



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

PO FUKUŠIMSKÁ OPATŘENÍ V JADERNÉ ENERGETICE

POST-FUKUSHIMA MEASURES IN NUCLEAR ENERGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN BÁRTA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADOMÍR CHÝLEK, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Martin Bárta
Studijní program:	Základy strojího inženýrství
Studijní obor:	Základy strojího inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Radomír Chýlek, Ph.D.
Akademický rok:	2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Po fukušimská opatření v jaderné energetice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Po havárii na elektrárně Fukušima byly přezkoumány a zhodnoceny získané poznatky. Na základě těchto informací byly identifikovány oblasti, které vyžadovaly zásadní zlepšení, především v oblasti ochrany před přírodními katastrofami, krizového řízení a záložních systémů napájení. Tato rešeršní práce bude zaměřena na druhy technických a provozních opatření, které přijaly jaderné elektrárny v ČR a ve světě.

Cíle bakalářské práce:

Cílem této rešeršní práce je zmapovat jaká opatření přijaly jaderné elektrárny v ČR po fukušimské havárii.

Druhá část práce se zaměří na přehled opatření, která byla přijata v jiných zemích světa a jaké změny země implementovaly do svých národních politik v oblasti jaderné bezpečnosti.

V poslední části této práce bude provedeno srovnání mezi opatřeními, která byla realizována nebo jsou zvažována v České republice, a opatřeními přijatými v jiných státech světa. Cílem této části je identifikovat klíčové rozdíly a podobnosti v přístupu k zajištění bezpečnosti a posoudit, jaký vliv mají přijatá opatření na prevenci potenciálních rizik.

Seznam doporučené literatury:

STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. Po fukušimský Národní Akční Plán (NAcP) na posílení jaderné bezpečnosti jaderných zařízení v České republice. Online. In: . S. 85. Dostupné z: https://sujb.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/jaderna-bezpecnost/Cesky_NAcP_Rev5_final__002_.pdf. [cit. 2024-09-26].

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. IMPLEMENTATION AND EFFECTIVENESS OF ACTIONS TAKEN AT NUCLEAR POWER PLANTS FOLLOWING THE FUKUSHIMA DAIICHI ACCIDENT. Online. 1930. IAEA, 2020. ISBN 978-92-0-120720-3. Dostupné z: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1930web.pdf>. [cit. 2024-09-26].

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá opatřeními přijatými v jaderné energetice po havárii jaderné elektrárny Fukušima Daiichi v roce 2011. Práce se zaměřuje na technické parametry elektrárny a průběh havárie. Analyzuje přístup k zátěžovým testům, technickým opatřením, modernizaci a změnám regulace v České republice, Japonsku, Jižní Koreji, Francii, Německu, USA a Kanadě. Součástí práce je srovnání provedených bezpečnostních opatření realizovaných v uvedených zemích. Toto srovnání umožňuje zjistit rozdíly a podobnosti v přístupu k posílení jaderné bezpečnosti v jednotlivých zemích. Práci doplňují vlastní fotografie technických opatření havarijní připravenosti v jaderné elektrárně Temelín po havárii.

Klíčová slova

Fukušima, jaderná energetika, jaderná elektrárna, jaderná bezpečnost, zátěžové testy, nouzové systémy

Summary

This bachelor thesis focuses on the measures taken in the nuclear power industry after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident in 2011. The thesis focuses on the technical parameters of the plant and the timeline of the accident. It analyses the approach to stress testing, technical measures, upgrading and regulatory changes in the Czech Republic, Japan, South Korea, France, Germany, USA and Canada. The work contains a comparison of the safety measures implemented in these countries. This comparison allows to identify differences and similarities in the approach to enhance nuclear safety in each country. The thesis is supplemented with original photographs from the Temelín Nuclear Power Plant, documenting safety measures implemented there after the Fukushima accident.

Keywords

Fukushima, nuclear energy, nuclear power plant, nuclear safety, stress tests, emergency systems

Bibliografická citace

BÁRTA, Martin. *Po fukušimská opatření v jaderné energetice*. Brno, 2025. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Ing. Radomír Chýlek, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Radomíra Chýlka, Ph. D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrázků a textu, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu zdrojů.

Martin Bárta

Poděkování

Na tomto místě chci poděkovat mému vedoucímu práce Ing. Radomíru Chýlkovi, Ph.D za cenné rady, trpělivost a připomínky. Také chci poděkovat za exkurzi do jaderné elektrárny Temelín.

Martin Bárta

Obsah

Úvod	11
1 Jaderná elektrárna Fukušima Daiichi	12
1.1 Technické parametry elektrárny	12
1.2 Průběh havárie	13
1.2.1 Zemětřesení a tsunami	14
1.2.2 První fáze odezvy	14
1.2.3 Tavení paliva a vznik vodíku	15
1.2.4 Odvzdušňování tlakové nádoby reaktoru a výbuchy vodíku	16
1.2.5 Bazén s vyhořelým palivem	16
1.2.6 Dlouhodobá stabilizace	17
2 Opatření přijatá v ČR po fukušimské havárii	21
2.1 Zátěžové testy českých jaderných elektráren	21
2.1.1 Průběh zátěžových testů	21
2.1.2 Výsledky zátěžových testů	22
2.1.3 Mezinárodní hodnocení	22
2.2 Technická opatření a modernizace	23
2.2.1 Modernizace havarijních a pomocných systémů	23
2.2.2 Řízení těžkých havárií	24
2.2.3 Kontroly bezpečnosti a životnosti	32
2.2.4 Využití projektových rezerv	33
2.3 Organizační a legislativní opatření	33
2.3.1 Změny jaderné legislativy	33
2.3.2 Posílení regulačního dozoru	34
2.3.3 Plány na mimořádné události	35
3 Opatření přijatá v jiných zemích	38
3.1 Asie	38
3.1.1 Japonsko	38
3.1.2 Jižní Korea	41
3.2 Evropa	44
3.2.1 Francie	44
3.2.2 Německo	50
3.3 Severní Amerika	51
3.3.1 Spojené státy americké	51
3.3.2 Kanada	52
3.4 Další země	56
4 Srovnání opatření přijatých ve vybraných státech světa	58
4.1 Založení regulačních orgánů	58
4.2 Zátěžové testy	58
4.3 Záložní napájení a chlazení	59
4.4 Srovnání počtu reaktorů před havárií a v roce 2025	59

Závěr	61
Seznam použitých zdrojů	62
Seznam použitých zkratek	77

Úvod

Jaderné elektrárny jsou stálým zdrojem bezemisní elektrické energie a v dalších letech budou hrát významnou roli při snižování uhlíkové stopy. Jaderné elektrárny pomáhají stabilizovat energetickou soustavu a doplňují obnovitelné zdroje, které jsou často závislé na proměnlivých podmínkách. Kvůli přítomnosti radioaktivních materiálů ale vyžadují přísná bezpečnostní opatření. Bezpečnostní opatření je nutné neustále aktualizovat, aby se snížilo riziko havárie a v případě jejího vzniku minimalizovalo nebezpečí úniku radioaktivity, čímž se zajistí ochrana obyvatelstva a životního prostředí. K největším přehodnocením bezpečnostních opatření došlo po haváriích v Three Mile Island (USA), Černobyli (SSSR) a Fukušimě Daiichi (Japonsko).

Tato práce se bude věnovat technickým parametrům jaderné elektrárny Fukušima Daiichi a průběhu havárie ve Fukušimě od iniciace až po její dlouhodobé řešení. Budou popsány příčiny havárie a následné problémy s chlazením reaktorů a bazénů s vyhořelým palivem až po vznik výbušného vodíku. Dále budou popsána přijatá opatření v České republice, která vyplynula ze zátěžových testů českých jaderných elektráren Temelín a Dukovany provedených po havárii. Zátěžové testy se zaměřily na extrémní přírodní podmínky.

Ve druhé části budou rozebrána opatření v zemích jako Japonsko, Jižní Korea, Francie, Německo, USA a Kanada. Bude kladen důraz na popsání technických vylepšení, legislativních opatření a přístupu jednotlivých vlád. V této části budou popsány bezpečnostní prvky Evropského tlakovodního reaktoru a tlakovodního reaktoru CANDU moderovaného a chlazeného těžkou vodou.

V poslední části bude provedeno srovnání opatření přijatých zeměmi, které jsou rozebrány v druhé části. Toto srovnání poskytne přehled, jak státy reagovaly na podobná rizika a jaká technická či organizační opatření zavedly, aby minimalizovaly následky budoucích havárií.

1 Jaderná elektrárna Fukušima Daiichi

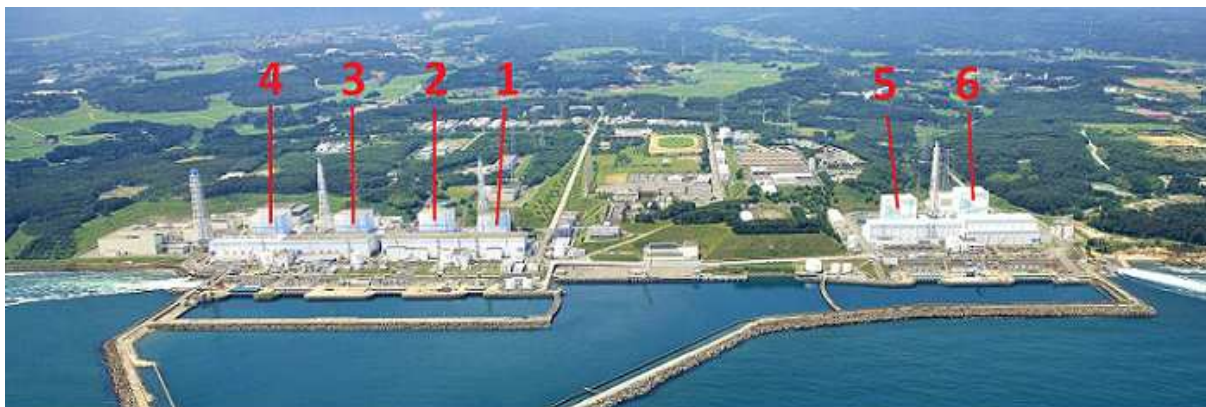
Jaderná havárie ve fukušimské elektrárně se řadí jako druhá nejzávažnější jaderná katastrofa v historii, která zásadně ovlivnila pravidla v jaderné bezpečnosti a celkové strategické úvahy na celém světě. Tato kapitola se věnuje technickým zařízením elektrárny a analyzuje průběh celé havárie, která začala 11. března 2011. Uvědomění si těchto faktů je důležité pro pochopení dalších bezpečnostních opatření, která byla po fukušimské havárii následně zavedena v jaderných elektrárnách po celém světě.

1.1 Technické parametry elektrárny

Jaderná elektrárna Fukušima Daiichi se nachází na ploše 350 hektarů ve městech Ōkuma a Futaba v japonské prefektuře Fukušima. Zařízení vlastnila a provozovala společnost Tokyo Electric Power Company (TEPCO). Výstavba elektrárny byla zahájena 25. července 1967 a první blok byl uveden do provozu 26. března 1971. [1]

Lokalita byla původně umístěna na srázu ve výšce 35 metrů nad mořem. Během výstavby však společnost TEPCO udělala zásadní rozhodnutí snížit výšku terénu o 25 metrů. Tato změna byla provedena ze dvou hlavních důvodů. Umožnila výstavbu základny reaktorů na pevném skalním podloží, čímž se zvýšila odolnost proti zemětřesení, a zároveň vedla ke snížení provozních nákladů na čerpání mořské vody. Toto rozhodnutí se později ukázalo jako rozhodující při příchodu tsunami. [2]

Při pohledu z oceánu se v areálu elektrárny Fukušima Daiichi nachází dvě samostatné skupiny reaktorů, jak je také vidět na obr. 1. V levé skupině jsou bloky 1 až 4, zatímco v pravé skupině jsou novější bloky 5 a 6, které jsou postaveny v mírně vyšší nadmořské výšce. Mořské valy byly postaveny jako ochrana jaderné elektrárny před oceánskými vlnami, avšak jejich výška nebyla dostatečná k zastavení ničivé tsunami. [3]



Obrázek 1: Letecký snímek fukušimské elektrárny, převzato a upraveno z [3].

Elektrárna se skládala ze šesti varných reaktorů (BWR — Boiling Water Reactor) s celkovým výrobním výkonem 4 696 MW a řadila se mezi 20 nejvýkonnějších elektráren na světě [1]. Reaktory byly dodány různými výrobci: bloky 1, 2 a 6 dodala společnost

souhrnný přehled o průběhu havárie v elektrárně Fukušima Daiichi a vytváří základ pro pochopení následných bezpečnostních opatření po havárii.

1.2.1 Zemětřesení a tsunami

Dne 11. března 2011 ve 14:46 místního času zasáhlo východní pobřeží Japonska silné zemětřesení o síle 9 stupňů RichtEROVY škály. Zemětřesení nezpůsobilo škody na bezpečnostních systémech reaktoru, ale spustilo automatické odstavení reaktorů 1, 2 a 3 v elektrárně, zatímco reaktory 4, 5 a 6 již byly odstaveny z důvodu plánované údržby. Zpočátku elektrárna reagovala podle projektu, byly zasunuty regulační tyče, aby se zastavila řetězová štěpná reakce, a automaticky se spustily nouzové diesellové generátory, když došlo ke ztrátě napájení v důsledku poškození přenosové sítě zemětřesením. [10]

Přibližně 50 minut po zemětřesení dorazila do elektrárny vlna tsunami vyvolaná seismickou událostí. Vlna tsunami výrazně převýšila původní projektované odhady, když dosáhla přibližně 14 metrů, což bylo výrazně více než 5,7 metru vysoký mořský val určený k ochraně elektrárny [10]. Tsunami zaplavila areál elektrárny, pronikla do budov a vážně poškodila klíčová zařízení. Zatopení vyřadilo 12 ze 13 nouzových diesellových generátorů a zničilo elektrické rozvody. Došlo k úplné ztrátě elektrického napájení a pro přístrojové a řídicí systémy bylo k dispozici pouze omezené množství energie z baterií [11].

Bezprostředně po příchodu hlavní vlny tsunami 11. března v 15:36 společnost TEPCO v souladu s čl. 10 odst. 1 zákona o zvláštních opatřeních týkajících se připravenosti na jaderné havárie informovala úřad pro bezpečnost jaderného průmyslu (NISA — Nuclear and Industrial Safety Agency) o úplné ztrátě napájení elektrárny střídavým proudem. Toto oznámení bylo učiněno 11. března v 15:42. [12]

1.2.2 První fáze odezvy

Ztráta střídavého proudu mimo elektrárnu a nouzového napájení na místě způsobila situaci, která přesahovala projektovanou havárii při návrhu elektrárny. Bez střídavého napájení nemohla fungovat většina havarijních systémů chlazení aktivní zóny. [6]

Na bloku 1 se automaticky spustily IC (viz obr. 2), které byly před příchodem tsunami zastaveny operátorem. Po příchodu tsunami již nebylo možné IC spustit kvůli výpadku elektrické energie. [6]

Japonská agentura pro jadernou a průmyslovou bezpečnost oznámila 11. března přibližně v 18:00, že tlak v tlakové nádobě reaktoru (TNR) prvního bloku vzrostl přibližně na dvojnásobek provozní hodnoty. Na toto zvýšení tlaku měl přímý vliv výpadek elektrické energie, který zastavil chladicí systém TNR. Za běžného provozu zajišťují chlazení TNR vodou chlazené klimatizační jednotky. Ty využívají elektricky poháněná čerpadla k cirkulaci chladicí vody a ventilátory, které vhánějí vzduch přes kovové trubky s chladicí kapalinou do TNR. Když došlo k výpadku elektrické energie, čerpadla i ventilátory přestaly fungovat a to znemožnilo chlazení TNR. [13]

Protože z horké TNR s teplotou přes 260 °C a horkého potrubí nadále sálalo teplo, teplota vzduchu v kontejnmentu se rychle zvyšovala a to vedlo k nárůstu tlaku. Tento zvyšující se tlak představoval vážný problém, protože snižoval schopnost kontejnmentu absorbovat energii, která by se mohla uvolnit při prasknutí primárního potrubí. Hrozilo přetlakování kontejnmentu, které mohlo způsobit jeho porušení. [13]

Protože ve všech blocích došlo k vybití baterií, operátoři ztratili možnost sledovat kritické parametry, jako je hladina a tlak vody v reaktoru. Do večera 11. března se hladina

vody v reaktoru 1. bloku snížila a to vedlo k obnažení paliva a počátku poškození aktivní zóny. [14] Ve 21:00 vydaly úřady příkaz k evakuaci obyvatel v okruhu 1,9 km od elektrárny. [8].

Přestože byl v blízkosti úřadu předsedy vlády v Tokiu zřízen štáb pro reakci na jadernou havárii, který vedl sám předseda vlády, a v prefektuře Fukušima asi 5 km západně od elektrárny byl zřízen místní štáb pro reakci na jadernou havárii, plný provoz místního štábu se kvůli nedostatku elektrické energie a poškození dálnic a silnic zpozdil přibližně do 15. března. Kvůli tomuto zpoždění byla koordinace mezi národní a místní vládou při nařizování, provádění a potvrzování evakuace a dalších ochranných opatření komplikovaná. [12]

1.2.3 Tavení paliva a vznik vodíku

Ráno 12. března se situace dále zhoršovala. Na prvním bloku se palivo zcela odkrylo, to vedlo k reakcím zirkonia s vodou, při nichž vznikal plynný vodík a zároveň se vytvářelo další teplo, viz rovnice (1.1). Tyto exotermické reakce urychlily proces tavení aktivní zóny a zvýšily tlak v TNR. [14]



Postup tavení aktivní zóny měl na každém bloku odlišný průběh. V případě 3. bloku podrobná simulační analýza pomocí softwaru MELCOR ukazuje, že hladina vody v TNR klesla na horní hranici aktivní zóny přibližně za 36 hodin po zemětřesení. Systém nouzového chlazení aktivní zóny reaktoru na 3. bloku fungoval déle než na 1. bloku, což oddálilo nástup poškození aktivní zóny. Se zhoršujícími se podmínkami však přibližně za 40,7 hodiny po zemětřesení došlo k prasknutí pláště palivových tyčí a jejich prasknutí vedlo k uvolnění těkavých štěpných produktů. [15]

Jedním z kritických hledisek procesu tavení aktivní zóny bylo tavení regulačních tyčí. Výzkum simulující tyto podmínky ukázal, že v různých výškách uvnitř aktivní zóny se složení kovových úlomků výrazně změnilo v důsledku přesunu ocelových prvků pod vlivem boru a uhlíku [16]. Tento proces byl doprovázen tvorbou vrstev s vysokým bodem tání, které ovlivnily postup taveniny a následné přemístění materiálů. [17].

