

Rozhledy matematicko-fyzikální

Vladimír Wagner

Fukušima I po pěti letech

Rozhledy matematicko-fyzikální, Vol. 91 (2016), No. 2, 11–19

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/146663>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2016

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

Fukušima I po pěti letech

Vladimír Wagner, ÚJF AV ČR, Řež

Abstract. This year, we commemorate the fifth anniversary of the disaster in Japanese Fukushima I nuclear power plant (this article) and also the thirtieth anniversary of the Chernobyl accident in Ukraine (the following article). These have been the worst two nuclear power plant accidents and also the only ones to directly impact the environment. We will examine the present situation in both affected areas which are currently undergoing the recovery process heading to decommission of the reactors and to reconstruction and revitalization of the environment.

Havárie ve Fukušimě I

Havárie v jaderné elektrárně Fukušima I byla odstartována extrémní přírodní katastrofou. Dne 11. března 2011 zasáhlo japonské ostrovy extrémně velké zemětřesení, které mělo momentové magnitudo 9,0 a bylo největším přístrojově zaznamenaným zemětřesením v Japonsku a pátým největším na světě. Zemětřesení označované jako Velké zemětřesení Tohoku překonalo všechna očekávání. O jeho rozsahu svědčí i to, že délka trhliny podél zlomu byla 200 km a zóna sekundárních otřesů měla délku 500 km. Průměrné posunutí na zlomu bylo 10 m s maximy mezi 60 až 80 m. Přesto však pro jaderné elektrárny v oblasti neznamenal žádný problém. Zasunutí havarijních tyčí do aktivní zóny reaktoru zastavilo řetězovou štěpnou reakci a reaktory se odstavily. Zároveň začalo jejich dochlazování.

Největším zdrojem tepla v jaderném reaktoru je štěpná reakce, její zastavení je v případě problémů tím nejdůležitějším úkolem. Dalším zdrojem energie a tepla jsou však rozpady radioaktivních jader. Při štěpení dochází k rozdělení těžkého jádra na dvě středně těžká. Tyto štěpné produkty jsou většinou radioaktivní. Další možností vzniku radioaktivních prvků je záchyt neutronu jádrem. Většinou se jedná o jádro paliva, tedy uranu. Vznikají tak také nestabilní jádra, která se přeměňují. Při rozpadu radioaktivních jader se uvolňuje energie, která se přeměňuje na teplo. I po odstavení se tak reaktor musí chladit. Ze začátku jsou nejvýznamnější krátkodobé radionuklidy, jejichž aktivita je velmi vysoká. Produkce tepla je u nich velmi intenzivní, ale rychle klesá. Postupně se

však rozpadají a na celkové aktivitě mají stále větší podíl dlouhodobější radionuklidy. Aktivita i produkovaný tepelný výkon jsou stále nižší. Pokles se však postupně stále více zpomaluje. I po měsíci se tak tepelný výkon produkovaný rozpadem radioaktivních jader blížil u větších z fukušimských reaktorů k 5 MW.

Systémy, které zajišťují chlazení, jsou závislé na dodávce proudu. Jde hlavně o čerpadla. Jaderné elektrárny tak mají pro případ výpadku elektrického proudu několik nezávislých záložních zdrojů elektřiny. Jedná se hlavně o systém baterií a dieselové agregáty. Ty měly i japonské elektrárny zasažené zemětřesením. U některých z nich došlo k přerušení vedení, které dodávalo elektřinu ze sítě, ale naskočily popsané záložní zdroje. Problém tak způsobila až cunami, která do elektrárny Fukušima I dorazila zhruba po čtyřiceti minutách. V místě elektrárny měla výšku přes 14 m a s tím její projekt nepočítal. Vlna se tak dostala přes vlnolam, který byl pouze necelých šest metrů vysoký. Úroveň, na které stály budovy s reaktory a strojnami, byla pouhých deset metrů, a byly tak zaplaveny vodou o hloubce čtyři metry. Dieselové agregáty, baterie i důležité rozvody elektřiny byly bohužel umístěny v suterénu a příslušné prostory nebyly vodotěsné. Proto zpráva japonského parlamentu i komplexní rozbor Mezinárodní agentury pro atomovou energii konstatovaly, že havárie sice byla iniciována extrémní přírodní katastrofou, ale způsobila ji také lidská chyba [1, 2].

