

11.3. 2011, ostrov Honšú
Situace na jaderných elektrárnách v regionu
postiženém silným zemětřesením následovaným vlnou tsunami

Vznik a vývoj havárie na jaderné elektrárně Fukushima Dai-ichi

Silné zemětřesení v provincii Tohoku (o síle 9 stupňů podle Richterovy stupnice), které dne 11. března 2011 v 14:46 místního času udeřilo u východního pobřeží japonského ostrova Honšú, mělo přímý dopad na čtyři jaderné elektrárny v postižené oblasti (všechny provozované reaktory byly okamžitě automaticky odstaveny), a to:

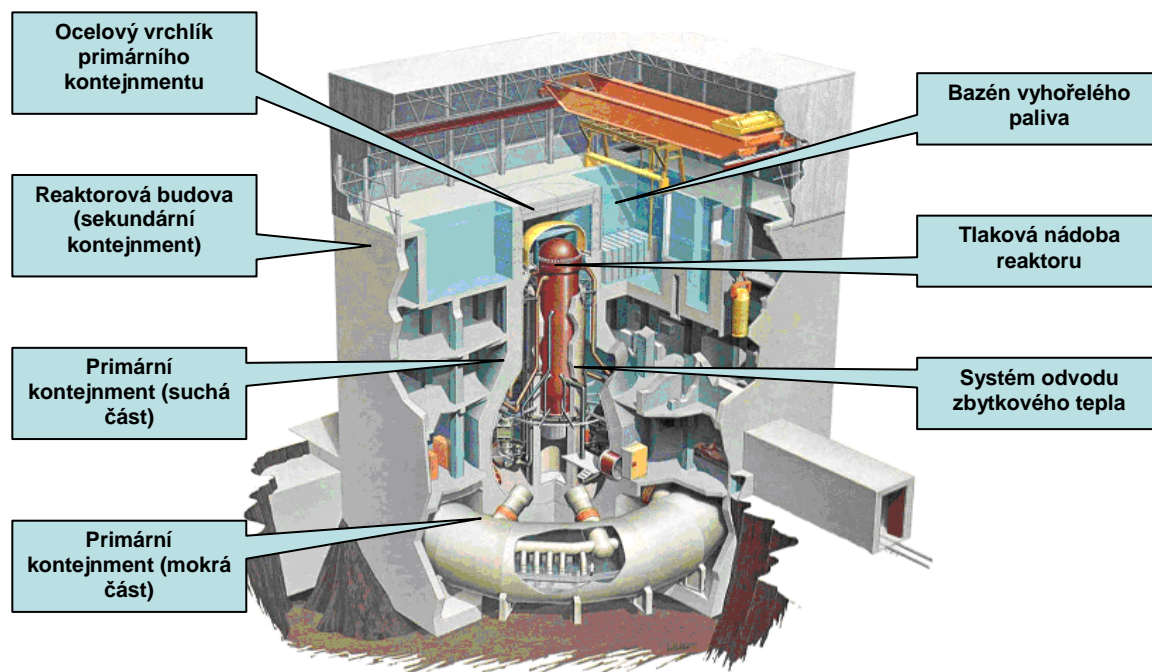
- **Onagawa** (tři bloky: bloky 1 a 3 byly v provozu a reaktor 2. blok byl spouštěn; oba provozované reaktory dosáhly díky systémům havarijního chlazení stavu studeného odstavení 12. března v brzkých ranních hodinách);
- **Tokai** (jeden blok: 2. blok elektrárny byl v provozu a stavu studeného odstavení dosáhl 15. března nad ránem);
- **Fukušima 2/Dai-ichi** (všechny čtyři bloky elektrárny byly v okamžiku zemětřesení v provozu; po následné vlně tsunami byly poškozeny jejich havarijní chladicí systémy, relativně brzy se je ovšem podařilo obnovit – 3. blok dosáhl stavu studeného odstavení již 12. března po poledni, 1. a 2. blok 14. března odpoledne a 4. reaktor 15. března ráno);
- **Fukušima 1/Dai-ichi** (šest bloků, podrobněji viz níže).

Situaci na jaderných elektrárnách Onagawa, Tokai a Fukušima Dai-ichi (INES 3 na blocích 1, 2 a 4) se podařilo dostat relativně brzy pod kontrolu, proto bude dále popsán pouze sled událostí na nejvážněji poškozené jaderné elektrárně Fukušima Dai-ichi. Dopadu prvního silného následného otřesu z 7. dubna nebude věnována pozornost.