Pozastavený přívod vody do 3. bloku v čase od 55,5 do 63,2 hodiny po zemětřesení vedl k dalšímu tavení a pohybu jádra aktivní zóny. Při pohybu trosk do spodní části vznikala další vodík z reakce kovu s vodou. Simulace ukazují, že do 72 hodin po zemětřesení bylo oxidováno přibližně 50 % zirkonia ve 3. bloku, ačkoli spodní část TNR reaktoru zůstala neporušená. [15]

Protože se podmínky ve třech postižených reaktorech zhoršily, 12. března večer byla evakuační zóna rozšířena na 20 km od elektrárny. Od 20 do 30 km od elektrárny bylo pro určení evakuace použito kritérium dávkového příkonu 20 mSv/rok. [11]

Postup havárie na druhém a třetím bloku měl podobný průběh, ale s určitým zpožděním. Nouzové chladicí systémy aktivní zóny reaktoru na těchto blocích fungovaly i nadále po delší dobu a to oddálilo nástup poškození aktivní zóny. Tyto systémy však nakonec selhaly v důsledku vysoké teploty prostředí a nedostatku stejnosměrného proudu pro řízení. [14]

1.2.4 Odvzdušňování tlakové nádoby reaktoru a výbuchy vodíku

Kvůli těmto obavám společnost TEPCO provedla opatření ke snížení tlaku v TNR u těch bloků, které nemohly potvrdit dostatečné doplňování vody systémem nouzového chlazení aktivní zóny reaktoru, aby byla plně zajištěna bezpečnost. Snížení tlaku bylo provedeno odvětráváním páry z kontejnmentu přes ventilační systém, který procházel vysoce účinným filtrem částic a uhlíkovými filtry, aby se odstranilo co nejvíce radioaktivity, než byl vypuštěn z vysokého komína, kde se zředil s okolním vzduchem. Ztráta napájení však provoz těchto systémů zkomplikovala. [13]

Rozhodnutí o odvzdušnění kontejnmentu postavilo personál elektrárny před obtížnou volbu. Pokud nedošlo k výraznému poškození aktivní zóny reaktoru, vzduch vypouštěný z kontejnmentu bude obsahovat nepatrné, ale zjiřitelné množství radiace. Filtrační systémy byly navrženy tak, aby toto uvolňování radioaktivity snížily téměř stonásobně. Důkazy však naznačovaly, že již došlo k významnému poškození aktivní zóny, což vyvolalo obavy z možného úniku radioaktivity. [13]

Dne 12. března došlo v budově reaktoru 1. bloku k výbuchu vodíku, který zničil vrchní část budovy reaktoru [11]. Tento výbuch byl výsledkem nahromadění plynného vodíku v budově reaktoru uvolněného při odvzdušňování TNR. Vodík, který vznikl reakcí zirkonia s vodou v přehřáté aktivní zóně, se během odvzdušňování dostal z primárního kontejnmentu do budovy reaktoru. [18]

14. března poškodil silnější výbuch reaktorovou budovu 3. bloku. Podle simulací softwarem MELCOR byl tento výbuch způsoben vodíkem, který se nahromadil v horním prostoru reaktorové budovy. Pozastavení dodávek vody v době od 55,5 do 63,2 hodiny po zemětřesení přispělo ke zvýšené produkci vodíku, která nakonec vedla k tomuto výbuchu. [15] Tento výbuch rovněž poškodil zařízení sloužící 2. bloku a vyvolal poškození aktivní zóny i na tomto bloku. Úroveň Mezinárodní stupnice jaderných událostí byla pro tuto situaci zvýšena na 5. stupeň a diskutovalo se o jejím dalším zvýšení na 6. stupeň. [14]

Dne 15. března výbuch vážně poškodil reaktorovou budovu 4. bloku, přestože byl reaktor před nehodou odstaven. Tento výbuch byl také způsoben vodíkem, který pravděpodobně unikl ze třetího bloku přes společné ventilační systémy. K dalšímu výbuchu došlo také na 3. bloku a v blízkosti tohoto reaktoru byla naměřena úroveň radiace 400 mSv/h. [8]

Tyto vodíkové exploze značně zkomplikovaly havarijní zásah, protože vytvořily vysoce nebezpečné podmínky, rozptýlily radioaktivní úlomky po celém areálu a poškodily dočasné napájecí kabely a hadice, které byly rozmístěny v rámci havarijního zásahu. [9, 12]

1.2.5 Bazén s vyhořelým palivem

Kromě problémů s aktivní zónou reaktoru vzrostly obavy o stav bazénů s vyhořelým palivem (SFP — Spent Fuel Pool) v poškozených reaktorových budovách. Ztráta chlazení těchto bazénů vyvolala obavy z poškození paliva a dalších úniků radioaktivity. Mimořádné obavy vzbuzoval SFP 4. bloku, který obsahoval plnou aktivní zónu z nedávných údržbových činností. [19]

Dne 17. března byly na 3. a 4. bloku nasazeny vrtulníky [8], které měly shazovat vodu do SFP, ačkoli se tento postup ukázal jako poměrně neúčinný kvůli radioaktivitě a rozptýlu vody větrem. O chlazení se také pokoušela požární čerpadla, ale účinnějšího chlazení bylo později dosaženo pomocí nákladního čerpadla na beton M58-5 s vertikálním dosahem 58 m a pětiramenným výložníkem k přesné dodávce chladící vody přes poškozené

konstrukce, viz obr. 3. Jeho diesellový motor umožňoval nezávislý provoz bez externího napájení a dálkové ovládání umožňovalo flexibilní pohyb ramene pro cílené chlazení. [20]



Obrázek 3: Putzmeister M58-5 čerpá vodu do SFP 4. bloku, převzato z [21].

Odstraňování vyhořelého paliva z SFP probíhalo v několika fázích. U 4. bloku bylo odstraňování 1 535 palivových souborů dokončeno v prosinci 2014 [22]. U 3. bloku odstraňování 566 palivových souborů do centrálního bazénu vyhořelého paliva začalo v polovině dubna 2019 a bylo dokončeno na konci února 2021 [23]. Od roku 2017 probíhají u 1. bloku přípravné práce na odstranění 392 palivových souborů, které zahrnují demontáž krytu reaktorové budovy, odklizení sutě a zajištění stability stropního jeřábu a zařízení pro manipulaci s palivem [24]. Odstraňování vyhořelého paliva však dosud nebylo zahájeno [24]. V reaktorové budově 2. bloku proběhly průzkumné práce a byla zahájena výstavba zařízení určeného k manipulaci s palivem [25]. Samotné odstraňování 615 palivových souborů však dosud nezačalo [25]. V 5. bloku zůstává uloženo 1 542 palivových souborů [26]. V 6. bloku probíhá odstraňování celkem 1 884 palivových souborů, přičemž k 24. březnu 2025 již bylo vyjmuto 1 245 z nich [26].

1.2.6 Dlouhodobá stabilizace

Od 17. března začaly snahy o řešení mimořádných událostí vykazovat postupný pokrok. Byly zahájeny stavební práce na připojení elektrárny k externímu zdroji napájení. Dne 18. března dorazilo 30 hasičských vozů hasičské jednotky z Tokia a začalo čerpat vodu do postižených reaktorů a SFP. [8]

Dne 20. března pracovníci úspěšně připojili napájení k 2. bloku. EDG zajišťující napájení 5. a 6. bloku byly opraveny a proto byly oba bloky uvedeny do stavu studené odstávky. [27] Situace na blocích 1 až 3 však zůstávala kritická, přičemž ve všech třech reaktorech byly patrné známky značného poškození aktivní zóny a tavení paliva. [28]

Od 25. března začalo nahrazování chlazení mořskou vodou systémy vstřikování sladké vody v blocích 1, 2 a 3 [14]. Nahrazení mořské vody sladkou při vstřikování do reaktorů snížilo riziko koroze způsobené mořskou vodou. Výzkumy ukázaly, že nízkolegovaná ocel, běžně používaná v TNR, je proti mořské vodě citlivá, přičemž v počátečních fázích

docházelo ke korozi rychlostí 0,07 mm za hodinu. Přechod na sladkou vodu pomohl toto riziko snížit. [29]

V prostoru šachty určené k uložení přívodních kabelů nedaleko sání 2. bloku byly naměřeny dávky radiace přesahující 1 000 mSv/h, což je velmi vysoká hodnota, viz tab. 1. Na jedné ze stěn šachty, odkud unikala voda, byla objevena trhлина o délce 20 cm. [28] Úniky v šachtě přetrvávaly a mezi 1. a 6. dubnem se z 2. bloku uvolnilo do Tichého oceánu přibližně 520 tun radioaktivní vody [30]. Práce na zastavení úniku byly zahájeny 5. dubna, kdy bylo do šachty s trhlinou aplikováno tekuté sklo. Únik se podařilo zastavit 6. dubna. [30]

Tabulka 1: Dávky a účinky vystavení ionizujícímu záření, převzato a upraveno z [31].

Dávka [mSv]	Účinek
0,1—0,3	Rentgen hrudníku
3—4	Světový průměr dávky za rok vystavení záření
0,6—2,7	Žaludeční radiografie
7—20	CT vyšetření
50	Roční limit dávky pro pracovníky v radiačním prostředí
200	Celoživotní expozice přírodnímu záření
500	Pokles lymfocytů, šedý zákal
1 000	Akutní radiační poškození, nevolnost, zvracení
2 000	5 % exponovaných umírá během několika týdnů
3 000—5 000	50 % exponovaných umírá během několika týdnů
7 000—10 000	95 % exponovaných umírá během několika týdnů
20 000—60 000	Mozkový edém, respirační selhání, průjem, horečka, oběhové selhání do 1—2 týdnů
100 000	Okamžité kóma, smrt během hodin

Dne 7. dubna 2011 byly spuštěny systémy inertizace dusíkem s cílem minimalizovat riziko dalších vodíkových explozí. Tyto systémy dodávaly plynný dusík do kontejnmentu, čímž vytlačovaly kyslík a snižovaly pravděpodobnost vznícení vodíku. Toto opatření hrálo zásadní roli při prevenci dalších výbuchů a stabilizaci poškozených reaktorů. [32]

Dne 17. června 2011 byla uvedena do provozu čistírna kontaminované vody, aby se zabránilo jejímu hromadění. Úkolem čistírny kontaminované vody bylo odfiltrovat radioaktivní kontaminanty, jako je cesium-137 a stroncium-90, z nahromaděné vody před jejím opětovným využitím v reaktorech, přičemž tritium zůstalo jako jediný radionuklid, který nebyl účinně odstraněn. [33]. Cílem bylo zmírnit riziko úniku radioaktivní vody do životního prostředí, udržet stabilní chlazení aktivní zóny reaktoru a zároveň snížit závislost na externích zdrojích vody. K 2. červenci začal nouzový chladicí systém využívat vodu upravenou systémem pro úpravu kontaminované vody, která nahradila sladkou vodu z externích zdrojů. K tomuto kroku došlo, aby se snížilo denní množství akumulované kontaminované vody. [34]

2. července 2011 v 18:00 bylo zahájeno nouzové chlazení chladicí vodou, která byla upravena systémem pro úpravu akumulované vody, do TNR přes vyrovnávací nádrž. [35]

16. prosince 2011 klesla teplota reaktoru na všech blocích pod 100 °C, proto mohlo TEPCO vyhlásit stav studené odstávky [35, 36]. Stav studené odstávky znamená, že reaktory jsou dostatečně stabilní, aby se zabránilo nekontrolovanému úniku radioaktivity, ačkoli v TNR zůstaly na neznámých místech zbytky paliva [37]. Dosažení studeného odstavení však neodstranilo dlouhodobá rizika, protože v TNR se pravděpodobně nachází značné množství roztaveného paliva, které se mohlo dostat do betonových základových desek ochranných konstrukcí [9].

Kvůli nakládání s kontaminovanou vodou bylo do konce roku 2011 vytvořeno více než 1 000 dočasných skladovacích nádrží (viz obr. 4), které měly zadržet hromadící se radioaktivní vodu. Tyto nádrže byly původně zamýšleny jako krátkodobé řešení, ale staly se dlouhodobým řešením a zadržují kontaminovanou vodu. [38] K rostoucímu objemu kontaminované vody přispívalo především pronikání podzemní vody do reaktorového suterénu, kde se mísila s radioaktivními materiály [39]. Pro zmírnění tohoto jevu byla zahájena výstavba podzemní ledové stěny. Tato inovativní bariéra o délce přibližně 1,5 kilometru byla navržena tak, aby obklopila budovy reaktorů a zmrazila půdu, čímž se zabránilo pronikání podzemní vody do kontaminovaných oblastí [40]. Zprovozněna byla v září 2018. Její realizace výrazně snížila přítok podzemní vody do budov reaktoru. Před dokončením ledové stěny se podzemní voda dostávala do budov rychlostí přibližně 190 m³/den. Po plném zprovoznění stěny se tato rychlost snížila přibližně o 100 m³/den [41].



Obrázek 4: Skladovacích nádrží v areálu jaderné elektrárny Fukušima Daiichi, v nichž se nachází kontaminovaná voda, převzato z [38].

V roce 2017 provedla společnost TEPCO průzkum uvnitř TNR 2. bloku pomocí robotických sond, včetně robota ve tvaru „škorpióna“. Robot byl speciálně navržen tak, aby se pohyboval v náročném prostředí uvnitř reaktoru a pořizoval snímky pro posouzení stavu roztavených zbytků paliva [42]. Tyto sondy naměřily v TNR úroveň radiace až 530 Sv/h. [43]

V dubnu 2021 japonská vláda představila plán na postupné vypouštění přes 1,25 milionu tun vyčištěné odpadní vody do Tichého oceánu [44]. Voda vyčištěná pomocí Advanced Liquid Processing System (ALPS), který odstraňuje většinu radionuklidů kromě tritia, dosáhla limitů skladovací kapacity v areálu. Obsah tritia ve vypouštěné vodě byl zředěn na 1 500 Bq/l. [45] Mezinárodní agentura pro atomovou energii po několikanásobném přezkoumání plán schválila s odvoláním na soulad s celosvětovými bezpečnostními normami, ačkoli přetrvávaly obavy z dlouhodobých ekologických dopadů a dopadů na rybolov [46]. Vypouštění bylo zahájeno v srpnu 2023, přičemž se očekává, že proces potrvá desítky let [44]. Sousední země odsoudily vypouštění jako porušení Úmluvy OSN o mořském právu a zdůraznily povinnost předcházet přeshraničním škodám [44]. Zatímco techničtí odborníci zdůrazňovali nízkou radiotoxicitu tritia ve srovnání s jinými izotopy, kritici s tímto tvrzením nesouhlasí, což komplikuje přijetí ze strany veřejnosti [47].

Od roku 2024 je plánováno opětovné využití části 14 milionů metrů krychlových radioaktivní zeminy s obsahem cesia-137 pod 8 000 Bq/kg pro infrastrukturní projekty, například výstavbu silnic. Půda s vyšší aktivitou bude do roku 2045 podrobena vitrifikaci nebo trvale uložena mimo prefekturu Fukušima. Tento proces však čelí odporu veřejnosti kvůli obavám z možné kontaminace. [48] V roce 2030 má být zahájeno odstranění 880 tun roztaveného paliva z 1. až 3. reaktoru [49, 50]. Po odstranění paliva se přistoupí k demontáži reaktorů a vyklizení areálu. Tento krok by měl být dokončen nejpozději do roku 2051 [51]. Odhadované náklady na celý proces přesahují 8 bilionů jüanů (71 miliard USD) [52].

2 Opatření přijatá v ČR po fukušimské havárii

Tato kapitola se zabývá konkrétními opatřeními, která byla v České republice zavedena ke zvýšení jaderné bezpečnosti po fukušimské havárii. Tato opatření zahrnují zátěžové testy, technickou modernizaci, organizační změny a legislativní reformy.