V jaderné elektrárně Fukušima I bylo celkově šest reaktorů. V době zemětřesení a cunami byly v činnosti první až třetí blok. Reaktor čtvrtého bloku byl bez paliva, všechno bylo v bazénu s vyhořelým palivem. Pátý a šestý blok byly v době zemětřesení odstavené. Zaplavením suterénu přišla elektrárna téměř o všechny zdroje elektřiny. Pracovníci elektrárny se tedy snažili využít akumulátory z aut i hasičské stříkáčkové mechanismy.

Aktivní zóna reaktoru, která obsahuje palivové soubory a ovládací mechanismy, je umístěna v tlakové nádobě. Ta se nachází v kontejneru. Jedná se o velmi pevnou hermeticky uzavřenou obálku z oceli a betonu, která má zabránit úniku radioaktivity do okolí. Kontejner je pak umístěn do reaktorové budovy, kde jsou veškerá servisní zařízení a také bazén, ve kterém jsou vyhořelé palivové soubory do doby, než se z budovy odvezou. Pokud chladicí okruhy reaktoru nedokážou zajistit dostatečný odvod tepla produkovaného v rozpadu radioaktivních jader, začne se voda v chladicím systému ohřívat a postupně proměňovat v páru. Pokud se chlazení nezajistí a dojde k vypaření vody a k postupnému odhalení paliva v aktivní zóně, začne rychle růst jejich teplota.

Palivové proutky jsou pokryty zirkonem, který brání pronikání těkavých štěpných produktů ven. V okamžiku, kdy teplota dosáhne zhruba 800 °C, začne zirkonový povrch v kontaktu s vodní párou oxidovat a z vody se uvolňuje vodík, velmi intenzivně pak po překročení teploty 1 200 °C. To je značný problém, který je zvětšen tím, že při zvyšujících se teplotách vzniká vodík i tepelným rozkladem vodní páry. Při dalším zvýšení teploty až na teplotu okolo 1 850 °C se pokrytí začne tavit. Oxid uraničitý, který se používá jako palivo, se taví až při teplotě 2 860 °C. Ovšem v reálné situaci je v palivovém souboru řada dalších materiálů a při velmi vysokých teplotách zde dochází k řadě složitých fyzikálních a chemických procesů. V reálných podmínkách se tak aktivní zóna reaktoru začíná pravděpodobně tavit už při překročení 2 200 °C. Tavenina pak stéká na dno tlakové nádoby reaktoru, jejíž stěnu může protavit. Může se tak dostat až na dno kontejnmentu. A právě roztavení aktivní zóny v různé míře nastalo u tří fukušimských reaktorů.

Jaké byly následky havárie?

V případě odpaření většího objemu vody dochází v kontejnmentu ke zvýšení tlaku. Aby nedošlo k jeho poškození a mohla se začít vstříkovat havarijní chladicí voda, je potřeba tlak snížit řízeným vypouštěním části páry z kontejnmentu. Ta však může obsahovat radioaktivní látky a před havarijní ventilací je potřeba evakuovat obyvatele z okolí elektrárny. V případě prvních tří reaktorů se nepodařilo provést ventilaci včas a obnovit chlazení před tím, než se jejich aktivní zóny poškodily. To znamená, že došlo i ke zmiňované produkci vodíku. U vodíku hrozí i při jeho relativně malé koncentraci ve vzduchu exploze, takže představuje značné riziko. V nových reaktorech, které mají kontejnment s velkým objemem, se instaluje zařízení, které dokáže vodík řízeně likvidovat. Fukušimské reaktory mají malý kontejnment a v jejich případě se problém s vodíkem řeší tak, že je kontejnment při provozu vyplněn dusíkem. Nemůže tam pak vzniknout výbušná směs vodíku a kyslíku.