V jaderné elektrárně Fukušima 1 (Dai-ichi) je instalováno **šest bloků s varnými reaktory**, které byly uvedeny do provozu postupně v letech **1971/březen** (reaktor typu BWR-3 s výkonem 460 MWe), **1974/červenec** (BWR-4/784 MWe), **1976/březen** (BWR-4/784 MWe), **1978/říjen** (BWR-4/784 MWe), **1978/duben** (BWR-4/784 MWe) a **1979/říjen** (BWR-5/1100 MWe). Výstavba jednotlivých bloků byla zahájena v září 1967, květnu 1969, říjnu 1970, září 1972, prosinci 1971 a květnu 1973.

V okamžiku zemětřesení byly reaktory 1-3 v provozu a zbývající tři (4-6) v plánované odstávce (na 4. bloku probíhala výměna paliva, na blocích 5 a 6 rutinní údržba).

Zjednodušené schéma reaktoru BWR s kontejnmentem typu „Mark I“ (bloky 1-5)



Provozované bloky (1-3) byly v okamžiku zemětřesení v souladu s projektem - díky zapůsobení seismických čidel - **automaticky odstaveny** (následkem zemětřesení elektrárna přišla o všech šest externích zdrojů elektřiny). **Úspěšně najely i dieselgenerátory, které zajišťovaly havarijní chlazení reaktorů** (Fukušima byla projektována na stupeň 8,2 podle Richterovy stupnice – šlo tedy zemětřesení 6,3-krát silnější). Necelou hodinu nato (41 minut) byly ovšem **systemy havarijního chlazení přerušeny** dvěma - po osmi minutách následujícími - vlnami tsunami, které doslova smetly čerpadla na mořskou vodu i havarijní dieselgenerátory s palivovými nádržemi (zachován zůstal pouze jediný havarijní dieselgenerátor 6. bloku). Svou mohutností (cca 14-15m) ničivá vlna tsunami značně překonala výšku, s níž počítal projekt elektrárny (původní 3,1m a v roce 2002 revidovaný díky ochranné hrázi na výšku 5,7m) **a vyvolala tak boj o dochlazení reaktorů, resp. odvod zbytkového tepla**. Jediným zdrojem elektřiny po náhlém odstavení dieselgenerátorů byly baterie s omezenou (několikahodinovou) kapacitou/životností. Chlazení tak bylo zajišťováno pouze náhradními systémy: přes havarijní kondenzátor na 1. bloku (*Isolation Condenser*: přirozená cirkulace vody kondenzované z vodní páry – nevyžaduje pohon čerpadla), havarijním chlazením poháněným párou z turbíny (*Reactor Core Isolation Cooling System* - nepotřebuje elektrické čerpadlo) na 2. bloku a na 3. bloku ještě za pomoci vysokotlakého napájení (*High Pressure Injection System*: čerpadlo poháněno parou generovanou ze zbytkového tepla v turbíně). Předpokládaná výška zaplavení 1.-4. bloku situovaných 10 m nad hladinou moře byla 4-5 m, u výše položených bloků 5-6 (13 m nad mořem) pak „pouze“ cca 1 m.

Na 1. a 2. bloku selhaly systémy vstřikování chladicí vody do reaktoru hned 11. března. Předpokládá se, že již cca hodinu po výpadku chlazení **došlo na 1. bloku k tavení paliva** v aktivní zóně, jehož část se nejspíše dostala do spodní části reaktorové nádoby. Tu mohla částečně poškodit a začít se hromadit na dně „suché“ části primárního kontejnmentu. 12. března došlo **na 1. bloku** k neobvyklému růstu tlaku v primárním kontejnmentu a bylo