2.1 Zátěžové testy českých jaderných elektráren

V této části jsou popsány provedené zátěžové testy v českých jaderných elektrárnách se zaměřením na jejich postupy, závěry a následná doporučení. Tyto testy nařídila Evropská unie pro všechny jaderné elektrárny ve svých členských státech. Pro Českou republiku to znamenalo příležitost k prověření bezpečnostních rezerv dvou jaderných elektráren a také přechod na nově vznikající mezinárodní standardy. [53]

2.1.1 Průběh zátěžových testů

Zátěžové testy v Česku byly navrženy jako systematické posouzení odolnosti a bezpečnosti elektrárny při nadprojektových scénářích. Za tímto účelem jdou nad rámec bezpečnostních hodnocení prováděných během procesu udělování licencí a pravidelných přezkumů bezpečnosti. Zátěžové testy jsou prováděny dobrovolně a zúčastněné země postupují podle třístupňového procesu. Nejprve provozovatelé jaderných zařízení posuzovali bezpečnost svých elektráren v období od června do října 2011. Následně výsledky prověřily dozorné orgány do konce roku 2011. Nakonec proběhlo evropské vzájemné hodnocení, které probíhalo od ledna 2012 do dubna 2012. [53]

Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB) pověřil společnost ČEZ jako provozovatele JE Dukovany a JE Temelín provedením těchto testů s využitím postupů vyvinutých skupinou evropských dozorných orgánů pro jadernou bezpečnost (ENSREG — European Nuclear Safety Regulators Group) [54]. Tyto testy kontrolovaly tři hlavní oblasti. První oblastí je odolnost proti extrémním přírodním rizikům jako zemětřesení, záplavy a extrémní počasí. Dále se hodnotila odolnost bezpečnostních systémů při dlouhodobých výpadcích napájení, jako jsou problémy související se ztrátou napájení, ztrátou chlazení reaktoru nebo kombinace obojího. Poslední oblast kontrolovala zvládnutí těžkých havárií. [53]

V Česku se kladl důraz na postupné selhávání všech bezpečnostních systémů s cílem zjistit slabá místa celé elektrárny [55]. Byly simulovány situace, kdy bezpečnostní systémy ztratily primární i záložní zdroj napájení, stejně jako se to stalo při havárii ve Fukušimě. Na těchto situacích inženýři zkoumali časové rezervy, než dojde k poškození aktivní zóny reaktoru. Zaměřili se na záložní chladicí systémy, dostupnost nouzového napájení a integritu kontejnmentu. Posuzovaly se také pravděpodobnostní bezpečnostní analýzy pro stanovení rizik spojených s nízkou pravděpodobností a vysokými následky. Tyto simulace pomohly k dosažení požadavku na bezpečnostní standardy Mezinárodní agentury pro atomovou energii (MAAE). [56]

SÚJB předal požadavek Evropské komise na provedení zátěžových testů společnosti ČEZ dne 25. května 2011. ČEZ reagoval velmi rychle a 1. června 2011 provedl jmenování speciální pracovní skupiny, která byla složená z pracovníků obou elektráren. Tuto skupinu

tvořili odborníci na jadernou bezpečnost, projektování a provoz jaderných elektráren, řízení havarijní odezvy, havarijní plánování a fenomenologii těžkých havárií. Tito odborníci prováděli kontroly na místě, přezkoumávali bezpečnostní dokumentaci, která zahrnovala zprávy o analýze bezpečnosti a závěry pravidelného přezkoumání bezpečnosti, a porovnávali postupy na mezinárodní úrovni. SÚJB byly 15. srpna 2011 předloženy předběžné zprávy o dosavadním průběhu hodnocení, čímž byla ukončena fáze vedená provozovatelem elektráren. [55, 56]

2.1.2 Výsledky zátěžových testů

Zátěžové testy potvrdily dostatečné bezpečnostní rezervy v JE Dukovany a JE Temelín, aby odolaly projektovým haváriím, ale určily specifické oblasti vyžadující posílení. [53]

V Temelíně hodnocení vyzdvihlo seismickou odolnost zařízení, protože budovy elektrárny jsou projektovány na zemětřesení o zrychlení 0,10 g, přičemž se vychází z historie seismické aktivity v této oblasti. Zařízení elektrárny je v ohrožení při hodnotách zrychlení přesahujících 0,15 g. Elektrárna byla označena jako místo s minimálním seismickým rizikem, které prakticky vylučuje záplavy. Jako odpovídající zásoba vody v elektrárně byly vyhodnoceny dva vyrovnávací vodojemy o objemu každého 15 000 m³ pro doplňování surové vody a zásoby chladicí vody v areálu. [53, 57]

Testy však odhalily, že protipovodňová opatření, která sice odpovídají původním projektovým specifikacím, je třeba modernizovat s ohledem na aktualizované hydrologické modely zahrnující prognózy změny klimatu. [55]

V Dukovanech, kde jsou reaktory starší než v Temelíně, byla prokázána dostatečná rezerva systémů havarijního chlazení aktivní zóny. Odborníci ale zaznamenali problémy při zvládnutí současné ztráty střídavého a stejnosměrného proudu po dobu delší než 24 hodin [56].

Oběma elektrárnám chyběla mobilní zařízení pro chlazení reaktoru kvůli dlouhodobému výpadku napájení, což bylo později vyřešeno pořízením mobilních čerpadel a záložních mobilních dieselgenerátorů [55]. Bylo nutné modernizovat systémy pro kontrolu koncentrace vodíku při řešení těžké havárie. Vodík tvoří se vzduchem výbušnou směs, která může způsobit výbuch reaktorové budovy a dokonce ohrozit celistvost tlakové nádoby reaktoru. [56]

Hlavním úkolem zátěžových testů bylo zjistit časové rezervy před poškozením aktivní zóny reaktoru za kritických podmínek. U temelínských reaktorů VVER-1000 byla zjištěna časová rezerva 72 hodin pro obnovení napájení před začátkem poškození aktivní zóny, zatímco dukovanské reaktory měly časovou rezervu 48 hodin. Zjištěné časové rezervy potvrdily bezpečnost, zároveň však poukázaly na nutnost rozšíření schopnosti reagovat na mimořádné události. Společnost ČEZ se zavázala zřídit regionální krizová centra vybavená dalším havarijním vybavením a zlepšit komunikaci s externími týmy mimo elektrárnu. [55, 56]

2.1.3 Mezinárodní hodnocení

Hodnotící zprávy českých zátěžových testů prošly přísnou kontrolou v rámci procesu vzájemného hodnocení ENSREG, při kterém regulační orgány ze 17 zemí EU a nezávislí odborníci položili přes 2000 otázek. Poté se všichni hodnotitelé sešli 5. února 2012 v Lucemburku na dvoutýdenní hodnocení, kde rozebírali přezkoumání podle tří oblastí zátěžových testů: přírodní rizika, ztráta bezpečnostních systémů a zvládnutí těžkých havárií. [54]

Toto odborné posouzení se zaměřilo na dodržení zátěžových testů stanovených ENSREG, identifikaci silných a slabých stránek elektrárny a příslušné návrhy na zvýšení bezpečnosti elektrárny. [54]

Kontrola však zjistila nedostatky v řešení vnějších rizik pro danou lokalitu. Odolnost Dukovan splňovala seismické regulační požadavky, zatímco její hodnocení povodňových rizik se opíralo o historické údaje, nikoli o pravděpodobnostní modely zohledňující extrémní srážky. [56] Odborníci doporučili začlenit do analýz rizik odhad změny klimatu. Toto opatření bylo později přijato v revizi českého atomového zákona. [58] Kromě toho revizoři vyzvali SÚJB, aby nařídil přísnější požadavky na havarijní připravenost. [54]

Podle očekávání odborné hodnocení poukázalo na rozdíly v bezpečnostních standardech mezi staršími a novějšími konstrukcemi reaktorů. Konstrukce temelínských bloků, dokončená po roce 2000, zahrnovala pokročilejší prvky pro zmírnění těžkých havárií ve srovnání s dukovanskou konstrukcí, která byla postavena v době sovětského technologického vlivu. [53]

2.2 Technická opatření a modernizace

Zátěžové testy vedly Českou republiku k realizaci rozsáhlých technických vylepšení a modernizačních opatření v celém jaderném sektoru. V jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín se tyto snahy zaměřily na odstranění slabých míst zjištěných během zátěžových testů, na přizpůsobení se bezpečnostním standardům MAAE a na prodloužení provozní životnosti formou investičně nákladných zlepšení infrastruktury. Celková cena všech modernizačních programů na JE Temelín byla přes 34 miliard Kč [59] a na JE Dukovany jsou náklady prokazatelně větší než 27 miliard Kč [60, 61, 62]. Prioritou bylo posílení seismické odolnosti, zlepšení schopností zvládnutí těžkých havárií a zvýšení počtu havarijních bezpečnostních systémů [53]. Díky těmto opatřením se český jaderný sektor stal vzorem pro bezpečnost tlakovodních reaktorů (VVER) a zároveň si zachoval 37% podíl vyrobené elektřiny v České republice [63].

2.2.1 Modernizace havarijních a pomocných systémů

Technická vylepšení se prioritně zaměřila na zmírnění rizika výbuchu vodíku a přetlaku v kontejnmentu jako na klíčové technické nedostatky během havárie ve Fukušimě. [64]

V Dukovanech se připravuje instalace systému filtrovaného odvodu vzdušného kontejnmentu (SFOK) na všech čtyřech blocích VVER-440/V213 [64, 65]. SFOK používají pískové filtry a kovové předfiltry schopné odstranit 99,9 % radioaktivních aerosolů a 90 % jódu při scénáři odvodu vzdušného kontejnmentu [66]. Konstrukce obsahuje vyhřívané odvodušňovací potrubí, aby se zabránilo kondenzaci páry a snížilo se riziko hoření vodíku v tomto potrubí [66].

V kontejnmentu byly instalovány vodíkové rekombinátory, které snižují riziko výbuchu při dlouhodobém výpadku napájení. [65]. Vodíkový rekombinátor snižuje riziko hromadění vodíku v kontejnmentu přeměnou vodíku a kyslíku na páru a teplo, viz rovnice 2.1. Funguje na principu katalytické oxidace, díky materiálům jako platina nebo palladium se snižuje aktivační energie požadovaná pro aktivaci reakce. Tento proces probíhá pasivně, což zajišťuje spolehlivost v nouzových situacích, kdy není k dispozici elektrická energie. Místa pro umístění vodíkových rekombinátorů v kontejnmentu byla vybrána podle počítačových simulací, to přispívá k lokálnímu odstranění nahromaděného vodíku [67]. Účinnost závisí na parametrech, jako jsou plocha povrchu katalyzátoru, teplota a dynamika proudění

v kontejnmentu. Udržováním optimálních provozních podmínek mohou rekombinátoři zvládat různé koncentrace vodíku způsobené různými scénáři havárií. [68]



2.2.2 Řízení těžkých havárií

Sprchový systém kontejnmentu

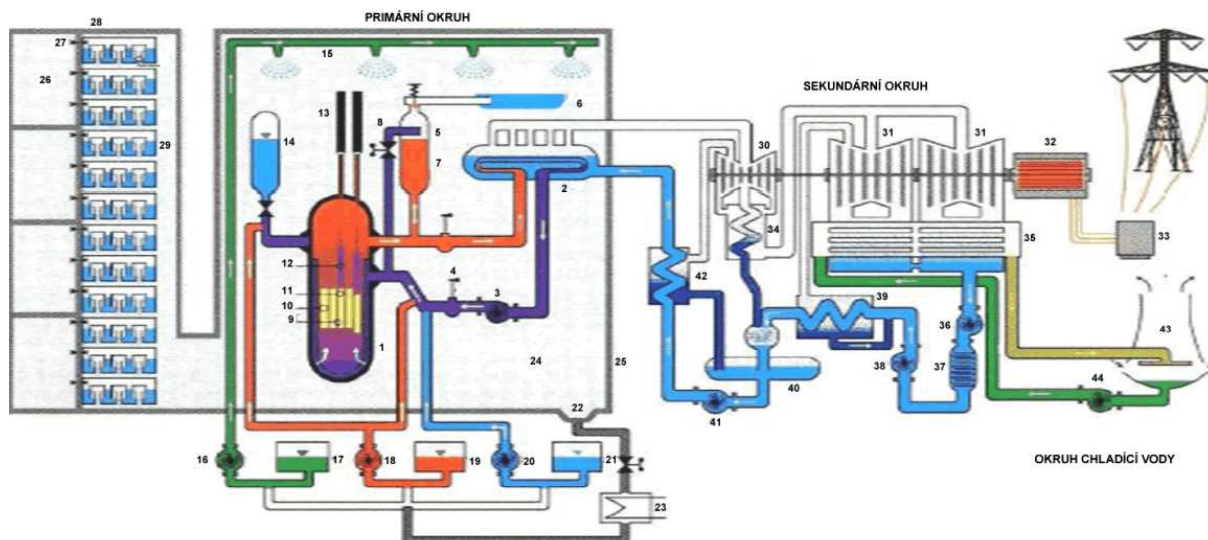
Kontejnment má schopnost odolávat vnitřnímu zatížení a současně chránit před účinky potenciálních vnějších zatížení. Je to taková bariéra, která zabraňuje únikům radioaktivních látek při havárii a která funguje při vysokém tlaku. Její konstrukce zajišťuje minimální únik i při vysokých vnitřních tlacích a jedná se o poslední bariéru proti úniku radionuklidů. Aby se kontejnment při těžkých haváriích neporušil, stará se o to několik bezpečnostních systémů. Systém izolace kontejnmentu automaticky uzavře rychločinné armatury při zjištění zvýšení tlaku, čímž zabrání nekontrolovanému úniku. Snížení tlaku se dosahuje pomocí sprchových čerpadel a zásobních nádrží s chemikáliemi, které potlačují únik emisí radioaktivního jódu. Kromě toho jsou nasazeny pasivní autokatalytické rekombinátoři, viz oddíl 2.2.1, které při projektových haváriích zmírňují hromadění vodíku a zabraňují tvorbě nebezpečných koncentrací hořlavých plynů. Vypočtené parametry zatížení kontejnmentu v JE Temelín jsou pro maximální teplotu 150 °C, maximální tlak 0,49 MPa a úroveň radiace až 103 Gy/h při těžkých haváriích. [55]

Za normálních provozních podmínek v JE Temelín systém cirkulačního chlazení parogenerátorů zajišťuje odvod tepla a páry do vzduchu v kontejnmentu, aby byla udržována teplota vzduchu v požadovaném rozmezí. Tyto systémy spoléhají na technickou vodu důležitou, přičemž přebytečné teplo se nakonec uvolňuje do atmosféry prostřednictvím chladicích nádrží s rozstříkem. Systém je navržen s 2x100% zálohou, to znamená tři provozní a tři záložní ventilátory, každý ventilátor má dva sériové chladiče. Jeden chladič je napojen na rozvod technické vody důležité a druhý chladič na chladicí vodu. [55]

Při nehodách, při nichž vnitřní tlak přesáhne 30 kPa, se ventilační systémy automaticky odpojí a nouzový odvod tepla přejde pouze na bezpečnostní systémy sprchování. Aktivuje se systém sprchování kontejnmentu (viz obr. 5), který vstřikuje studený roztok kyseliny borité pomocí sprchovacích trysek ke kondenzaci páry, snížení tlaku a zlikvidování radioaktivních aerosolů. Tento proces zahrnuje cirkulaci sprchovací vody přes záchytnou nádrž kontejnmentu do výměníků tepla, kde se zbytkové teplo předává technické vodě důležité před návratem ochlazené vody do kontejnmentu. [55]

Systém sprchování je navržen s 3x100% zálohou, zahrnující všechny systémy, jako je chlazení, napájení, řízení a ventilace. Skládá se ze tří technologicky a funkčně shodných, ale nezávislých systémů, to znamená, že každý z nich je schopen samostatně plnit jakékoli úkoly, pro které byl navržen. Každý ze tří systémů obsahuje sprchové čerpadlo, zásobní nádrž obsahující H_3BO_3 , N_2H_4 , KOH pro zadržování jódových aerosolů, další čerpadlo, výměník tepla, spojovací potrubí a systém sprchovacích trysek. Čerpadla jsou napájena ze základního napájecího systému nouzových dieselgenerátorů (EDG — Emergency Diesel Generator). [55]

Snížení tlaku a odvod tepla pomocí sprchovacího systému probíhá v uzavřeném okruhu přes záchytnou jímku. Odvod tepla z kontejnmentu lze proto v tomto režimu využívat po neomezenou dobu. [55]



1 - Reaktor, 2 - Parogenerátor, 3 - Hlavní cirkulační čerpadlo, 4 - Hlavní uzavírací armatura, 5 - Kompenzátor objemu - pára, 6 - Barbotážní nádrž, 7 - KO - voda, 8 - Vstřiky KO, 9 - Aktivní zóna, 10 - Palivová kazeta, 11 - Regulační kazeta (HRK), palivová část, 12 - Regulační kazeta (HRK), absorpční část, 13 - Pohony HRK, 14 - Hydroakumulátor, 15 - Sprchový systém, 16 - Sprchové čerpadlo, 17 - Zásobní nádrž sprchového systému, 18 - Nízkotlaké havarijní čerpadlo, 19 - Zásobní nádrž nízkotlakého havarijního systému, 20 - Vysokotlaké havarijní čerpadlo, 21 - Zásobní nádrž VT havarijního systému, 22 - Sání z hermetické zóny, 23 - Chladič sprchového systému, 24 - Kontejnment, 25 - Ochranná obálka kontejnmentu, 26 - Záchytný plynovej barbotážní věže, 27 - Zpětná klapka, 28 - Barbotážní věž, 29 - Žlaby barbotážní věže, 30 - VT díl turbíny, 31 - NT díl turbíny, 32 - Elektrický generátor, 33 - Blokový transformátor, 34 - Separátor a přehříváč páry, 35 - Kondenzátor, 36 - Kondenzátní čerpadlo I*, 37 - Bloková úprava kondenzátu, 38 - Kondenzátní čerpadlo II*, 39 - NT regenerace, 40 - Napájecí nádrž, 41 - Elektronapájecí čerpadlo, 42 - VT regenerace, 43 - Chladič věž cirkulační vody, 44 - Čerpadla CV

Obrázek 5: Schéma okruhů a nouzových zařízení na JE Dukovany, převzato z [69].