Poté, co se podařilo dokončit evakuaci okolí elektrárny, začala řízená ventilace nejdříve prvního bloku. S párou se však dostal do vzduchu i vodík. Ten pronikl a nahromadil se také v horní části reaktorové budovy nad kontejnmentem. A tam došlo k výbuchu vodíku, který zdemoloval tuto horní část nad bazénem s vyhořelým palivem. Při ventilaci třetího bloku došlo ke stejné události. V tomto případě se však vodík dostal společným ventilačním systémem i do čtvrtého bloku, kde byla výbuchem

vodíku zničena i jeho horní část. U druhého bloku úlomky z výbuchů u sousedních bloků vyrazily část krytu. Porušila se tím hermetičnost horní části budovy, a vodík se tak při ventilaci tohoto bloku v jeho budově nehromadil. Zde tak k výbuchu vodíku a zničení horní části budovy nedošlo.

Po snížení tlaku vypouštěním páry se postupně nakonec podařilo zajistit dodávky chladicí vody do reaktorů. Ovšem v té době už byly aktivní zóny tří reaktorů roztavené, přičemž se do současnosti neví do jaké míry. Postupně se také podařilo doplňovat vodu do bazénů vyhořelého paliva. Pátý a šestý blok, které byly v době zemětřesení vypnuty, a jeden jejich dieselaagregát, který úder cunami vydržel, se podařilo zachránit. Po dvanácti dnech se podařilo obnovit dodávky proudu pro klíčová zařízení a mohlo se postupně začít s pracemi na stabilizaci situace v elektrárně.

Úniky radioaktivity nastaly až po evakuaci obyvatel z okolí elektrárny do vzdálenosti 20 km. Později se evakuovaly ještě některé silněji kontaminované oblasti na severozápad až do vzdálenosti téměř 50 km. Podrobně je velikost úniků radioaktivních látek a kontaminace popsána v [3]. Na územích ve vzdálenosti mezi dvaceti až třiceti kilometry se vyhlásila pohotovost a obyvatelé zde měli být připraveni na evakuaci v případě nutnosti. Ovšem velká část obyvatel z těchto oblastí raději odešla. Celkově se muselo úplně nebo částečně vyklidit dvanáct měst a vesnic. Ze svých domovů odešlo v maximum až 164 tisíc obyvatel. Je však třeba připomenout, že některé z nich z domovů vyhnala už cunami. Vlivem havárie jaderné elektrárny a radiace z ní nikdo neumřel a zdravotní dopady budou podle všech dosud existujících faktů zanedbatelné. Naopak samotná cunami celkově zabila 18 455 lidí, v prefektuře Fukušima to bylo přes 1 600 obyvatel.

Velkým problémem se stala velmi intenzivní kontaminace areálu elektrárny a také velké množství kontaminované vody. Ta pocházela ze tří zdrojů. Prvním byla voda přinesená cunami, druhým byla voda, která se neustále dodávala do areálu v počátečních stádiích chlazení bloků, třetím pak podzemní voda.

V prosinci 2011 se podařilo dostat zničené reaktory do stavu, že neohrožilo žádné nebezpečí nepředpovídaných jevů, například výbuchu vodíku či obnovy štěpné reakce. Zároveň se emise radioaktivních látek za hranice areálu elektrárny omezily na množství vedoucí k roční dávce nepřekračující hygienické limity. Dne 16. prosince 2011 se tak mohl vyhlásit stav studeného odstavení zničených reaktorů. To byla podmínka pro to, aby se mohla nastoupit cesta k likvidaci následků havárie a dekonta-

minaci a rekonstrukci zasažených území. Mohla se tak uvolnit omezení v okolí elektrárny a začít připravovat budoucí otevření zakázaných oblastí. Podrobněji je cesta ke studenému odstavení popsána v [4].