zahájeno jeho odvětrávání prostřednictvím jeho „mokrých částí“ Přesto však odpoledne došlo **k explozi vodíku** (pozn.: nahromaděného v důsledku reakce zirkoniového povlaku s vodou - z 1kg zoxidovaného zirkonia se uvolňuje přibližně 44,2g vodíku), která poškodila horní část reaktorové budovy (z lehkého konstrukčního materiálu) a odhalila bazén vyhořelého paliva umístěný vedle reaktoru. Pět hodin po výbuchu bylo zahájeno vstřikování mořské vody do aktivní zóny reaktoru. Snižování tlaku v primárním kontejnmentu **2. bloku** bylo zahájeno 13. března dopoledne a **14. března brzy odpoledne došlo ke ztrátě chladících funkcí reaktoru**. V tuto chvíli také pravděpodobně došlo k obnažení paliva a jeho následnému tavení. I zde existuje předpoklad, že se tavenina dostala do spodní části reaktorové nádoby, kterou mohla poškodit a začít se hromadit na dně „suché“ části primárního kontejnmentu. Také na tomto bloku bylo zahájeno vstřikování mořské vody do aktivní zóny reaktoru. Po několika hodinách následovalo neobvyklé zvýšení tlaku v primárním kontejnmentu. Ani další odvětrávání nezabránilo **výbuchu, k němuž došlo 15. března** ráno, a který vyvolal podezření na poškození „mokrých“ částí primárního kontejnmentu (přetrvává podezření, že k explozi došlo právě v prostorách „torusu“, kde se mohl hromadit vodík). Reaktorová budova zůstala nedotčena. **Na 3. bloku** došlo k selhání systému vstřikování chladící vody do aktivní zóny 13. března v ranních hodinách. V tomto okamžiku bylo zřejmě obnaženo palivo a nastalo jeho tavení. I u 3. reaktoru se počítá s možností, že se tavenina usazuje na dně „suché“ části kontejnmentu. Následovalo odtakovávání primárního kontejnmentu a vstřikování mořské vody s kyselinou boritou do aktivní zóny reaktoru. K dalšímu odvětrávání primárního kontejnmentu probíhalo **14. března brzy ráno**. Přesto došlo k neobvyklému nárůstu tlaku v primárním kontejnmentu a dopoledne stejného dne **k explozi nahromaděného vodíku**. Ta vážně poškodila horní strukturu reaktorové budovy a zapříčinila odkrytí bazénu vyhořelého paliva. Od 17. března bylo prováděno sprchování helikoptéry obranných sil Japonska, které následně vystřídalo chlazení ze země za pomoci vodních děl. V důsledku vývinu zbytkového tepla se začal zvyšovat tlak také v odstavených reaktorech 5 a 6, takže dne 13. března muselo být zahájeno jejich havarijní chlazení. Zpět do stavu studeného odstavení se oba bloky dostávají 20. března.

Od 22. března je k dispozici externí zdroj napájení pro bloky 1, 2, 5 a 6, den nato následují i zbývající dva bloky (3 a 4). Začíná testování elektrického zařízení na všech blocích před připravovaným obnovením standardních dodávek elektřiny. 22. března **přešly bloky 5-6** a 3. dubna i bloky 1-3 z provizorního zdroje energie **na vnější napájení podle projektu**. **K obnově osvětlení hlavní blokové dozorny** došlo 22. března na 3. bloku, 24. března na 1. bloku, 26. března na 2. bloku a 29. března na 4. bloku.

Od 22. března docházelo v reaktorové nádobě 1. bloku k růstu teploty (24. března v ní bylo naměřeno téměř 400°C; pokles teploty na 144,3°C byl zaznamenán 26. března), proto byl zdevítinásoben přísun chladící vody do aktivní zóny – kromě požárního potrubí bylo napojeno i potrubí napájecí vody. Na něj pak také bylo dne 23. března „přepnuto“ celé chlazení reaktoru.

Od 25. března je reaktor 1. stejně jako 3. bloku **chlazen sladkou vodou s přidavkem kyseliny borité, aby se zamezilo případnému obnovení jejich kritičnosti**. 2. blok následoval o den později. Od 27. března na 2. bloku, 28. března na 3. bloku a od 29. března na 1. bloku probíhalo **chlazení vstřikováním vody za pomoci provizorních motorových čerpadel** namísto dosavadních požárních stříkaček.

7. dubna bylo s cílem zamezit možné explozi směsi kyslíku s vodíkem zahájeno vstřikování dusíku do primárního kontejnmentu 1. bloku.

17. dubna začíná prozkoumávání reaktorové budovy 1. a 3. bloku za pomoci dálkově řízeného robota, 18. dubna následuje 2. blok. 5. května byly do reaktorové budovy 1. bloku instalovány ventilátory k odvětrávání vysoce radioaktivního vzduchu.