Zvýšený počet zařízení odvodu tepla přispívá k bezpečnosti provozu. Pokud se primární chlazení stane nedostupné, lze pro nouzové sprchování znovu použít alternativní metody, jako je hasičský systém čerpání vody do reaktoru, který je navržen s 3x100% zálohou. Pomocí tohoto systému je možné čerpat chladicí vodu do kontejnmentu s podobným účinkem jako u běžného systému vstřikování do kontejnmentu. Tyto záložní systémy napodobují funkce hlavního systému sprchování pro snížení tlaku a teploty, i když se sníženou kapacitou, a udržují základní stabilizaci kontejnmentu až do obnovení normálního chlazení. [55]

Havarijní chlazení reaktoru

Fukušimská havárie zdůraznila nutnost robustních a spolehlivých systémů havarijního chlazení aktivní zóny (ECCS — Emergency Core Cooling System), které musí být schopné fungovat i při dlouhodobém výpadku napájení a při haváriích se ztrátou chladiva. V přímé reakci na to české jaderné elektrárny zavedly vícestupňové strategie kombinující modernizaci pevné infrastruktury s mobilním havarijním vybavením. [65]

V JE Dukovany se ECCS skládá ze tří nezávislých částí. Každá z těchto částí obsahuje nádrže pro havarijního chlazení aktivní zóny, nádrže pro havarijní skladování kyseliny borité, čerpadla havarijního sprchování, vysokotlaká a nízkotlaká čerpadla havarijního chlazení. Tyto systémy mají 3 x 100% zálohu a jsou vzájemně nezávislé a oddělené. Také je zajištěna seismická odolnost všech bezpečnostních systémů, jako jsou napájecí a řídicí systémy. [70]

Pro zvýšení havarijní připravenosti byl zaveden modernizovaný havarijní plán. Tento plán zajišťuje, že profesionální jednotky Hasičského záchranného sboru ČR mohou poskytnout účinnou materiální a personální pomoc do 10 až 60 minut, v závislosti na dojezdové vzdálenosti. Pro alternativní doplňování demineralizované vody přímo do parogenerátorů jsou k dispozici mobilní čerpadla s výtlačným tlakem 0,8—1,2 MPa a průtokem 120—150 t/h. Pro tato čerpadla jsou připravena přípojné místa pro propojení tohoto

zařízení s technologií a byla úspěšně testována v rámci havarijních provozních postupů, což prokázalo jejich schopnost zachovat základní bezpečnostní funkce. Doba potřebná k zahájení dodávky vody prostřednictvím mobilních čerpadel je přibližně 20 minut od aktivace. Ve scénářích zahrnujících ztrátu přístrojů pro měření hladiny v parogenerátorech jsou připravené tabulky pro optimální průtoky vody vzhledem k protitlaku v parogenerátorech, aby se vyrovnalo odebírání páry. Existují však nevyřešené problémy, jako je neexistence havarijních plánů pro současné zásobování parogenerátorů ve dvou blocích pomocí jednoho čerpadla. Kromě toho jsou popsány alternativní metody pro doplňování chladicí kapaliny do bazénů s vyhořelým palivem (SFP — Spent Fuel Pool), ale konkrétní postupy na místě nejsou vypracovány. Pokyny pro zvládání těžkých havárií rovněž uvažují o přenosných elektrických agregátech pro ovládání ventilů, ačkoli podrobné postupy zásahu se teprve připravují. [69]

JE Dukovany má dvě možnosti chlazení bazénů vyhořelého paliva. První využívá gravitační tok vody z Bubbler Tank kondenzačního systému. Pro zajištění spolehlivosti při seismických událostech a výpadku napájení byly pohony vypouštěcích ventilů Bubbler Tank nahrazeny seismicky odolnými a bylo zajištěno jejich nouzové napájení. Tyto ventily lze otevřít za jakýchkoli podmínek a umožňují gravitační průtok vody do bazénu vyhořelého paliva. Druhá možnost chlazení zahrnuje plnění bazénu pomocí čerpadel pro úpravu vody v SFP napojených na nízkotlaké bezpečnostní nádrže. Pro tento účel byla původní čerpadla nahrazena seismicky odolnými čerpadly a na seismická rozhraní byly přidány ruční ventily. Tyto modernizace významně zlepšily schopnost elektrárny řídit chlazení SFP při různých havarijních scénářích. [71]

Systém nouzového chlazení v JE Temelín využívá přívody vody z nádrže TB10, která slouží jako zásoba kyseliny borité, nádrže TB30 určené pro odvod primárního chladiva a nádrže TB40 obsahující čistý kondenzát. Pro tyto účely byl realizován nový systém TB50, který má dvě čerpadla poháněná EDG. Roztoky z nádrží TB10, TB30 a TB40 jsou čerpány do SFP. [71]

JE Temelín byla vybavena čtyřmi nezávislými způsoby chlazení reaktoru, jen jeden způsob chlazení reaktoru je nezávislý na elektrické energii. V případě výpadku napájení by čerpadla přestala čerpat vodu a ta by přestala cirkulovat. Proto byl hasičský sbor vybaven mobilními čerpadly (viz obr. 6), která se připojí na přípojná místa (viz obr. 7) přímo určená k tomuto účelu. Druhou možností je doplňování vody zvenku. K tomuto účelu je v areálu hasičská cisterna (viz obr. 8), která je schopna načerpat demineralizovanou vodu z nádrže (viz obr. 9) a poté se napojit na mobilní čerpadlo. V kritické situaci je možné čerpat vodu z bazénů pod chladicími věžemi, které jsou zhruba 200 metrů od přípojného místa. Z těchto zásob mohou být oba reaktory chlazeny měsíc. [72]

Díky modernizaci se prodloužila doba zvládání výpadků, přičemž vylepšení nouzového systému chlazení reaktoru v Dukovanech prodloužila dobu zabránění poškození aktivní zóny na 72 hodin během výpadků napájení. [69]



Obrázek 6: Mobilní čerpadlo na ETE.



Obrázek 7: Přípojně místo na chladicí okruh reaktoru na ETE.



Obrázek 8: Hasičská cisterna na ETE.



Obrázek 9: Přípojně místo nádrže s demineralizovanou vodou na ETE.

Seismická odolnost

Jedním z hlavních hledisek technických úprav bylo zvýšení odolnosti proti zemětřesením. Ačkoliv Česká republika nepatří mezi seismicky aktivní oblasti, analýzy po fukušimské havárii ukázaly, že i středoevropské jaderné elektrárny musí být připraveny na neočekávané seismické události. V JE Dukovany bylo vybudováno 12 chladicích ventilátorových věží o výšce necelých 17 metrů, které mohou nahradit chladicí věže, viz obr. 10. Mají vyšší seismickou odolnost, proto jsou schopné odolat otřesům země až 5,5 stupně Richterovy stupnice a rychlosti větru až 252 km/h. Obsahují celkem šest samostatných chladicích buněk, to znamená tři buňky na každý reaktorový blok, přičemž každá buňka je schopna samostatně zajistit dochlazení bloku a jeho bezpečnostních systémů s 200% rezervou. Schéma zapojení, respektive přepojení na ventilátorové věže z chladicích věží, je na obr. 11. Celkové náklady na dodávky a práce pro všechny čtyři bloky elektrárny dosáhly jedné miliardy korun. [73]



Obrázek 10: Chladicí ventilátorové věže, převzato z [73].

Seismická opatření byla realizována také v elektrárně Temelín. Zde byly provedeny seismické analýzy a úpravy stavebních konstrukcí klíčových budov, jako jsou reaktorové haly, sklad vyhořelého paliva a hasičská zbrojnice (viz obr. 12), aby splňovaly požadavky na odolnost proti zemětřesení. Současně byly instalovány nové seismické senzory schopné detekovat seismické aktivity v reálném čase a předávat data přímo do řídicího systému elektrárny. [75]

Tato vylepšení byla navržena v souladu s mezinárodními standardy MAAE Safety Standards Series SSG-9, které upravují kritéria pro seismickou bezpečnost jaderných zařízení [76].

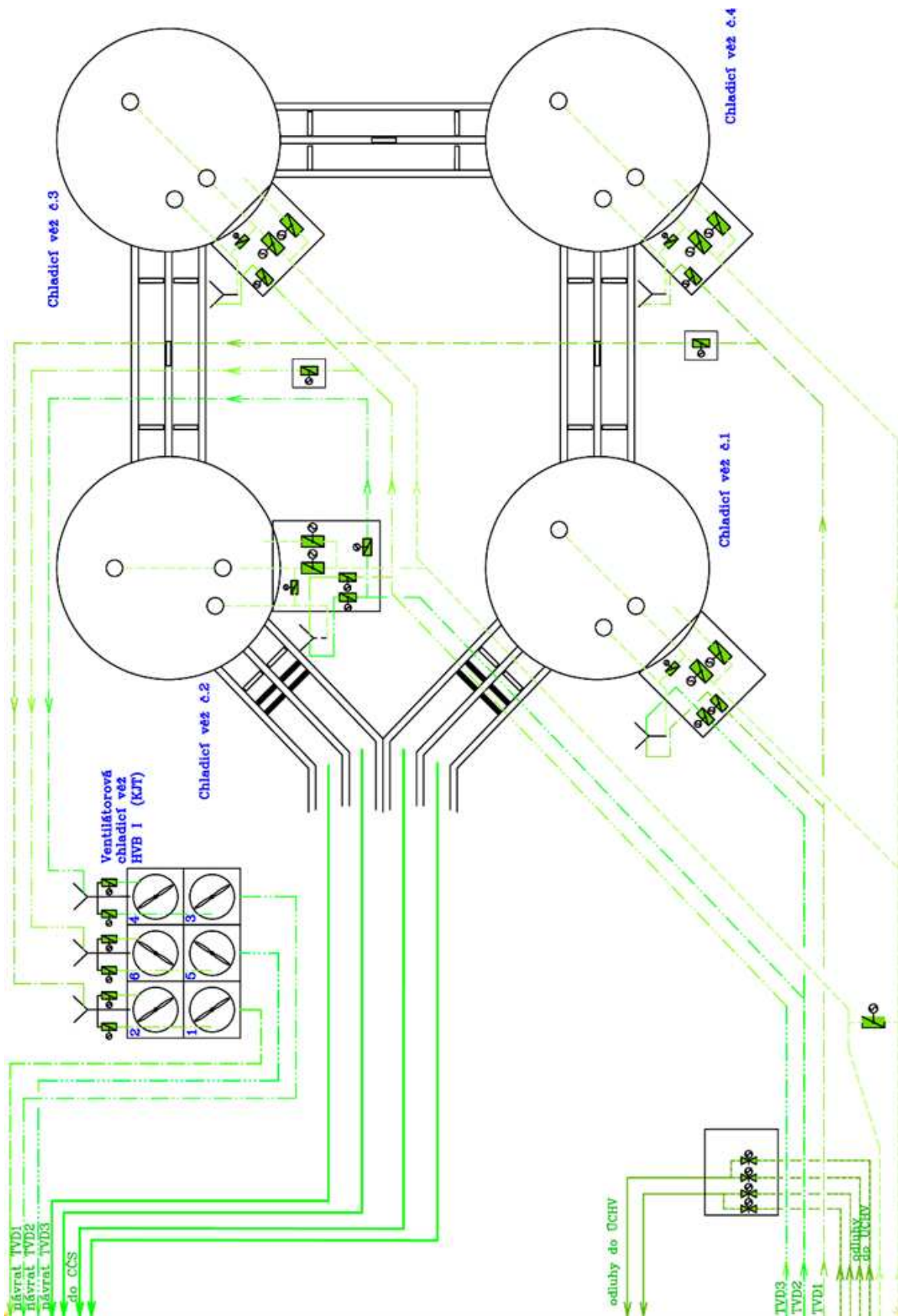
Vybavení hasičského sboru na JE Temelín bylo dovybaveno traktorbagrem s radlicí vpředu a podkopem vzadu (viz obr. 13), nákladním automobilem s kontejnerem, bouracími kladivy, osvětlovacími balóny a mobilními čerpadly (viz obr. 15 a obr. 16), které umožní hasičům zasáhnout i v případě rozsáhlého poškození infrastruktury uvnitř areálu. Hasiči musí být schopni doplňovat naftu do dieselgenerátorů na přípojných místech (viz obr. 18), což je pro dlouhodobé zajištění chlazení reaktoru naprosto klíčové. [77]

Nouzové napájení

Mezi zásadní provedená vylepšení patří zlepšení systémů nouzového napájení, i když zátěžové testy potvrdily, že české jaderné elektrárny mají dostatečné bezpečnostní rezervy proti extrémním podmínkám. Tato opatření zahrnovala modernizaci EDG, na které se obě elektrárny spoléhají při výpadku napájení elektrárny nebo výpadku napájení mimo elektrárnu. [53]

V JE Dukovany je každý ze čtyř bloků vybaven třemi nezávislými EDG o výkonu 2,8 MW, z nichž každý dokáže zajistit 100 % energie pro nouzové napájení bloku. Tyto EDG jsou seismicky odolné, fyzicky oddělené a navrženy pro dlouhodobý nezávislý provoz. Elektrárna má zásobu nafty na nejméně šest až sedm dní nepřetržitého provozu každého EDG. Protože při dlouhodobém provozu je na každý blok potřeba pouze jeden EDG, může se tato rezerva prodloužit na 18–21 dní bez nutnosti řešit dodávky paliva. V případě úplné ztráty napájení jsou instalovány dva seismicky odolné EDG, každý o výkonu 3,2 MW. Dále je v areálu elektrárny pět mobilních EDG s výkonem 0,4 MW. [53, 78]

JE Temelín má podobné uspořádání se třemi EDG o výkonu 6,3 MW na blok, z nichž každý poskytuje 100% záložní napájení. Kromě toho jsou pro oba bloky k dispozici



Obrázek 11: Schéma okruhu cirkulační chladicí vody, převzato z [74].



Obrázek 12: Seismické z odolnění hasičské zbrojnice na ETE. Jde o vyztužení pomocí ocelových plátů. Toto vyztužení bylo provedeno na všech patrech hasičské zbrojnice.



Obrázek 13: Traktorbagr na ETE.



Obrázek 14: Elektrické centrály na napájení mobilních čerpadel na ETE.

dva station black-out (SBO) dieselgenerátory (viz obr. 19) pro případy úplné ztráty napájení. Tyto generátory jsou rovněž seismicky odolné a jsou schopny se automaticky aktivovat do deseti sekund při poklesu napětí na přípojnicích. Zásoby paliva Temelína umožňují přibližně 56 hodin provozu při plném zatížení všech EDG nebo až sedm dní při snížení vyráběné energie a další nafta je v nádržích v elektrárně. Podobně jako v Dukovanech se tady nachází mobilní EDG, viz obr. 20. [53, 79]



Obrázek 15: Elektrická mobilní čerpadla na ETE.



Obrázek 16: Mobilní čerpadlo se spalovacím motorem na ETE.



Obrázek 17: Kontejner s mobilním čerpadlem (viz obr. 16), nádrží o objemu 5 m³ a dalším hasičským vybavením pro čerpání na ETE.



Obrázek 18: Příklad přípojného místa pro doplňování paliva dieselgenerátorů na ETE.

Bateriové systémy poskytují v obou elektrárnách další zálohu během výpadku napájení. V Dukovanech má každý blok tři sady akumulátorových baterií o kapacitě 1500 Ah, to zajišťuje napájení po dobu nejméně dvou hodin při maximálním zatížení. Temelín má na každý blok akumulátorové baterie o kapacitě 3x1600 Ah pro napájení bezpečnostních systémů a baterie 2x2400 Ah pro spotřebiče související s bezpečností. [53]



Obrázek 19: Dieselgenerátor na ETE.



Obrázek 20: Mobilní dieselgenerátor na ETE.

Vodní elektrárny Orlík, Lipno a Hněvkovice jsou připraveny dodávat elektrickou energii ETE během událostí při úplné ztrátě napájení [80]. Pro EDU je v záloze vodní elektrárna Dalešice [81]. Žádný z těchto zdrojů ale není seismicky vyhovující. Doba připojení je během 30—60 minut a to je v souladu s US R.G. 1.155, který požaduje maximálně 60 minut na připojení. [53]

2.2.3 Kontroly bezpečnosti a životnosti

Do zpráv o bezpečnosti jaderné elektrárny byly začleněny výsledky zátěžových testů, jako jsou pravděpodobnostní hodnocení rizik a analýzy vnějších nebezpečí, která přesahují projektovou úroveň, jako jsou extrémní záplavy a zemětřesení [65]. Oblasti, na které se periodické prověrky zaměřují, zahrnují mechanismy stárnutí materiálů, přičemž se sleduje křehnutí vlivem neutronového ozáření tlakových nádob reaktoru pomocí metody Master Curve a kontroly korozního praskání na trubkách parogenerátoru pomocí zkoušek vířivými proudy [82, 83, 84].