Čeho se dosáhlo během pěti let od havárie v areálu elektrárny

Během pěti let od havárie nastal jak v areálu elektrárny, tak v jejím okolí velmi významný pokrok. Dá se konstatovat, že v současné době už probíhá likvidace zničené elektrárny, i když je zatím v počátcích. Byla zahájena rekonstrukce a návrat obyvatel do zasažených oblastí a jejich významná část by měla proběhnout v následujících několika letech. Podívejme se, co se podařilo a jaké výzvy ještě před Japonci stojí. Nejdříve popíšeme situaci v areálu elektrárny.

Největší pokrok se podařilo udělat s bazény vyhořelého paliva. Problémem byl hlavně ten u čtvrtého bloku. Tam bylo velké množství palivových souborů, dohromady 1 535, a řada z nich byla čerstvě vytažená z reaktoru. Navíc byl bazén během výbuchu vodíku poškozen. V průběhu dvou let se odstranily trosky zničené horní části budovy, postavil se nový kryt u tohoto bloku a vybavil jeřáby schopnými manipulovat s palivovými soubory a kontejnery na ně. Dne 18. listopadu 2013 začala postupná přeprava palivových souborů z tohoto bazénu do společného bazénu v areálu a do konce roku 2014 se podařilo bazén čtvrtého bloku úplně vyklidit. U třetího bloku bylo troskek mnohem více a byla tam i vyšší radioaktivita. Vyvezení palivových souborů by mělo proběhnout v roce 2018. Jak již bylo zmíněno, budova druhého bloku zůstala nepoškozena. U prvního bloku je velká šance, že budou palivové soubory z něj vyvezeny do roku 2020.

Postupně probíhá dekontaminace a uklízení vnitřních částí budov tak, aby se zajistil přístup do míst, odkud se dá zkontrolovat stav kontejnmentu a hlavně jeho vnitřních částí. Zatím se podařilo do všech tří zničených reaktorů prostrčit endoskop s kamerou, teploměry a dozimetry. Ty zkontrolovaly, zda jsou teploměry, které se v kontejnmentu nacházely, v pořádku. Zjistilo se, že místa, kam endoskopy dohlédly, nebyla nijak významně poškozena. U prvního bloku se potrubím podařilo proniknout do nitra kontejnmentu speciálním robotům. Ty se v nataženém stavu podobají hadu a dokážou se pohybovat potrubím i o průměru 10 cm. Roboty se dostaly na roštovou podlažku v mezipatře kontejnmentu. Jeho spodní část je vyplněna vodou a nebyly vidět žádné zbytky paliva z aktivní zóny reaktoru, které se případně protavilo až na dno kontejnmentu. Roboty

nenaly výrazné poškození a zjistily, že přístup do spodních pater kontejnmentu je volný. Je tak možnost poslat tam v budoucnu odolné roboty schopné pracovat v těžkých podmínkách v radioaktivní vodě. Současné roboty vydržely v silně radioaktivním prostředí jen několik hodin.

Na proniknutí robotů do druhého bloku se pracuje. Podařilo se částečně dekontaminovat a vyklidit místo, které je pro vložení robota do potrubí vhodné. Zatím se však nepodařilo zajistit podmínky k tomu, aby pracovníci mohli poslat roboty i do tohoto kontejnmentu. Mělo by k tomu dojít v tomto roce.

U prvních dvou bloků se podařilo provést skenování kontejnmentu pomocí mionů z kosmického záření. Tyto částice vznikají při interakci vysokoenergetických částic kosmického záření v atmosféře. Miony lehce pronikají hmotou, i když hlavně velmi hustá hmota z těžkých prvků je dokáže absorbovat více. Pokud se tak detekovaly miony procházející zmíněnými reaktorovými budovami, bylo by v místě výskytu jaderného paliva temné místo. V podstatě se tak dá získat něco jako rentgenový snímek budovy. V místě předpokládané polohy aktivní zóny se však žádné stíny způsobené koncentrací uranu neukázaly.