Úsilí provozovatele elektrárny (TEPCO) se v prvních dnech soustředilo na dochlazení reaktorů 1-3, takže lze předpokládat, že jeho **pozornosti mírně unikla nutnost kontrolovat také stav přilehlých bazénů vyhořelého paliva**. V bazénu na **4. bloku** (jeho reaktor byl plánovaně odstaven ještě před zemětřesením) došlo následkem nedostatečného chlazení **15. března k požáru a také k výbuchu nahromaděného vodíku**; prokazuje se také poškození zdi reaktorové budovy. 16. března došlo na bloku k dalšímu požáru a navíc byl pozorován bílý dým, který indikoval var vody v bazénu. **17. března** bylo zahájeno shazování mořské vody na bazén vyhořelého paliva **3. bloku** z helikoptér stejně jako jeho sprchování. Ve dnech **20.-21. března** byly stejné způsoby chlazení použity také na bazén **4. bloku**. **18. března se chlazení bazénů vyhořelého paliva na blocích 1-4 stává maximální prioritou**. **19. března bylo zahájeno také chlazení bazénů na plánovaně odstavených blocích 5 a 6** pomocí čerpadel pro odvod zbytkového tepla, od 21. března pak sprchováním. Na **2. bloku** se k sprchování bazénu vyhořelého paliva mořskou vodou přistoupilo **20. března** a u **1. bloku 31. března**. Teprve v druhé fázi (po zajištění urgentního chlazení mořskou vodou na počátku) se přešlo – stejně jako u reaktorů - na chlazení bazénů sladkou vodou. Stabilní dodávku sladké vody zajišťovaly cisterny na beton. Na 2. bloku probíhalo (k začátku června) chlazení bazénu cirkulací přes tepelný výměník, na 1. a 3. bloku pomocí elektrických čerpadel a u 5. a 6. bloku bylo plně obnoveno původní (projektové) chlazení.

Doplnění pro představu o stavu paliva v bazénech vyhořelého paliva (převzato z prezentace Japonska během organizačního setkání pro přípravu hodnotící konference Společné Úmluvy o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým jaderným palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady, duben 2011):

Blok	1	2	3	4	5	6
Počet palivových souborů v aktivní zóně	400	548	548	(548)	548	764
Počet vyhořelých (nových) palivových souborů v bazénu	292 (100)	587 (28)	514 (52)	1331 (204)	946 (48)	876 (64)
Objem vody (m³)	1020	1425	1425	1425	1425	1497
Poslední odstávka bloku	27.9. 2010	18.11. 2010	23.9. 2010	29.11.2010 (celá zóna byla vyvezena do bazénu)	3.1. 2011	14.8. 2010
Zbytkové teplo (11. 3.)	0,18	0,62	0,54	2,26	1,00	0,87
Zbytkové teplo (11. 6.)	0,16	0,52	0,46	1,58	0,76	0,73

28. března byla v turbínových halách 1.-4. bloku objevena radioaktivní voda, takže bylo nutné přistoupit k jejímu **odčerpávání**. Aby byl zajištěn prostor pro její přesun z přízemí turbínové haly do kondenzátoru, bylo nejprve nutné vyprázdnit jeho zásobní nádrž do doplňovací nádrže „mokrý“ části primárního kontejnmentu. Akce proběhla na 3. bloku 28. března, 29. března na 2. bloku a 31. března na 1. bloku.

28. března byla detekována vysoká radiace také v drenážním systému vně turbínové haly poblíž 2. bloku. 2. dubna pak byl zjištěn radioaktivní únik z trhliny o délce cca 20 cm ve stěně betonové šachty s přívodními kabely v blízkosti 2. bloku do moře (výše uvolněné

radioaktivity se odhaduje na 4700 TBq). Únik byl zastaven 6. dubna - po neúspěšném zalití betonem - až injektáží polymerního vodního skla.

4. dubna se TEPCO rozhodlo vypustit přibližně 11,5 t nízce aktivní vody do moře, aby připravilo prostory pro shromáždění vysoce radioaktivní vody z dalších míst elektrárny.

10. dubna bylo dokončeno přečerpávání vody z hlavního kondenzátoru do jeho zásobní nádrže na 1. bloku a 9. dubna na 2. bloku.