Periodické bezpečnostní prověrky představují základ jaderné bezpečnosti České republiky. Jsou vyžadovány atomovým zákonem č. 263/2016 Sb. a jejich cílem je zajistit přizpůsobování se vyvíjejícím se technickým normám a požadavkům dozoru. Periodické bezpečnostní prověrky, které se u provozovaných jaderných elektráren provádějí každých 10 let, pravidelně hodnotí 14 bezpečnostních faktorů, jako jsou projektová dokumentace elektrárny, aktuální stav zařízení, kvalifikace a spolehlivost technologií, mechanismy stárnutí komponent, pravděpodobnostní metody a analýzy rizik, bezpečnostní výkonnost, využití zkušeností z jiných elektráren a výsledků vědeckého výzkumu, organizační struktura a řízení, provozní postupy, lidský faktor, havarijní plánování a radiologický vliv na životní prostředí. Každý faktor má soubor dílčích faktorů, které jsou rozděleny do souboru kritérií. [71]

Přezkumy řízení stárnutí jaderných elektráren Dukovany a Temelín zahrnují analýzy časově omezeného stárnutí, které hodnotí mechanismy degradace komponent, jako jsou tlakové nádoby reaktoru a betonové kontejnmentové konstrukce. Tato hodnocení se musí

provádět, aby bezpečnostní rezervy zůstaly v souladu s pokyny MAAE SSG-25 a dalšími mezinárodními bezpečnostními normami. [70]

Řízení stárnutí v tlakové nádobě reaktoru kontroluje změny vlastností materiálu, které jsou ovlivňovány křehnutím vlivem ozáření, tepelnou únavou a tepelným šokem pod tlakem. Jedná se o kombinaci monitorování, testování a odběrů vzorků k posouzení vlastností materiálu v dlouhodobém horizontu. V případě potřeby jsou prováděna nápravná opatření, jako je žíhání nebo výměna součástí, aby byly zachovány mechanické vlastnosti tlakové nádoby reaktoru po celou dobu její provozní životnosti [85]. [70]

Také u betonových konstrukcí kontejnmentu se kontroluje poškození, které souvisí s chemickým napadením, cykly zmrazování a rozmrazování a vystavením radiaci. Provádějí se pravidelné kontroly a nedestruktivní zkoušky, aby se odhalily včasné známky zhoršení stavu. Pokud je to nutné, tak se provádějí nápravná opatření, jako je utěsnění trhlin nebo zesílení konstrukce, aby zůstala schopnost kontejnmentu fungovat jako ochrana proti úniku radioaktivního materiálu [86]. [70]

2.2.4 Využití projektových rezerv

Skupina ČEZ zvýšila do roku 2025 hrubý výkon každého dukovanského bloku z 500 MW na 512 MW [87]. Tohoto zvýšení se dosáhlo zvýšením tlaku páry na výstupu z parogenerátoru z 4,61 MPa na 4,78 MPa, zvýšením výstupní teploty chladiva z reaktoru z 298,4 °C na 300,4 °C a přechodem z 12měsíčních na 16měsíční palivové cykly. Pomocí těchto zvýšení se dosáhlo využití projektových rezerv na turbínách, protože se dosáhlo zvýšení tepelného výkonu o 2,3 %, a to bez zvýšení spotřeby paliva. Pomocí optimalizace chladicích věží v roce 2022 se zvýšila účinnost, protože se snížila průměrná teplota cirkulační chladicí vody o 0,35 °C, což způsobilo zvýšení roční produkce přibližně o 15 500 MWh. [88, 89]

Podobně byly do roku 2024 postupně modernizovány oba bloky VVER-1000 v Temelíně, které dosáhly hrubého výkonu z 981 MW na 1086 MW, což představuje více než 10 % nárůst oproti původnímu výkonu každého z nich. Další fáze, která je stejně jako v Dukovanech založená na využití projektových rezerv na turbínách, je plánována kolem roku 2030 a bude zahrnovat výměnu vysokotlakých částí turbíny. Prodloužení palivového cyklu získalo závěrečné schválení regulačních orgánů a v současné době přechází z 12měsíčního na 18měsíční cyklus. V roce 2026 by měl být tento přechod dokončen. [88]

2.3 Organizační a legislativní opatření

2.3.1 Změny jaderné legislativy

Po havárii Česká republika provedla legislativní a regulační reformy s cílem posílit jadernou bezpečnost, havarijní připravenost a dozor nad jadernými zařízeními. Důvodem těchto reforem byla potřeba řešit havárie přesahující původní projektové předpoklady, upravit národní opatření s aktuálními mezinárodními standardy a zajistit dlouhodobou životnost jaderných elektráren. [65]

Základem těchto reforem byl Národní akční plán pro posílení jaderné bezpečnosti z roku 2012, který shrnul výsledky zátěžových testů JE Dukovany a Temelín, viz oddíl 2.1, a navrhl minimálně 84 bezpečnostních opatření [65]. Ta zahrnovala povinnou modernizaci systémů nouzového napájení, systémů pro kontrolu koncentrace vodíku a systémů odvodu odvětvování kontejnmentu. Tyto modernizace měla udělat společnost ČEZ jako provozovatel JE

pod dohledem SÚJB. Plán byl tvořen jako živý dokument, který byl pravidelně upravován na základě nových poznatků a doporučení vzájemného hodnocení ze strany ENSREG. [65, 90]

V roce 2016 byl českým parlamentem schválen atomový zákon č. 263/2016, který nahradil zastaralý atomový zákon z roku 1997. Příprava tohoto nového zákona zabrala více než pět let. Od roku 2011 se na přípravě intenzivně podílely SÚJB, Ministerstvo průmyslu a obchodu, Ministerstvo životního prostředí a ČEZ. Nejvýznamnější směrnice EU promítnuté do tohoto zákona jsou směrnice 2013/59/Euratom o ochraně před účinky ionizujícího záření a směrnice 2009/71/Euratom stanovující společný rámec zajišťování jaderné bezpečnosti. [91]

Atomový zákon začal platit v lednu 2017. JE nařídil periodické hodnocení bezpečnosti (PSR — Periodic Safety Review) jako základ strategie jaderné bezpečnosti prostřednictvím atomového zákona, který nařizuje celkové přehodnocení každých 10 let pro provozované jaderné elektrárny a 6 let po zahájení provozu pro nové reaktorové bloky. Tato legislativní reforma převzala požadavky z bezpečnostního návodu MAAE NS-G-2.10, čímž zajistila shodu s mezinárodními standardy a zároveň reagovala na požadavky, které vyplynuly z událostí ve Fukušimě. [71]

U stávajících zařízení JE Dukovany a JE Temelín nařizuje desetiletý cyklus hodnocení kumulativních účinků stárnutí, technologického stárnutí a vnějších rizik. Nové bloky, jako jsou plánované reaktory APR-1000 v Dukovanech II [92], projdou první PSR do šesti let provozu, aby se zkontroloval soulad s moderními projektovými standardy a provozními postupy, jako je technologie pro kontrolu koncentrace vodíku při řešení těžké havárie. [71]

Provozovatel musí během PSR vyhodnotit 14 bezpečnostních faktorů, viz oddíl 2.2.3. Tato hodnocení porovnávají stav elektrárny se současnými vědeckými a technickými standardy, jako jsou bezpečnostní standardy MAAE a kontroly Western European Nuclear Regulator Association (WENRA). Proces zahrnuje 1 200 hodnotících kritérií, která před realizací přezkoumává SÚJB. Zjištění jsou shrnuta do závěrečné zprávy se schválenými nápravnými opatřeními. Každoroční kontrola pokroku a harmonogramy modernizace zajišťují neustálé dodržování požadavku atomového zákona, aby nebyla ohrožena jaderná bezpečnost. [71]

2.3.2 Posílení regulačního dozoru

Regulační dohled nad jadernou bezpečností v ČR byl posílen v návaznosti na požadavky mezinárodních standardů. Tento dohled zajišťuje SÚJB, který hraje klíčovou roli při zajišťování bezpečného provozu jaderných elektráren a při prosazování aktuálních regulačních požadavků. [93]

Plnění regulačního rámce SÚJB bylo do hloubky kontrolováno pomocí misí integrované dozorné činnosti (IRRS — Integrated regulatory review service) prováděných MAAE. První mise se konala v roce 2013 a následná mise v roce 2017 proběhla na žádost české vlády. Zatím poslední dvanáctidenní mise byla ukončena 26. května 2023. [94]

Zprávy IRRS chválí SÚJB za neustálé zlepšování, profesionální inspekční programy a strategické plánování kvalifikace pracovníků. Za zmínku stojí, že tým IRRS identifikoval šest oblastí skvělé výkonnosti, které svědčí o vysoké úrovni dozorného systému v ČR. Mezi těmito oblastmi je přístup vlády k dalšímu využívání jaderné energie, který zahrnuje zapojení všech zúčastněných stran. Dále byl oceněn dobře strukturovaný národní radonový program a jeho realizace, které kladou důraz na ochranu veřejného zdraví. Pozitivně byl

také hodnocen profesionální program inspekci, který umožňuje každodenní komunikaci mezi inspektory jaderných elektráren a vytváří prostor pro průběžné hodnocení výkonnosti a výsledků inspekční činnosti. [93]

Podle zpráv IRRS musí dojít k zjištění současné a budoucí personální potřeby SÚJB a vypracování plánu, který zajistí, aby byl k dispozici dostatečný počet kvalifikovaných pracovníků, kteří budou plnit jeho zákonné a regulační povinnosti. To zahrnuje zmapování budoucích personálních potřeb a provádění pravidelného sebehodnocení kultury bezpečnosti s cílem posílit bezpečnost. Kromě toho byl SÚJB vyzván, aby rozšířil svůj integrovaný systém řízení s cílem dále zlepšit svou regulační účinnost. [93]

Pro zajištění shody s moderními bezpečnostními standardy se SÚJB zaměřil také na zdokonalení inspekčních protokolů a licenčních procesů. SÚJB zavedl profesionální a důsledný kontrolní program, jehož součástí je každodenní komunikace s inspektory jaderných elektráren a průběžné vyhodnocování výsledků kontrol. Díky těmto kontrolám jsou inspekce důkladné a přizpůsobené novým bezpečnostním problémům. Oblast inspekci zahrnuje odstupňovaný přístup, který upravuje rozsah a četnost inspekci podle typu zařízení, materiálu a činnosti. Tato metodika umožňuje SÚJB účinně rozdělovat zdroje a zároveň zachovat mechanismus dohledu. Kromě toho SÚJB provádí pravidelná sebehodnocení a zkoumá poznatky získané z mezinárodních vzájemných hodnocení, aby mohl zdokonalovat své inspekční procesy. [93]

2.3.3 Plány na mimořádné události

Plány na mimořádné jaderné události v ČR prošly po havárii ve Fukušimě rozsáhlou reformou, která nařídila lepší koordinaci mezi dozornými orgány, provozovateli a regionálními systémy krizového řízení. Hlavním bodem těchto reform byl Národní radiální havarijní plán, přezkoumaný v roce 2016 podle atomového zákona č. 263/2016, který stanovil ochranná opatření pro ukrytí, jódovou profylaxi a evakuaci z předem daných zón havarijního plánování. [95]

Ukrytí v budově je nejrychlejší a zároveň relativně účinné opatření, jak snížit vystavení obyvatel účinkům radioaktivních látek uvolněných do životního prostředí. Účinnost tohoto opatření se zvyšuje stupněm utěsnění objektu, pobytem osob v nejnižších podlažích a použitím prostředků k ochraně dýchacích cest. Hlavním cílem je minimalizovat ozáření v době úniku radioaktivních látek a při průchodu radioaktivního oblaku nad daným územím. Tím se významně snižuje riziko vnitřní kontaminace vdechováním a vnějšího ozáření z radioaktivního mraku. Ukrytí může výrazně snížit celkovou dávku záření, kterou by osoby bez ochrany mohly obdržet venku, a to až o několik řádů. Zároveň je důležité obyvatele informovat, aby nekonzumovali potraviny skladované mimo obaly, zdrželi se konzumace vody z nezakrytých zdrojů, čímž se dále minimalizuje riziko vnitřního ozáření z požití kontaminovaných látek. [95]

Jódová profylaxe je cílené ochranné opatření, které se uplatňuje v situacích, kdy lze očekávat výskyt radioaktivního jódu v ovzduší. Ochranný účinek této metody vychází ze schopnosti štítné žlázy intenzivně vstřebávat jód. Pokud je žláza předem nasycena neradioaktivním jódem, zabrání se tak následnému příjmu jeho radioaktivních izotopů. Z tohoto důvodu jsou lidé žijící v zóně havarijního plánování předem vybaveni tabletami jodidu draselného. Aby profylaxe byla účinná, je nutné, aby došlo k podání jodidu draselného přibližně 2 až 4 hodiny před možným vystavením těla radioaktivnímu jód. V takovém případě se radioaktivní látky do štítné žlázy téměř nedostanou a jsou z organismu postupně

vyloučeny. Distribuci tablet zabezpečují složky integrovaného záchranného systému ve spolupráci s krajskými úřady a zajišťují jejich dostupnost pro domácnosti, školy, zdravotnická zařízení i pracoviště v zasažené oblasti. Součástí systému je také desetiprocentní rezerva z celkového množství, kterou spravuje příslušný krajský úřad. Veškeré náklady spojené s nákupem a distribucí hradí provozovatel jaderné elektrárny. Občané ve větší vzdálenosti od elektrárny mají možnost pořídit si tyto tablety volně v lékárnách. [95]

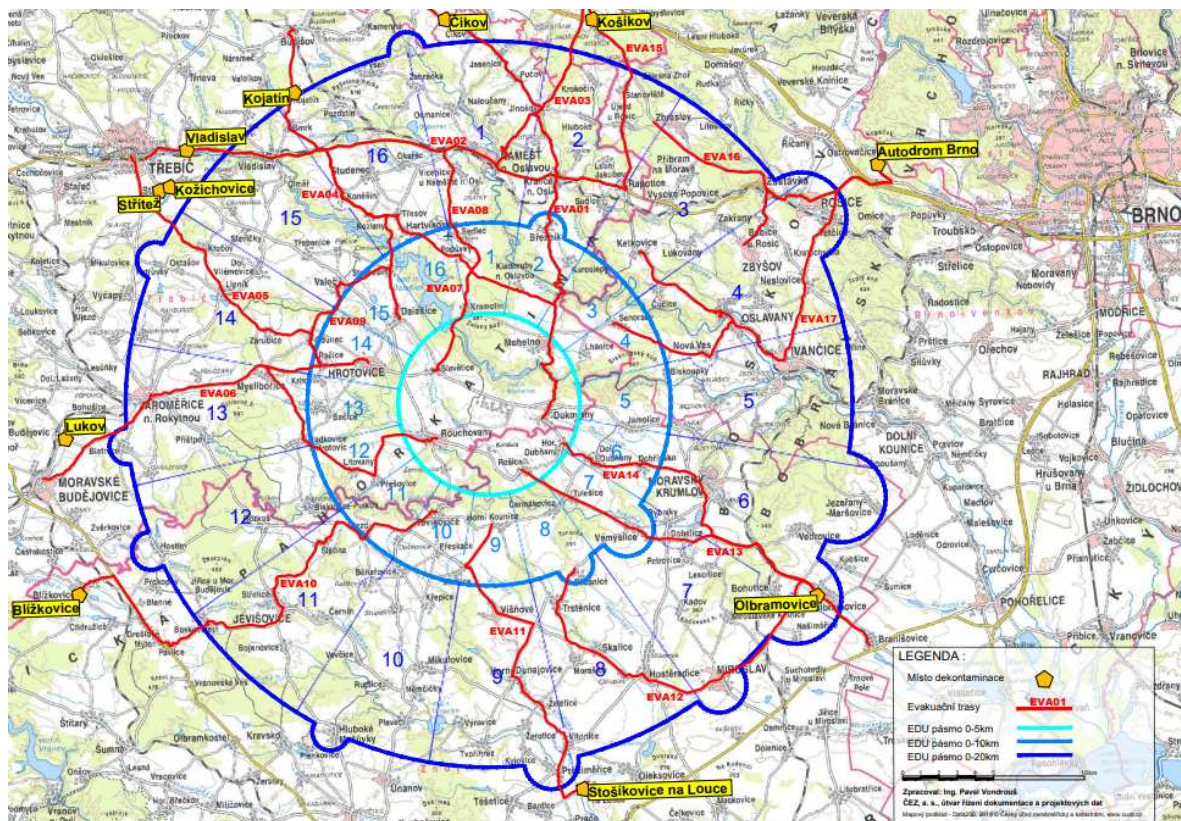
Evakuace osob je časově náročná, proto je její provedení ještě před únikem radioaktivních látek z poškozeného jaderného zařízení nebo před příchodem radioaktivního mraku málo pravděpodobné. Přestože takový scénář není příliš reálný, nemůžeme jej vyloučit, protože správně načasovaná evakuace může vyloučit ozáření obyvatelstva. Je proto důležité zvážit tuto možnost a posoudit její proveditelnost v konkrétní havarijní situaci. Rizikem však zůstává, že by k úniku mohlo dojít právě v době, kdy by evakuace probíhala, čímž by obyvatelé byli vystaveni účinkům radioaktivního mraku bez dostatečné ochrany. Může nastat situace, že výsledné ozáření bude nižší, než pokud by lidé zůstali po dobu 48 hodin ukryti na kontaminovaném území. O zahájení evakuace se rozhoduje na základě vývoje havarijní situace, odhadovaného rozsahu úniku a aktuální radiační situace. Ve většině případů však bude evakuace probíhat až později, po předchozím ukrytí obyvatel a důkladném vyhodnocení radiačního prostředí na základě dostupného monitorování. [95]

Pro JE Dukovany a JE Temelín byly stanoveny havarijní zóny plánování na poloměry 20 km a 13 km (viz obr. 21 a 22), ve kterých bude probíhat v případě havárie varování obyvatelstva, ukrytí a zavedení jódové profylaxe u obyvatelstva a regulace pohybu osob. Plánování a příprava evakuace obyvatelstva se zajišťuje do vzdálenosti 10 km od JE Dukovany a 5 km od JE Temelín. Díky rozdělení těchto zón na 16 sektorů je možné promyšleně reagovat na základě monitorování radiace v reálném čase. V závislosti na reálném průběhu nebo výsledcích havarijního monitorování radiační situace může být rozhodnuto o uplatnění neodkladných ochranných opatření i ve větší vzdálenosti, než předpokládají havarijní plány jaderné elektrárny. [95]