Velmi důležitá je kontrola všech netěsností kontejnmentu pomocí robotů, kteří jsou schopni pracovat i ve vodě. Samotná likvidace zničených reaktorů už však bude trvat desetiletí.

Oblastí, kde se podařilo dosáhnout velkého pokroku, je vypořádání se s radioaktivní vodou v areálu elektrárny. Popsali jsme tři zdroje této vody. Z nich zůstal pouze ten třetí, kterým je podzemní voda. Okolo 400 tun denně přitékalo do silně znečištěného okolí čtyř zničených bloků a kontaminovalo se. Tato voda se musela odčerpávat a ukládat v nádržích. Celkově se ze všech zdrojů nahromadilo více než 600 000 tun radioaktivní vody. Postupně se podařilo vybudovat zařízení, které napřed odstranilo dominantní část radioaktivity představovanou radionuklidy cesia 137 a stroncia 90, později pak všechny ostatní radionuklidy kromě tritia. Tritium je těžký izotop vodíku, který nelze chemicky z vody odstranit, proto se takto dekontaminovaná voda zatím skladuje v nádržích.

Snížení přírůstku kontaminované vody až pod deset tun za den by měla umožnit ledová stěna okolo čtveřice zničených bloků, která byla dokončena začátkem roku 2016. Její celková délka je zhruba 1,4 km. Skládá se z velkého počtu vertikálních trubek, které sahají až do hloubky 35 m. Proudí v nich solanka, která má teplotu hluboko pod bodem mrazu. Zemina okolo trubek zmrzne a vytvoří se ledová stěna. Její obrovskou výhodou je, že při jejím porušení a proniknutí vody trhlinami tato voda

zmrzne a trhliny ucpe. Stěna tak zabrání pronikání podzemní vody do okolí reaktorových budov. V březnu se začala stěna testovat a její postupné plné zprovoznění se uskuteční během roku 2016.

Úniky radioaktivní vody do moře znemožnila stěna, která se vybudovala okolo přístaviště za vlnolamem a také odčerpání radioaktivní vody z různých kanálů a jejich vyplnění betonem.

Po odčerpání a dekontaminaci veškeré znečištěné vody se musí vyřešit otázka jediné radioaktivity, která v ní zůstane. Jak už bylo zmíněno, nelze těžký vodík ve vodě chemicky oddělit. Metody jeho separace jsou tak velmi náročné. Firmy ve Spojených státech a v Rusku na žádost Japonska testují technologie pro hromadnější separaci tritia. Tritium je však normální součástí životního prostředí. Vzniká interakcí kosmického záření v atmosféře. Při dostatečném zředění, které dostane jeho koncentraci pod hygienické limity, je možné je bez dopadů na životní prostředí vypouštět do moře.

Co se podařilo udělat pro obnovu zasažených území

Nejdůležitější podmínkou pro revitalizaci zasažených oblastí je vedle dekontaminace obnova infrastruktury a tradičních výrob. Velice důležité bylo, že evakuace proběhla před úniky radioaktivních látek z elektrárny. Japonsko mělo dostatek možností nahradit potraviny ze zasažené oblasti a provádět velmi přísnou kontrolu kontaminace zemědělských produktů. To vše zajistilo, že obdržené efektivní dávky, které popisují biologické účinky radiace na obyvatele, byly velmi malé a zdravotní dopady budou zanedbatelné. Dramatickým zásahem do života lidí však byla evakuace. Proto je důležité, kdy a do jakých podmínek bude probíhat návrat obyvatel do svých domovů.

V prosinci 2011, kdy se vyhlásilo studené odstavení zničených reaktorů a elektrárna přestala představovat nebezpečí, byla odvolána všechna omezení mimo zakázanou zónu. Obyvatelé se tak mohli vracet do města Hirono, které celé leželo ve vzdálenosti větší než 20 km od elektrárny a jeho kontaminace byla menší. V roce 2014 se po dekontaminaci mohli začít vracet obyvatelé do evakuovaných oblastí města Tamura a vesnice Kawauči.

