního jódu a xenonu. Došlo i k výbuchu vodíku uvnitř betonového obalu reaktoru – tzv. kontejnmentu, který naštěstí mechanicky obstál. Reaktor ovšem musel být trvale deaktivován. Havárie se naštěstí obešla bez lidských obětí, ale stala se základem pro zpřísnění pravidel provozu jaderných elektráren a kvalitnější proškolení obsluhy.

26. dubna 1986 došlo k dosud největší průmyslové jaderné havárii v **Černobyli** asi 140 km od Kyjeva. Reaktor starší konstrukce pracoval s grafitovým moderátorem a vodou chlazenými palivovými tyčemi vyrobenými z jen mírně obohaceného uranu (2% U-235).

Havárie byla důsledkem nezodpovědného experimentu provedeného lidmi, kteří ani k ničemu takovému neměli oprávnění. Podstatné je to, že v rámci experimentu došlo k vypnutí systému nouzového chlazení jádra reaktoru. Následovalo velké snížení výkonu, které vedlo k tzv. xenonové otravě reaktoru. Obsluha se snažila tento problém řešit spuštěním reaktoru na vyšší výkon, což selhalo a přivedlo reaktor k provozní nestabilitě. V důsledku záměrné nefunkčnosti dalších systémů se ve vodní náplni reaktoru začaly tvořit parní bubliny, díky kterým se snížila absorpce nadbytečných neutronů jádry vodíku. Řetězová reakce se zvýšila a reaktor dosáhl zhruba desetinásobek (!) projektovaného tepelného výkonu, tj. 30 000 MW. Regulační tyče nebylo možno zasunout do reaktoru dostatečně rychle. V přehřátém nitru reaktoru se začalo rozptylovat palivo, rozběhly se chemické reakce, následoval tepelný výbuch, který odhodil víko reaktorové nádoby. Grafitový moderátor začal hořet a jádro reaktoru se roztavilo. Až dvacet procent radioaktivního materiálu obsaženého v reaktoru, hlavně jódu a cesia, se rozptýlilo do atmosféry. Radioaktivní spad zasáhl řadu oblastí Skandinávie a Východní Evropy. Pracovníci havarijních týmů, hlavně hasiči a někteří povolání vojáci byli zasaženi dávkami od 1 do 15 Sv, nejméně 31 lidí zemřelo na akutní nemoc z ozáření. V okolí se též významně zvýšil výskyt rakoviny štítné žlázy. Obyvatelstvo – desítky tisíc lidí – z přilehlé oblasti muselo být trvale vystěhováno. Zničený reaktor musel být překryt obrovským betonovým „sarkofágem“, nedávno zesíleným a lépe ochráněným před atmosférickými vlivy.

K havárii se ztrátami na životech došlo na vojenském reaktoru v Idahu 3. ledna 1961. Reaktor byl konstruován jako mobilní. Při přípravě ke spuštění reaktoru došlo k neplánovanému pádu nebo prudkému zasunutí jedné palivové tyče, v reaktoru se prudce rozběhla reakce, chemický výbuch vystřelil z reaktoru regulační tyče. Tři pracovníci přitom zahynuli. Jednotlivci byli vážně poraněni nebo zabiti i v několika dalších podobných případech – vždy šlo o lidské chyby.

Jaderné havárie poměrně vysokého stupně se vedle jiných zemí nevyhnulo ani bývalé Československo. K havárii energetického bloku atomové elektrárny A-1 (s pokusným reaktorem pracujícím s přírodním uranem a s poměrně malým výkonem kolem 143 MW) v **Jaslovských Bohunicích** na Slovensku došlo 22. února 1977, při výměně palivového článku. Do reaktoru se dostal s palivovou tyčí silikagel (absorbent vlhkosti) z roztrženého sáčku, čehož si pracovníci manipulující s palivem nevšimli. Po zavezení paliva do reaktoru nemohlo chladicí médium volně proudit a lokální přehřátí způsobilo roztavení palivových proutků a propálení nádoby těžkovodního moderátoru, který pronikl do primárního okruhu s oxidem uhličitým. Nárůst vlhkosti poškodil povrch paliva. Primární a částečně i sekundární okruh byl kontaminován štěpnými produkty. V důsledku havárie byla jaderná elektrárna A-1 definitivně uzavřena a i v současné době se provádí její likvidace. Nehoda byla vyhodnocena stupněm 4 na sedmistupňové mezinárodní stupnici (nehoda v Three Mile Island byla ohodnocena stupněm 5, Černobyl a po jistém váhání i Fukušima mají ohodnocení stupněm nejvyšším – 7)

K několika průmyslovým haváriím došlo v důsledku překročení kritického množství štěpného materiálu nebo k narušení bezpečné geometrie uspořádání štěpného materiálu. Zpravidla šlo o nadměrné nahromadění nějakých roztoků štěpného materiálu (Oak Ridge – 1958, Los Alamos – 1958 a j.). Známé jsou vážné laboratorní havárie, které vedly k smrtelnému ozáření dvou pracovníků v laboratořích v Los Alamos v letech 1945 a 1946.

Vedle jaderné energetiky a reaktorů došlo i k několika fatálním událostem, které souvisely s nezodpovědnou manipulací se lékařskými ozařovači, které se dostaly do šrotu i s radioaktivní náplní.

Závěrem několik slov o havárii v jaderné elektrárně Fukušima Daiči (Fukušima dvě), k níž došlo po extrémním podmořském zemětřesení u japonských břehů dne 11. 3. 2011. Tato elektrárna byla po nějakou dobu dokonce největší jadernou elektrárnou na světě. Tři ze šesti tamních reaktorů byly v kritické době v provozu, tři v údržbě. Tři pracující reaktory byly okamžitě odstaveny při zemětřesení. Na čtyřech ze šesti reaktorů této elektrárny však došlo

k výpadku chlazení reaktorů, protože mimořádně velká vlna cunami následně zaplavila a vyřadila z provozu dieselelektrické agregáty, které chlazení zajišťovaly. Přerušeno bylo i napojení na celostátní energetickou síť. Během několika dnů docházelo k přehřívání reaktorů a úložišť vyhořelého paliva, v několika případech i s tavením paliva, unikla významná množství silně radioaktivní vody a aerosolů. Reaktorové budovy byly devastovány požáry a výbuchy vodíku (vzniká rozkladem vody na rozžhavených kovech). K chlazení reaktorů musela být používána kvanta mořské vody, která byla přitom kontaminována. Mnoho lidí, zejména techniků, bylo ozářeno dávkami, které již nejsou považovány za bezpečné (desítky až stovky mSv). Kolem 200 000 lidí muselo být na blíže neurčenou dobu, možná 20 let, vystěhováno z nejbližšího okolí elektrárny v důsledku zamoření životního prostředí radioaktivním cesiem a zpočátku i jódem. Vedle přírodní katastrofy mimořádné intenzity bylo příčinou problémů přinejmenším nevhodné umístění náhradních zdrojů energie v blízkosti mořského břehu i určité počáteční podcenění závažnosti havárie ze strany provozovatele. Po Fukušimských událostech se podobně jako po Černobylu, byť v menším rozsahu, projeví snahy o utajování skutečného rozsahu katastrofy ze strany majitele elektrárny i státu. Na podrobné zhodnocení této havárie, která výrazně poškodila jadernou energetickou politiku v celosvětovém měřítku, však dosud neuzrál čas. Situace stále není zvládnuta do všech detailů. K občasným únikům radioaktivní vody docházelo v areálu elektrárny i v následujících letech.