S cílem dostat postiženou elektrárnu pod kontrolu **přišel její provozovatel (TEPCO) dne 17. dubna s plánem konkrétních opatření (roadmap)**: pro první tři měsíce si za hlavní cíle vytyčil stálé snižování radioaktivních dávek, stabilní chlazení reaktorů i bazénů vyhořelého paliva a ochranu před radioaktivními úniky do životního prostředí (moře, atmosféra, půda). V horizontu dalších 6-9 měsíců by měla následovat kontrola radioaktivních úniků a významný pokles radiačních dávek, dosažení stavu studeného odstavení všech reaktorů, udržování dostatečné vodní hladiny v bazénech vyhořelého paliva u reaktorů pro zajištění jejich stabilnějšího chlazení, zpracovávání a snižování množství kontaminované vody a zakonzervování budov postižených reaktorů (betonová obálka – připravuje se pro nejpoškozenější, 1. reaktor).

19. dubna bylo zahájeno přečerpávání vysoce radioaktivní vody nahromaděné v turbínové hale a betonovém tunelu na 2. bloku do budovy zpracovávání radioaktivních odpadů. 30. dubna byla tamtéž přečerpána i vysoce radioaktivní voda z vertikální části betonového tunelu mimo turbínovou halu. Předtím ovšem bylo nutno potřebné prostory vyprázdnit – radioaktivní voda o celkové aktivitě 0,15TBq shromažďovaná v budově původně byla vypuštěna do moře – viz rozhodnutí TEPCO z 4. dubna výše.

Od 1. května také probíhalo odčerpávání vody nahromaděné v turbínové hale 6. reaktoru to provizorní šachty.

První **hodnocení události podle stupnice INES** deset hodin po události, které provedl japonský jaderný dozor (NISA) podle kritéria dopadu na ochranu do hloubky, odhadovalo stupeň 3 na blocích 1-3. K přehodnocení na stupeň 4 došlo 12. března večer na základě kritéria dopadu na radiologické bariéry. Dne 18. března následovalo zvýšení na úroveň 5, opět dle stejného kritéria, ovšem s podezřením na poškození paliva. **4. blok byl vyhodnocen jako stupeň 3 podle kritéria hloubkové ochrany. 12. dubna byla událost na blocích 1-3 revidována na nejvyšší, sedmý stupeň stupnice INES**, a to podle kritéria dopadu na okolí, resp. velikosti radioaktivního úniku.

Na fukušimskou havárii reagovala NISA 30. března vydáním nařízení k **implementaci konkrétních bezpečnostních opatření na dalších japonských jaderných elektrárnách**, která by měla zabránit poškození reaktorů následkem ztráty vnějšího napájení po vlně tsunami (s důrazem na zajištění/obnovu chladících funkcí za současné prevence radioaktivních úniků). Následovala **úprava bezpečnostního nařízení ohledně havarijních dieselgenerátorů** (9. dubna), podle kterého musí být nově na reaktor ve všech provozních režimech nejméně dva dieselgenerátory, které budou stále připraveny k použití. 15. dubna NISA vydala také **nařízení k zavedení opatření na zajištění externího napájení jaderných elektráren a závodů na zpracování paliva po výpadku napájení**.

Pozn.: výše uvedené reflektuje situaci dle informací dostupných do konce dubna 2011.

Přeskočíme podrobnosti průběhu nápravných činností během několika dalších měsíců, v nichž probíhala stabilizace postižené elektrárny a jen dodáme, že **dne 16. prosince 2011 japonský premiér oznámil dosažení stavu „studeného odstavení“ poničených reaktorů** (tj. snížení teploty chladiva pod 100°C a tlaku v reaktorové nádobě na úroveň okolí nebo 1 atmosféru a omezení radioaktivních úniků z primárního kontejnmentu za současného snížení ozáření populace s cílem dodržet limit 1mSv/rok). Tím ovšem práce na elektrárně zdaleka nekončí – kromě její postupné likvidace a dlouhodobého procesu obnovy jejího okolí bude pokračovat také stále podrobnější vyšetřování havárie, zejména upřesňování jejích kořenových příčin a zjišťování skutečného rozsahu poškození. Všechny poznatky budou mezinárodním společenstvím využity pro další posilování jaderné bezpečnosti a havarijní připravenosti v celém světě.

Informace o aktuálním stavu fukušimské elektrárny a jejího okolí stejně jako implementaci *roadmap* nabízí její provozovatel na svých webových stránkách (<http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/>).