Pro návrat obyvatel je kromě dekontaminace nezbytná obnova infrastruktury a také pracovních příležitostí. Silniční a železniční doprava přes zakázanou zónu se začala obnovovat na přelomu roku 2014 a 2015. Železniční spojení začalo koncem ledna 2015, i když přes zakázanou zónu

fungovala náhradní autobusová doprava. V březnu 2015 pak začal provoz na dálnici Džóban.

Velice důležitá je obnova tradičního zemědělství a rybolovu. Pro tuto oblast je typická produkce rýže a skotu. Žily zde farmářské rody, které mají staletou tradici. Proto se snaží o obnovu svých farem i po havárii. Prioritou byla intenzivní dekontaminace a také velmi přísná kontrola veškeré produkce. V letech 2014 a 2015 začaly postupně pracovat i některé rýžové farmy na evakuovaných územích. Počet nalezených kontaminovaných vzorků se stále zmenšuje i u úlovků rybářů. Je tak možné lovit stále širší sortiment ryb a také zakázaná zóna okolo elektrárny se postupně zmenšuje.

V dubnu 2015 se otevřelo první velké město ležící v evakuované oblasti. Z města Naraha muselo odejít téměř 8 000 obyvatel. Podle posledních průzkumů se k návratu chystá zhruba polovina z nich. V tomto městě se začalo budovat velké technologické a výzkumné centrum, které je zaměřeno na elektroniku, robotiku a technologie potřebné k likvidaci zničených reaktorů. Předpokládá se, že zde bude pracovat několik tisíc vysoce vzdělaných pracovníků. Zároveň se ke svému původnímu poslání začíná vracet J-vesnice v tomto městě. Původně to bylo středisko pro trénink fotbalové reprezentace. Po havárii sloužilo jako zázemí pro pracovníky podílející se na likvidaci havárie ve Fukušimě I. Nyní se toto zázemí přesouvá blíže k elektrárně do města Tomioka a komplex v Naraze se po rekonstrukci vrátí fotbalistům a bude sloužit jako zázemí v době Olympijských her v Tokiu v roce 2020.

Předpokládá se, že v následujících dvou letech se otevře většina evakuovaných území. Uzavřena tak zůstanou pouze nejsilněji zamořená území. Zde je třeba dokončit intenzivní dekontaminaci a jejich obnova bude mnohem náročnější. Přesto by se toho mělo dosáhnout do roku 2022.

Závěr

Havárie ve Fukušimě I je druhou největší v historii využívání jaderné energetiky. Byla následkem jedné z největších přírodních katastrof, které postihly Japonsko. Zároveň však k rozsahu následků havárie přispělo i lidské pochybení. Hlavně to, že záložní energetické zdroje byly umístěny v suterénu budov v prostorách, které nebyly vodotěsné. Cunami je tak zaplavila. Díky konstrukci a hlavně kontejnmentu byly úniky radioaktivních látek omezeny, obyvatelstvo mohlo být včas evakuováno a také pracovníci v elektrárně se mohli na zhoršené radiační podmínky připra-

vit. Proto jsou zdravotní dopady radiace zanedbatelné. Naopak psychické a sociální následky evakuace jsou značné a právě sem je třeba zaměřit pomoc.



Obr. 1: Letecký pohled na areál elektrárny Fukušima I v roce 1975 (sever je napravo). Copyright © National Land Image Information (Color Aerial Photographs), Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism of Japan.

Literatura

- [1] *Zpráva nezávislé komise japonského parlamentu.*
http://www.nirs.org/fukushima/naiic_report.pdf a
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3856371/naiic.go.jp/en/>.
- [2] IAEA: *The Fukushima Daiichi Accident, Report by the Director General.*
<http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1710-ReportByTheDG-Web.pdf>, 2015.
- [3] Povinec, P. P., Hirose, K., Aoyama, M.: *Fukushima accident: Radioactivity impact on the environment.* Elsevier, 2014.
- [4] Wagner, V.: *Fukušima I poté.* Novela Bohemica, 2015.