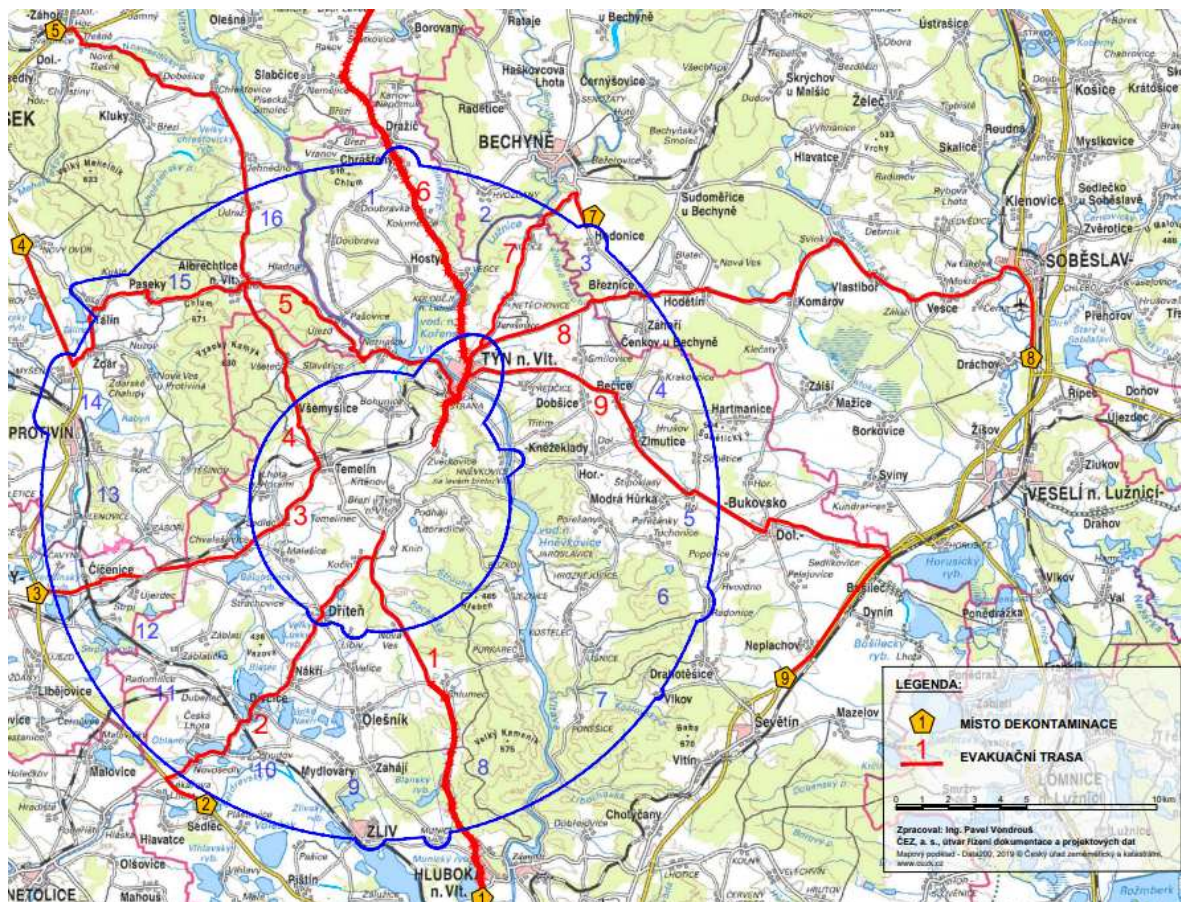
Technologický pokrok posílil rozhodování při mimořádných událostech. Systémy na měření radioaktivity (ESTE — Emergency Source Term Evaluation) jsou provozovány v jaderných krizových centrech, kde jsou v nepřetržitém provozu. Rozptylové modely použité v ESTE jsou Lagrangeův částicový model a model Puffovy trajektorie. [96, 97]

Puffovy trajektorie se používají pro výpočet rozptylu v blízkosti místa úniku až do vzdálenosti 100 km od místa jaderné havárie. Lagrangeův částicový model pro obecný atmosférický přenos se používá pro rozptyl radionuklidů jak na krátkou vzdálenost, tak až pro rozptyl v globálním měřítku. Díky monitorování dat v reálném čase, jako jsou parametry elektrárny, meteorologické vstupy a měření radiace, může krizový štáb přizpůsobovat ochranná opatření, jako je rozložení evakuace nebo distribuce jódových tablet. [96, 97]

Modernizace zahrnovala také zřízení havarijních řídicích místností v obou jaderných elektrárnách, které byly vybaveny nouzovými filtrovanými ventilačními systémy, zabezpečeny proti seismickému nebezpečí, nebezpečí záplav a jsou dostatečně stíněny a chráněny proti radiaci. [98]



Obrázek 21: Havarijní zóny plánování EDU, převzato z [95].



Obrázek 22: Havarijní zóny plánování ETE, převzato z [95].

3 Opatření přijatá v jiných zemích

Po havárii ve Fukušimě přistoupily jednotlivé státy k implementaci rozsáhlých bezpečnostních opatření s cílem minimalizovat rizika podobných incidentů v budoucnosti. Každá země reagovala odlišně v závislosti na své energetické politice, stávajících bezpečnostních standardech a technologických možnostech. [19] V této kapitole budou popsána klíčová opatření přijatá v jednotlivých státech a jejich dopad na jadernou bezpečnost.

3.1 Asie

3.1.1 Japonsko

Japonsko přijalo přísnější bezpečnostní opatření než většina zemí. Zatímco většina států pouze zpřísnila regulace a udělala kontroly provozovaných elektráren, Japonsko přišlo s tvrdším opatřením a rozhodlo se odstavit všech 54 provozovaných reaktorů kvůli přezkoumání bezpečnosti [99]. Odstavení reaktorů způsobilo energetickou krizi a zvýšenou závislost na fosilních palivech, i přesto bylo toto rozhodnutí považováno za důležité pro obnovení důvěry veřejnosti a zajištění jaderné bezpečnosti. [100]

Hlavním opatřením bylo zrušení Japonské komise pro jadernou bezpečnost (NSC — National Security Council) a NISA a založení nezávislého úřadu pro jadernou bezpečnost (NRA — Nuclear Regulation Authority) v roce 2012 [100]. Před havárií měla jaderná regulace velké nedostatky kvůli úzkému propojení s vládními orgány a jaderným průmyslem, což zásadně zhoršovalo nezávislost a schopnost efektivně kontrolovat bezpečnostní standardy [101]. NRA byl zřízen jako „externí úřad“ Ministerstva životního prostředí. Díky tomu získal status ministerstva a mnohem větší míru nezávislosti než jakýkoli jiný vládní úřad v Japonsku. Předsedu a čtyři členy komise jmenuje na funkční období pěti let předseda vlády se souhlasem obou komor parlamentu. NRA má plnou odpovědnost za jadernou bezpečnost a zabezpečení, jako je monitorování radiace a nakládání s radioaktivními izotopy. Je zodpovědná za regulaci bezpečnosti, jako je vydávání povolení a souhlasů. NRA byla zřízena s počátečním počtem 480 zaměstnanců, z nichž 460 pocházelo z NISA a NSC. [102]

V roce 2016 uskutečnila MAAE v Japonsku misi IRRS. Vzniklá hodnotící zpráva byla pozitivní a dospěla k závěru, že NRA prokázala nezávislost. Zpráva uvádí, že se počet zaměstnanců na plný úvazek zvýšil na 920. Přesto mise zjistila řadu nedostatků, které je potřeba napravit. Vláda měla změnit zákon, kterým se řídí NRA, aby byly jeho kontrolní postupy účelnější a aby bylo možné provádět kontroly kdykoli. NRA bylo doporučeno pokračovat ve zvyšování kvalifikace svých zaměstnanců, zlepšit sdílení informací s ostatními orgány, pokračovat v zavádění dozorných mechanismů, vypracovat strategii prosazování sankcí a pokut za nedodržování předpisů ze strany provozovatelů jaderných reaktorů, zlepšit postupy týkající se havarijní připravenosti a reakce a stanovit požadavky na vyřazování reaktorů z provozu. [102]

Pracovníci elektráren a akademičtí pracovníci z jaderného průmyslu jsou znepokojeni přístupem komise NRA, která nezohledňuje při stanovování svých bezpečnostních požadavků vnímání veřejnosti ani zájmy a náklady průmyslu. To znamená, že chybí jednoznačná kritéria, podle kterých by bylo možné nestranně stanovit, jaká úroveň bezpečnosti je dostatečná. NRA je obviňována z toho, že nedokáže efektivně komunikovat s provozovateli elektráren a že se chová spíše jako policista než jako regulátor. Výsledkem tohoto

procesu přezkumu je, že provozovatelé čelí vysoké míře nepředvídatelnosti a regulačnímu nebezpečí. Důsledkem tohoto přístupu k regulaci bezpečnosti bylo, že schvalování restartů a prodlužování licencí bylo pomalejší a nákladnější, než se předpokládalo. [102]

Vláda znárodnila společnost TEPCO, která provozovala jadernou elektrárnu Fukušima, a požadovala, aby společnost prošla radikální změnou. Plány změn se zaměřily na širokou řadu otázek včetně správy a řízení společnosti, vyřazení elektrárny Fukušima Daiichi z provozu, odškodnění obětí havárie, zlepšení jaderné bezpečnosti, diverzifikace do oblasti obnovitelných zdrojů energie a zvýšení finanční udržitelnosti společnosti. [102]

Pro obnovení provozu reaktorů byly zavedeny tyto bezpečnostní požadavky: [103, 104]

- **Zvýšená seismická odolnost:** Všechny reaktory musely být znovu posouzeny a konstrukčně vylepšeny, aby odolaly zemětřesení převyšující původní projektové předpoklady.
- **Ochrana proti tsunami:** Elektrárny instalovaly vysoké mořské valy, hydroizolaci budov a vylepšily bezpečnostní systémy, aby se ochránily před extrémními záplavami.
- **Nouzové chlazení:** Od zařízení je požadováno chlazení po dobu nejméně sedmi dnů bez vnějšího napájení. Proto byly instalovány dieselgenerátory, které jsou umístěné ve vodotěsných a seismicky odolných kontejnerech a které poskytují napájení při výpadku proudu. Dále byly pořízeny mobilní dieselgenerátory a baterie.
- **Filtrované systémy odvětrávání kontejnmentu:** Tyto systémy byly zavedeny za účelem bezpečného snížení tlaku v kontejnmentu během těžkých havárií, s cílem co nejvíce omezit únik radioaktivity.
- **Systémy pro kontrolu koncentrace vodíku:** Byly instalovány pasivní autokatalytické rekombinátory, aby se zabránilo hromadění vodíku a výbuchům uvnitř reaktorových budov.
- **Havarijní střediska:** Byly vybudovány kryty odolné proti zemětřesení, které slouží jako střediska krizového řízení při těžkých haváriích.

První reaktory, které dostaly povolení k obnovení provozu po odstavení všech reaktorů, byly reaktory Ohi 3 a 4 v prefektuře Fukui v srpnu 2012. Kvůli kontrolám NRA musely být oba tlakovodní reaktory o výkonu 1180 MW v září 2013 opět odstaveny. [105]

Proto se jako první reaktory, které dostaly povolení od NRA, uvádí první a druhý blok jaderné elektrárny Sendai v prefektuře Kagošima, které byly znovu spuštěny v srpnu a říjnu 2015 [57]. Od té chvíle probíhá obnovování provozu jaderných elektráren pomalým tempem, viz tab. 2. Obnovení probíhalo pomalu kvůli výrazně přísnějšímu procesu bezpečnostních kontrol a povolování ze strany NRA a kvůli přetrvávajícím obavám veřejnosti o bezpečnost. Podpora veřejnosti pro opětovné spuštění však v Japonsku v posledních letech roste. [99]

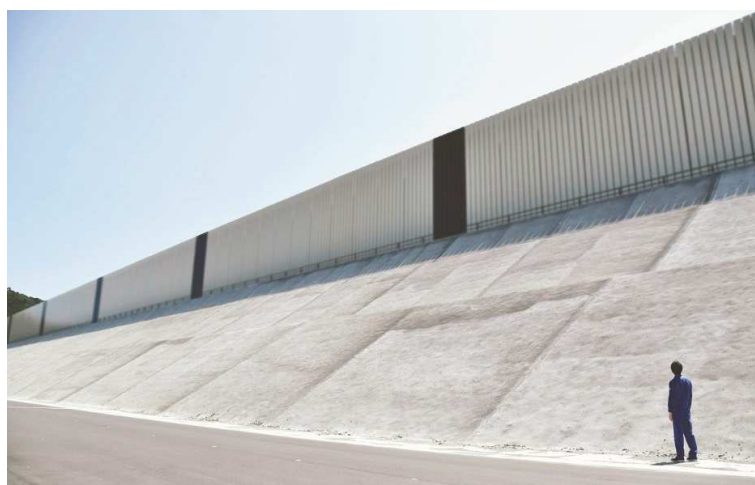
Japonsko má v současné době celkem 33 jaderných reaktorů klasifikovaných jako provozuschopné, z toho bylo spuštěno 14 reaktorů, jak je vidět v tab. 2, a dalších 12 provozuschopných reaktorů se nachází v různých fázích schvalovacího procesu opětovného spuštění. Žádost podaly také Ohma a Šimane 3 jako reaktory ve výstavbě. [106]

Japonské bezpečnostní normy se odlišovaly od opatření přijatých v jiných zemích svou přísností. Byly zavedeny nové a systémové požadavky, které zásadně změnily způsob provozu jaderných elektráren. Jak bylo zmíněno výše, ke klíčovým opatřením patřilo výrazné zvýšení výšky mořských valů, aby elektrárny odolaly i extrémně silným tsunami.

Tabulka 2: Znovu spuštěné jaderné reaktory v Japonsku, upraveno podle [106].

Reaktor	Typ	Obnovení provozu	Výkon [MW]	Připojení k síti
Sendai 1	PWR	srpen 2015	846	1983
Sendai 2	PWR	listopad 2015	846	1985
Takahama 3	PWR	únor 2016	830	1984
Ikata 3	PWR	září 2016	846	1994
Takahama 4	PWR	červen 2017	830	1984
Ohi 3	PWR	duben 2018	1127	1991
Genkai 3	PWR	květen 2018	1127	1993
Genkai 4	PWR	červen 2018	1127	1996
Ohi 4	PWR	červen 2018	1127	1992
Mihama 3	PWR	červen 2021	780	1976
Takahama 1	PWR	srpen 2023	780	1974
Takahama 2	PWR	září 2023	780	1975
Onagawa 2	BWR	říjen 2024	796	1994
Shimane 2	BWR	prosinec 2024	789	1988
Shika 2	BWR	očekáváno březen 2026	1108	2005

Například u jaderné elektrárny Onagawa byl postaven 29 metrů vysoký mořský val, který je na obr. 23, jako dodatečná ochrana před přívalovou vlnou [107].



Obrázek 23: Mořský val jaderné elektrárny Onagawa, převzato z [108].

Další zásadní změnou bylo zapojení místních samospráv do rozhodování o restartu reaktorů. Ve většině zemí je povolení k provozu jaderné elektrárny v rukou centrální vlády a regulátorů, ale v Japonsku dostaly regionální vlády právo vetovat restart reaktorů na svém území. Tento faktor zpomalil proces opětovného spuštění elektráren, protože mnohé zůstaly uzavřeny kvůli odporu obyvatel. [109]

Japonsko také zavedlo nová pravidla pro přehlednou komunikaci. Provozovatelé elektráren a vláda jsou povinni pravidelně zveřejňovat informace o radiační situaci, bezpečnostních kontrolách a stavu jednotlivých reaktorů. Tento krok měl pomoci obnovit důvěru veřejnosti, která byla po Fukušimě vážně narušena. [110]

Japonsko po Fukušimě přijalo jedny z nejpřísnějších jaderných regulací na světě. Zatímco jiné země se zaměřily především na dílčí úpravy svých pravidel, Japonsko od základů reformovalo celý svůj jaderný sektor včetně regulace, technologie a vztahu k veřejnosti. Tento přístup znamenal vyšší náklady a delší proces restartu reaktorů, ale zároveň zajistil vyšší úroveň bezpečnosti a ochrany před budoucími katastrofami. [109, 110]

3.1.2 Jižní Korea

Společnost Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP) jako jediný provozovatel jaderných elektráren v Jižní Koreji reagovala velice rychle a pět dní po fukušimské havárii zahájila dobrovolné testy všech 21 elektráren v zemi, které byly ukončeny 18. března 2011. Výsledkem těchto testů bylo 21 zlepšujících opatření, která obsahovala mimo jiné instalaci vodotěsných dveří, nouzových generátorů energie a rekombinátorů vodíku. [111]

Na rychlou reakci KHNP navázala korejská vláda pod vedením pracovní skupiny předsedy vlády kontrolními opatřeními, která měla posoudit bezpečnost JE proti podobné havárii. Korea Institute of Nuclear Safety (KINS) zorganizovala cílenou speciální bezpečnostní inspekci a sestavila tým složený z 37 pracovníků KINS a 36 externích odborníků. Tento tým provedl třítýdenní inspekci všech 21 provozovaných jaderných elektráren, z toho 17 tlakovodních a 4 reaktorů CANDU, výzkumného reaktoru HANARO, zařízení pro těžbu a zpracování uranu a skladu vyhořelého paliva. Hlavní body inspekce jsou uvedeny v tab. 3. [111]

Tabulka 3: Hlavní kontrolní body inspekce, převzato a upraveno z [111].

Téma	Kontrolní body
Extrémní přírodní katastrofy	- Adekvátní návrh zařízení proti přírodním rizikům - Odolnosti proti zemětřesení - Odolnost proti zaplavení mořskou vodou a ochrana před zatopením
Prevence těžkých havárií	- Adekvátní napájení a chladicí funkce - Napájecí systém a nouzové napájení - Schopnost chlazení v případě ztráty napájení a zaplavení
Zmírnění těžkých havárií	- Adekvátní protipatření proti těžkým haváriím - Pokyny a postupy pro zvládnutí těžkých havárií
Reakce na nouzové situace	- Adekvátní nouzové reakce - Reakce na nehody více bloků současně - Zařízení, systémy a infrastruktura na ochranu místních obyvatel a pracovníků

Týmem bylo navrženo 100 kontrolních bodů, které byly po výměně informací optimalizovány. Díky této optimalizaci KINS a Ministerstvo školství, vědy a technologií vytvořily seznam 50 opatření, která se měla provést dvoufázově jako krátkodobá opatření dokončená do 2 let a střednědobá až dlouhodobá dokončená do 5 let. Většina z těchto opatření se týkala prevence a zmírnění následků těžké havárie. V tab. 4 jsou uvedena opatření, která přímo souvisí s řízením těžké havárie. [111]

Před havárií byla jaderná bezpečnost pod kontrolou Ministerstva školství, vědy a technologie (MEST — Ministry of Education, Science and Technology), které také prosazovalo

Tabulka 4: Opatření proti těžkým haváriím, převzato a upraveno z [111].

Číslo	Opatření
1	Instalace pasivního systému pro odstraňování vodíku
2	Instalace filtrovaného ventilačního systému nebo zařízení pro dekompresi v kontejnmentu
3	Instalace vstupních cest chladicí vody do reaktoru pro nouzové chlazení z vnějších zdrojů
4	Posílení vzdělávání a školení pro těžké havárie
5	Revize pokynů pro zvládání těžkých havárií, aby se zvýšila jejich účinnost
6	Vývoj pokynů pro zvládání těžkých havárií pro odstávku při nízkém výkonu

jadernou energetiku. Kvůli dvojí roli tohoto orgánu byly vyvolány obavy ohledně nezávislosti a možnosti střetu zájmů. V reakci na tuto souvislost byla 26. října 2011 založena Nuclear Safety and Security Commission (NSSC) jako prezidentská komise pro jadernou bezpečnost. V únoru 2013, po nástupu nové vlády, byla NSSC začleněna pod úřad předsedy vlády, což ještě více posílilo její nezávislost. [112]

Podpora jaderné energetiky od korejské vlády procházela zásadními změnami. Vláda Lee Myung-Baka vypracovala v roce 2009 plán na zvýšení podílu energie z jádra na 59 % do roku 2030 a prosazovala nízkouhlíkový zelený růst, i přes fukušimskou havárii byly v září 2012 schváleny lokality Samcheok a Yeongdeok pro nové jaderné elektrárny. Za této vlády začala 10. července 2012 výstavba JE Shin Hanul 1 a byly spuštěny JE Shin Kori 2 a Shin Wolsong 1 [113]. Toto schvalování probíhalo i přes odhalení bezpečnostních skandálů korejského jaderného průmyslu souvisejících s bezpečností, jako bylo utajování incidentu s výpadkem proudu v jaderné elektrárně Kori nebo falšování bezpečnostní dokumentace zařízení elektrárny v roce 2012 [114]. [115]

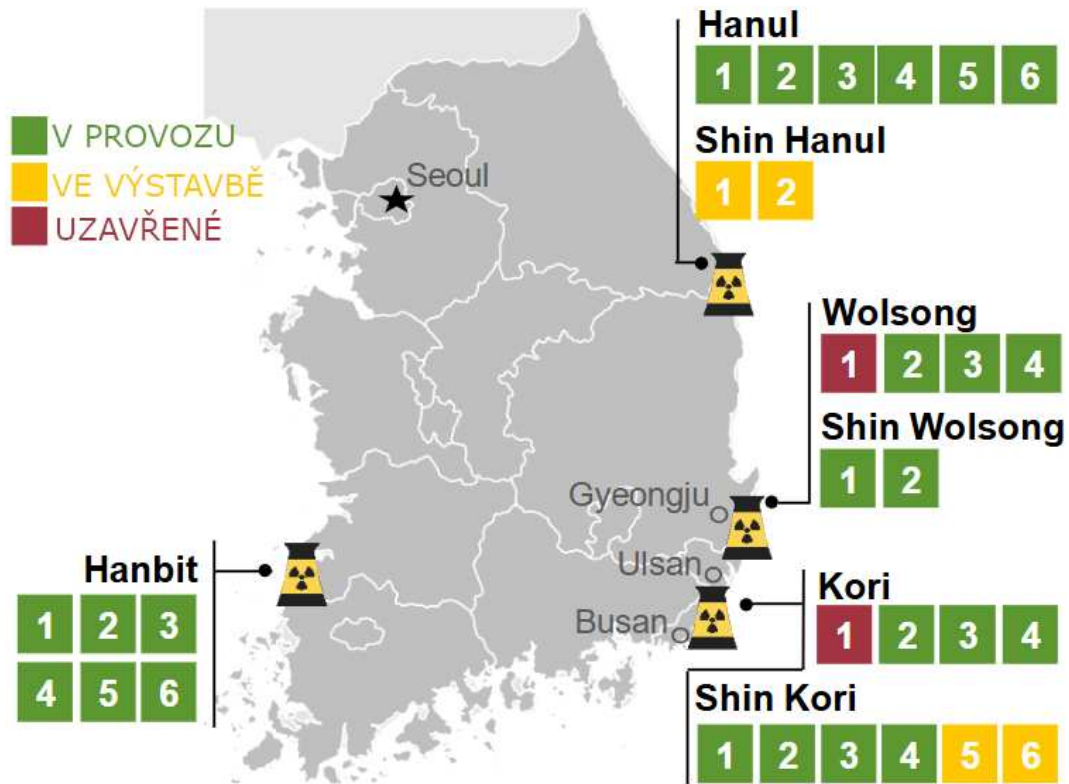
V roce 2013 byla zvolena prezidentkou Park Geun-hye, která byla odhodlaná podporovat jadernou energetiku. V lednu 2014 vláda schválila výstavbu dvou bloků APR1400 v elektrárně Shin Kori, na které byla v červnu 2016 vydána stavební povolení a začalo se stavět [113]. V tomto období byli osloveni potenciální odběratelé jihokorejských jaderných technologií uzavřením několika dohod o spolupráci v jaderné oblasti se zeměmi, jako je Česká republika, Vietnam nebo Saúdská Arábie. [114]

Zásadní obrat nastal v roce 2017 zvolením Moon Jae-In, když nově zvolený prezident oznámil postupné ukončení využívání jaderné energie v průběhu 45 let [116]. Prvním krokem v roce 2017 bylo odstavení místo prodloužení licence jaderného reaktoru Kori 1, nejstaršího reaktoru v Jižní Koreji o výkonu 576 MW. V roce 2019 byl odstaven reaktor Wolseong 1, druhý nejstarší reaktor v Jižní Koreji o výkonu 661 MW. Do roku 2029 měla skončit licence k provozu dalším 10 reaktorům [117]. Vláda zrušila jaderné projekty až na výstavbu bloků Saeul 3 a 4 o výkonu shodně 1340 MW. Navzdory těmto opatřením tato vláda podporovala rozvoj malých modulárních reaktorů a vývoz jaderných technologií do světa. [113, 115]

Zvolením prezidenta Yoon Suk-Yeol v roce 2022 se zrušila politika postupného ukončení využívání jaderné energie. Tak mohl být zahájen proces prodloužení provozní životnosti zbývajících jaderných bloků jaderné elektrárny Wolseong, jejichž uzavření se plánovalo za dva až pět let. Znamená to, že všech 10 reaktorů, kterým měla skončit licence, projde procesem prodloužení životnosti [118]. Byla schválena výstavba dvou jaderných bloků Shin Hanul 3 a 4 na východním pobřeží v Uljinu o výkonu každého 1400 MW s dokončením v roce 2033, tím se Uljin stane místem s největším počtem jaderných reaktorů v jedné

lokalitě [119]. Podle dlouhodobého energetického plánu mají být do roku 2038 dokončeny malé modulární reaktory s celkovým výkonem 700 MW [120]. [115]

K roku 2025 provozuje Jižní Korea 26 reaktorů (viz obr. 24) o celkovém výkonu 26 GW, dva reaktory jsou ve výstavbě a další tři jsou plánovány [120, 121]. Vzhledem k tomu, že korejské reaktory jsou ve srovnání s většinou ostatních zemí dobře řízeny, plánuje se prodloužení jejich životnosti na 70 až 80 let [118].



Obrázek 24: Jaderné elektrárny v Jižní Koreji, převzato a upraveno z [120, 122].

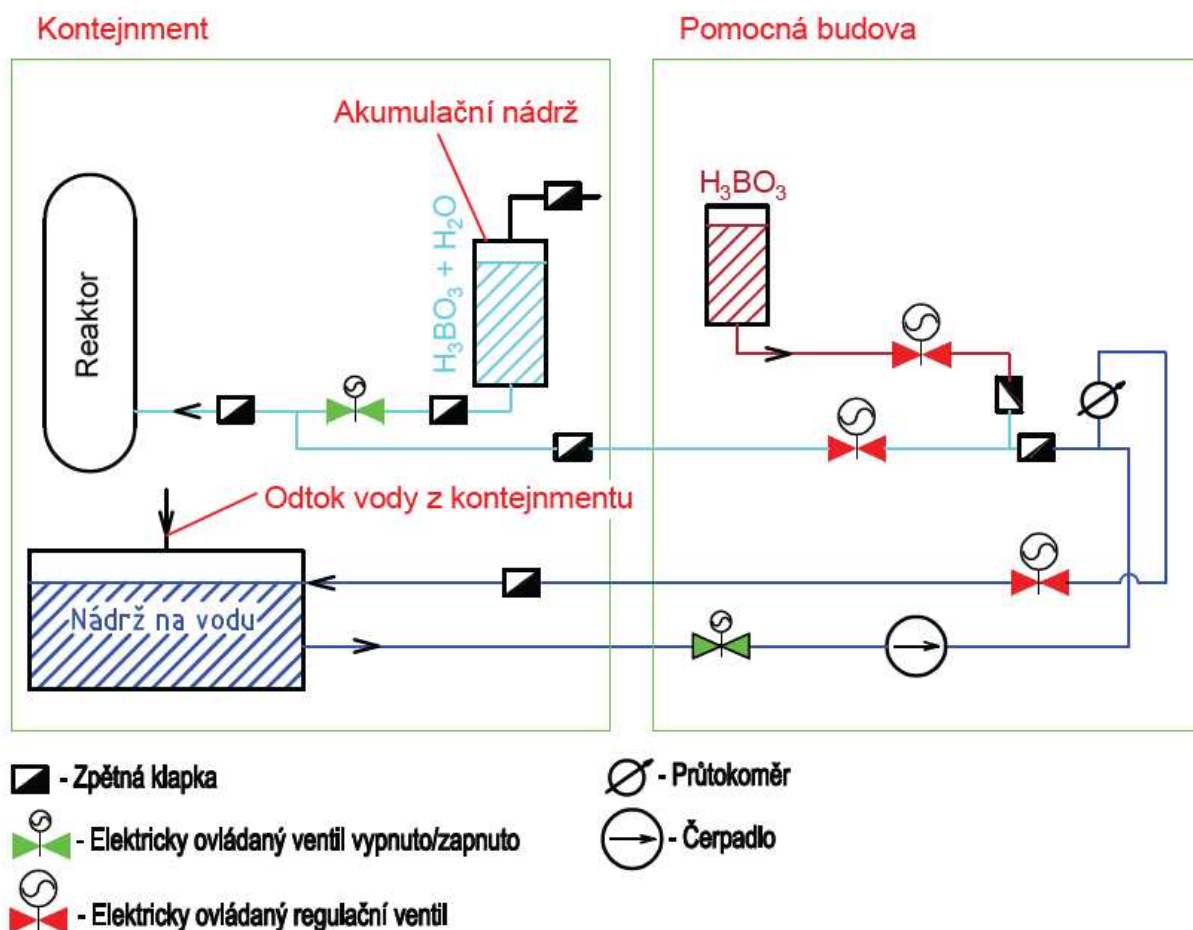
Bepečnostní vstřikovací systém APR-1400

Bezpečnostní vstřikovací systém zajišťuje chlazení aktivní zóny reaktoru a udržení podkritičnosti reaktoru v případě havárie, zejména při ztrátě chladiva, jako je například prasknutí trubky v primárním okruhu. Tento systém má aktivní a pasivní prvky, které automaticky reagují na pokles tlaku v primárním okruhu. [123]

Pokud dojde k poklesu tlaku v primárním okruhu, boritá voda z akumulací nádrže je automaticky dodána do aktivní zóny reaktoru. Automatické vstřikování funguje díky přetlaku v akumulací nádrži, který je udržován pomocí inertního plynu, jako je dusík nebo helium. Tento pasivní systém může fungovat i v případě výpadku napájení. [123]

Aktivní systém dodává boritou vodu do aktivní zóny reaktoru v případě havárie. Čerpadla odebírají vodu z nádrže, která je pak smíchána s kyselinou boritou. Tato boritá voda je následně dodána do aktivní zóny reaktoru. [123]

Na obr. 25 je zobrazeno schéma jednoho systému. Jaderný blok je vybaven čtyřmi identickými systémy. [123]



Obrázek 25: Bezpečnostní vstřikovací systém TNR, převzato a upraveno z [123].

3.2 Evropa

3.2.1 Francie

Po oznámení havárie Francouzský úřad pro jadernou bezpečnost (ASN — Nuclear Safety Authority) spustil havarijní středisko už 11. března 2011 odpoledne, aby získal představu o havárii a mohl informovat francouzské obyvatelstvo. Institut radiální ochrany a jaderné bezpečnosti (IRSN — Institute for Radiation Protection and Nuclear Safety) také aktivoval své havarijní středisko a s ASN se snažily shromáždit všechny informace na pochopení události a vývoj situace. ASN zapojila 200 zaměstnanců, kteří zajišťovali nepřetržitý provoz střediska až do 13. dubna 2011, a poté ASN ponechala ve službě tým, který sledoval vývoj situace a pravidelně vydával informace. Tento tým byl v každodenním kontaktu s krizovým oddělením na francouzském velvyslanectví v Japonsku. [124]

22. března 2011 ASN požádala držitele jaderných licencí ve Francii v čele se společností Électricité de France (EDF), aby posílili monitorování okolí svých závodů s cílem zjistit případný atmosférický spad z Japonska. Vzhledem k velmi nízkému radioaktivnímu dopadu zaznamenanému na francouzském území a pokračujícímu poklesu naměřených hodnot bylo toto opatření 26. května 2011 zrušeno. [124]

Předseda vlády 23. března 2011 požádal ASN v souladu s článkem 8 zákona o transparentnosti a jaderné bezpečnosti ze dne 13. června 2006 o provedení bezpečnostního auditu jaderných zařízení. Na tuto žádost navázala 24. a 25. března 2011 Rada Evropské unie

žádostí na provedení zátěžových testů v členských státech EU, které měly prověřit odolnost jaderných elektráren proti extrémním podmínkám. Jednalo se o zemětřesení, záplavy, ztrátu dodávek elektrické energie, ztrátu chladičů, kombinace různých událostí a také selhání havarijní organizace. Úkolem těchto testů bylo otestovat situace, se kterými nebylo při projektování zařízení počítáno, a určit, kde by bylo možné posílit odolnost těchto zařízení, aby se s těmito extrémními situacemi zvládla vypořádat. [124]

Žádost Rady Evropské unie se týkala pouze jaderných elektráren, ale ASN se rozhodla rozšířit tento přístup na všechna francouzská jaderná zařízení, jako jsou výzkumné reaktory a zařízení podílející se na výrobě nebo přepracování jaderného paliva, představující potenciální riziko vzniku jaderné havárie. Po konzultaci tohoto přístupu s French High Committee for Transparency and Information on Nuclear Security (HCTISN) bylo stanoveno, že toto hodnocení má zohlednit sociální, organizační a lidské faktory zejména subdodavatelské činnosti. Havárie ve Fukušimě totiž ukázala, že schopnost držitele licence a jeho subdodavatelů organizovat svou práci v situaci těžké havárie je klíčovým faktorem pro zvládnutí havárie. Tato schopnost je také rozhodující pro prevenci havárií, údržbu zařízení a kvalitu provozu. [124]

Komise ASN 5. května 2011 nařídila francouzským držitelům jaderných licencí, aby provedli doplňkové posouzení bezpečnosti všech svých zařízení. Posouzení bylo rozděleno do tří kategorií. První zahrnuje provozované jaderné elektrárny, hlavní výzkumné reaktory a hlavní zařízení jaderného palivového cyklu. Ve druhé jsou zařízení vyřazovaná z provozu a výzkumná zařízení. Ve třetí jsou zařízení na ukládání odpadů a další zařízení s menšími riziky. [124]

Dále se doplňkové hodnocení bezpečnosti zabývalo situací po teroristickém činu, přestože havárie ve Fukušimě nebyla spojena s teroristickým činem. Teroristické činy jsou jednou z možných příčin ztráty dodávek elektrické energie nebo chlazení reaktoru. [124]

ASN 3. ledna 2012 došla k závěru, že žádný z 58 jaderných reaktorů nevyžaduje okamžité odstavení. Zároveň konstatovala, že jejich další provoz vyžaduje co nejdříve zvýšit jejich odolnost proti extrémním situacím, které přesahují jejich stávající bezpečnostní rezervy. [125, 126]

V jaderných elektrárnách byly instalovány nezávislé EDG pro každý provozovaný reaktor. Každý EDG je umístěn v seismicky odolném kontejneru, ve kterém jsou prostředky pro zajištění chlazení a napájení EDG, včetně palivové nádrže. Byla prodloužena provozní doba baterií z 1 hodiny na 2 hodiny. Dobíjení těchto baterií je v případě potřeby zajištěno pomocí EDG. Byly instalovány nouzové systémy zásobování vodou a nouzová řídicí centra chráněná krytem, aby odolala rozsáhlým vnějším událostem, které současně postihnou více bloků. [126, 127]

Od roku 2012 je v činnosti jaderná zásahová jednotka (FARN — Force d'Action Rapide du Nucléaire) jako národní systém reakce v případě těžké havárie. FARN se skládá ze specializovaného personálu a technického vybavení pro nahrazení bezpečnostních systémů jaderných elektráren. V případě těžké havárie nejprve na místo dorazí tým, který zahájí provádění krizových opatření prostřednictvím vybavení rychlého nasazení. Následně je v několika fázích zajištěn příjezd dalšího technického vybavení a personálu potřebného pro řešení mimořádné situace. Hlavním cílem FARN je obnovit dodávky vody a elektřiny v jaderné elektrárně do 12 hodin. [127, 128]

Tým FARN tvoří zhruba 300 zaměstnanců, přičemž každá základna má 5 skupin po 14 členech, ty jsou rozmístěny ve čtyřech základnách: Bugey, Paluel, Civaux a Dampierre-en-Burly. Ve skladech na základnách jsou mobilní EDG (viz obr. 26), která mají

mobilní čerpací stanice paliva (viz obr. 27) a mobilní palivová čerpadla (viz obr. 28) k zajištění delšího provozu, a mobilní čerpadla, viz obr. 29. [129, 130]



Obrázek 26: Mobilní EDG o výkonu 100 kW a hmotnosti 3500 kg. Pro každý reaktor jsou potřeba dvě zařízení, převzato z [130].



Obrázek 27: Mobilní čerpací stanice o průtoku až 36 m³/h a hmotnosti 8000 kg, převzato z [130].



Obrázek 28: Mobilní palivové čerpadlo o průtoku až 3,6 m³/h a mobilní nádrže o objemu 600 l a hmotnosti 600 kg a 1000 kg, převzato z [130].



Obrázek 29: Mobilní čerpadlo s průtokem 210 m³/h a tlakem až 10 bar s hmotností 3500 kg, které je přivezeno na valník tahače, převzato z [130].

Pro přepravu havarijního vybavení, jako jsou EDG, čerpadla, potrubí, palivo a další vybavení, jsou k dispozici osobní terénní vozy 4x4 a těžká nákladní vozidla (viz obr. 30 a obr. 31) s valníky a návěsy. Některá nákladní vozidla jsou také vybavena hydraulickými rameny pro manipulaci s havarijním vybavením. V případě extrémní události, kdy dojde k zablokování přístupových cest k jaderným elektrárnám, jsou ve skladech k dispozici bagry pro odstranění trosky. Když dojde k záplavám, je možné použít vodní čluny a plavidla k přepravě členů FARN a havarijního vybavení. Také je možné k přepravě havarijního vybavení využít vrtulník (viz obr. 32), který rozšiřuje možnosti přepravy. Při zřízení velitelského stanoviště je na místo dopraveno mobilní telekomunikační zařízení (viz obr. 33), aby mohl fungovat krizový štáb na zřízeném místě. Jednotky mají vysílačky, aby mohly komunikovat i v případě špatného signálu. [130]



Obrázek 30: Nákladní vozidlo Scania s havarijním vybavením a osobní terénní vozidlo 4x4 Toyota Hilux, převzato z [130].



Obrázek 31: Nákladní vozidlo s valníkem, na kterém je naložený nakladač, převzato z [130].



Obrázek 32: Vrtulník EC 225 s nosností 3500 kg, převzato z [130].



Obrázek 33: Mobilní telekomunikační zařízení krizového štábu na provizorně zřízeném místě, převzato z [130].

Ve Francii bylo odstaveno již celkem 14 jaderných reaktorů, přičemž jich bylo 12 odstaveno před havárií ve Fukušimě. V roce 2012 vláda oznámila plány na odstavení dvou reaktorů v Fessenheimu do roku 2017. Toto rozhodnutí nevyplývalo z výsledků zátěžových testů ani z dalších bezpečnostních hodnocení, ale bylo provedeno na základě politických rozhodnutí. Tyto dva reaktory byly odstaveny nakonec až v únoru a červnu 2020. Tato odstavení souvisela se zákonem o energetické transformaci pro zelený růst, ten omezil v říjnu 2014 jadernou kapacitu na 63,2 GW a pro spuštění nových jaderných elektráren bylo nutné odstavit staré jaderné elektrárny, aby nebyla překročena hodnota výkonu 63,2 GW. [131]

EDF oznámila program na prodloužení životnosti jaderných reaktorů v roce 2011. Cílem tohoto programu byla modernizace jaderných elektráren s cílem zvýšit výkon a zajistit delší provoz než 40 let. V roce 2021 ASN stanovila podmínky pro prodloužení životnosti reaktorů o výkonu 900 MW po uplynutí 40 let provozu. V srpnu 2024 se jako první reaktor s licenci po 40 letech provozu stal 1. blok JE Tricastin. Také se prozkoumávají možnosti pro 60letý provoz jaderných elektráren. [131]

Po 25 letech byl v prosinci 2024 uveden do provozu jaderný reaktor Flamanville 3 o výkonu 1620 MW a konstrukce Evropského tlakovodního reaktoru (EPR — European Pressurized Reactor). Stavba byla zahájena v roce 2007 a měla být původně dokončena v roce 2012. [131]

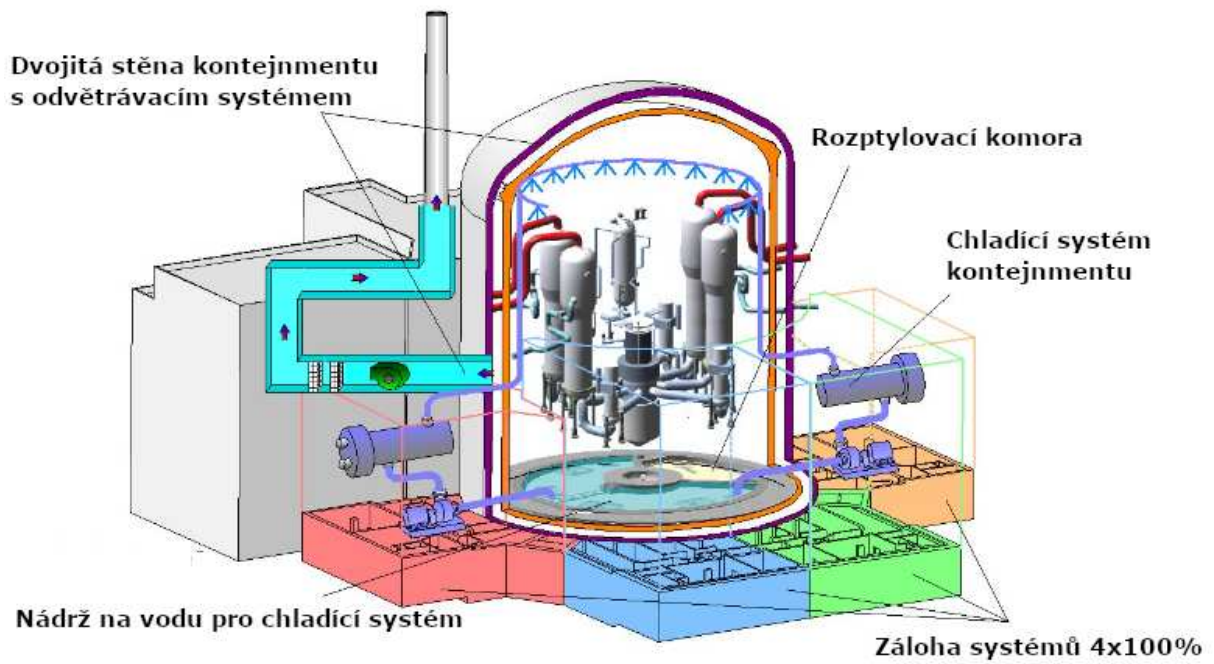
EPR je tlakovodní reaktor třídy o výkonu 1600 MW a jeho konstrukce vychází z poznatků o provozování moderních francouzských reaktorů N4 a německých reaktorů KONVOI. Bezpečnostní opatření EPR jsou následující: [132]

- Bezpečnostní systémy se zálohou 4x100%, viz obr. 34.
- Snížení rizika poruch ze společné příčiny je dosaženo fyzickým oddělením a zavedením různých záložních bezpečnostních systémů
- Prodloužení doby pro reakci obsluhy navýšením zásob vody v komponentách, jako jsou parogenerátory, pro plynulý průběh přechodových stavů.
- Snížení citlivosti na lidské chyby pomocí optimalizovaného rozhraní člověk-stroj založeného na digitalizovaných přístrojových a řídicích systémech a informacích o stavu poskytovaných moderními informačními systémy.
- Zvýšení spolehlivosti odvodu tepla při vysokém tlaku v TNR a pomocí ventilů pro snížení tlaku v případě těžkých havárií.
- Zabránění vznícení vodíku snížením koncentrace vodíku v kontejnmentu v rané fázi pomocí katalytických rekombinátorů vodíku.
- Omezení vzájemného působení roztavené aktivní zóny a betonu rozptýlením koría ve speciální rozptylovací komoře, viz obr. 35.
- Snížení tlaku v kontejnmentu pomocí systému odvádění tepla z kontejnmentu, který se skládá ze sprchovacího systému a umožňuje cirkulaci přes chladicí zařízení.
- Zachycení úniku radioaktivních látek a zabránění průniku mimo kontejnment je zajištěno dvojitou stěnou kontejnmentu.

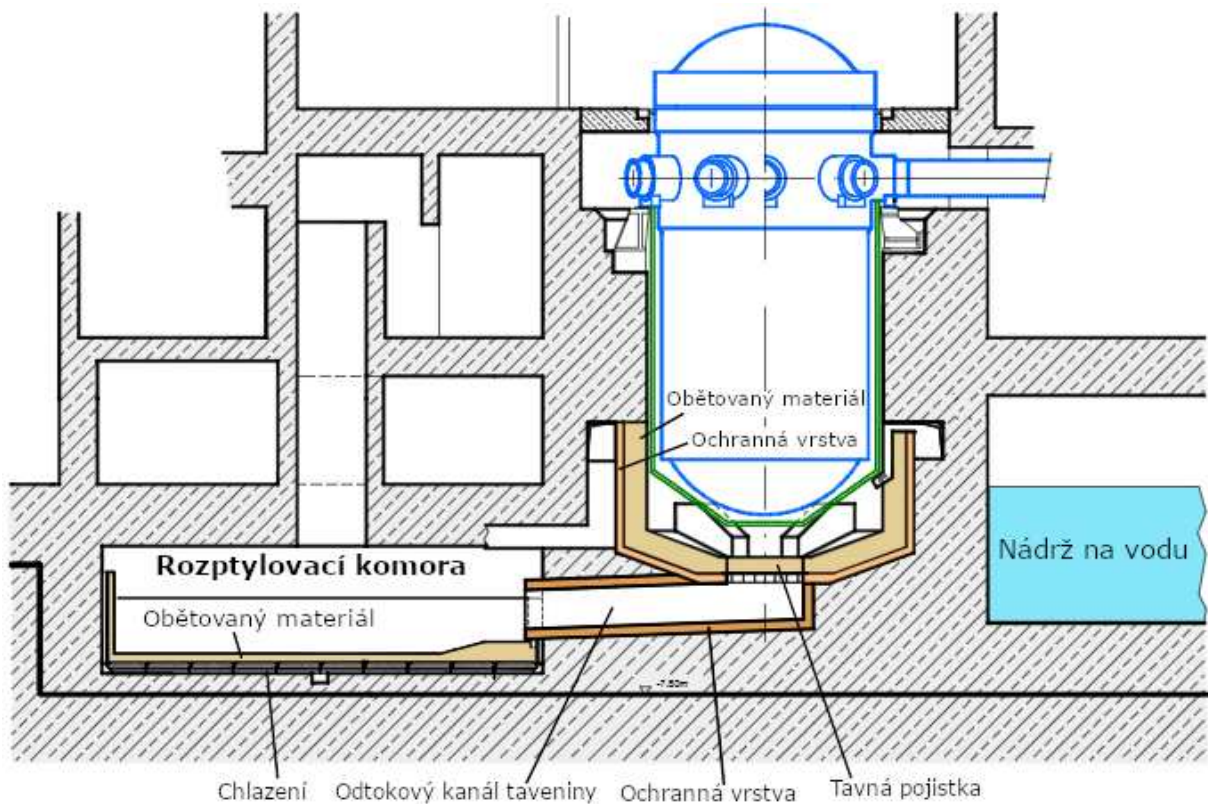
Tato opatření jsou tak striktní, že protiopatření, jako je evakuace obyvatelstva, jsou omezena na bezprostřední okolí elektrárny a omezení používání obilovin a jiných plodin je omezeno na první sklizeň. [132]

Pro ochranu proti vnějším rizikům, jako je pád letadla, jsou budova reaktoru, velín, budova vyhořelého paliva a dvě ze čtyř bezpečnostních budov s EDG chráněny vnějším pláštěm z železobetonu. Další dvě bezpečnostní budovy s EDG jsou situovány na opačných stranách budovy reaktoru, což zajišťuje, že v případě nárazu letadla by byla poškozena pouze jedna z nich, aniž by to mělo dopad na celkovou bezpečnost elektrárny. Podobně jsou EDG pro nouzové napájení elektřinou umístěny ve dvou různých budovách, které jsou rovněž chráněny geografickým oddělením, viz obr. 36. [132]

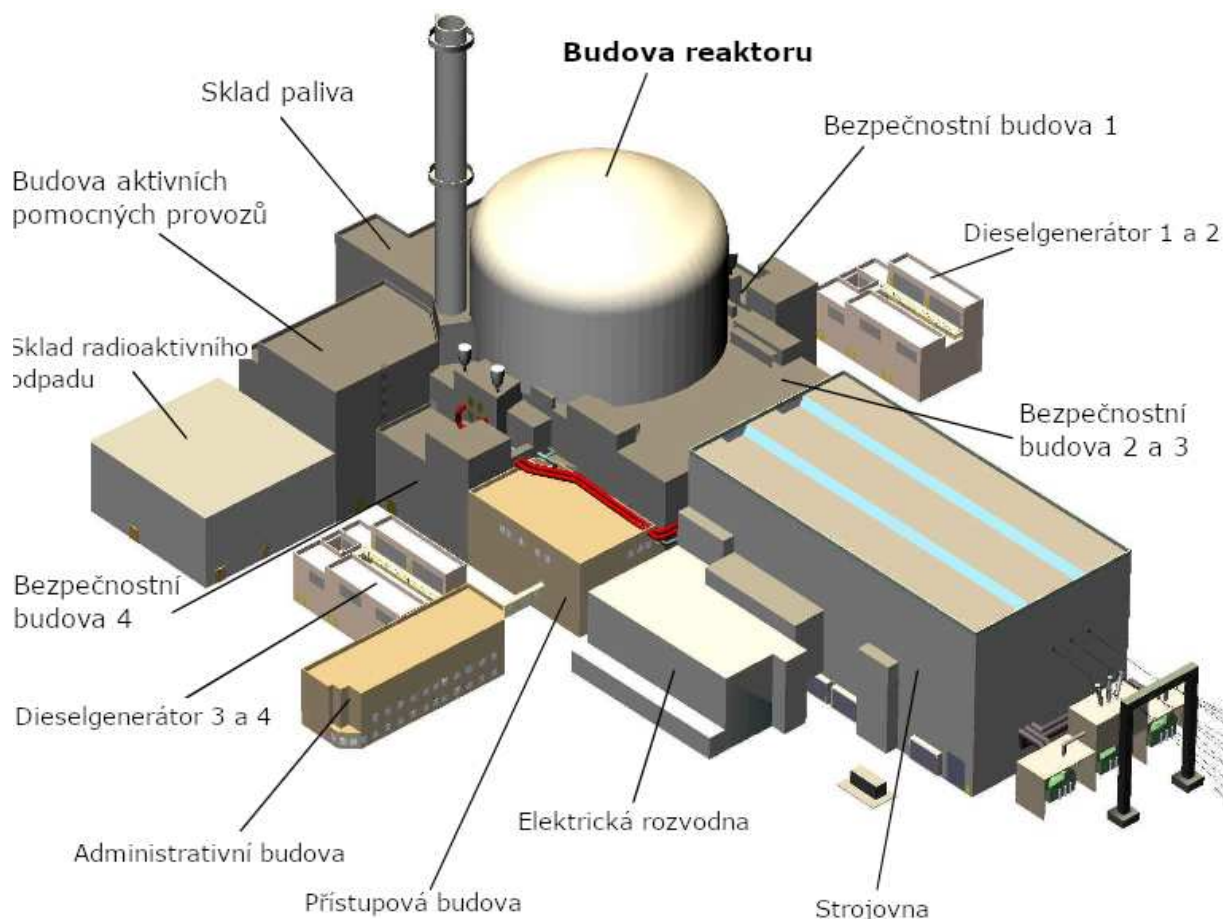
Jaderný blok stojí na jediném základovém železobetonovém podkladu. Výška budov byla navržena co nejnižší a nejtěžší komponenty, zejména vodní nádrže, jsou umístěny v nejnižší možné úrovni, aby budovy odolaly silným zemětřesením. [132]



Obrázek 34: Hlavní bezpečnostní prvky reaktoru EPR, převzato a upraveno z [132].



Obrázek 35: Zmírnění následků vážných nehod, převzato a upraveno z [132].



Obrázek 36: Popis jaderného bloku EPR, převzato a upraveno z [132].

3.2.2 Německo

Německo se po havárii jaderné elektrárny Fukušima Daiichi rozhodlo pro radikální změnu své energetické politiky, která se výrazně lišila od přístupů ostatních zemí. Zatímco mnoho států své jaderné programy pouze přehodnotilo nebo zpřísnilo bezpečnostní normy, Německo se rozhodlo pro úplné ukončení využívání jaderné energie. V červnu 2011 německá vláda pod vedením kancléřky Angely Merkelové oznámila plán na postupné odstavení všech jaderných elektráren do roku 2022. Tento krok byl reakcí na dlouhodobý veřejný odpor proti jaderné energetice, který výrazně zesílil po havárii ve Fukušimě. [133]

V roce 2011 bylo okamžitě odstaveno osm nejstarších německých reaktorů [134]. Poslední tři německé jaderné elektrárny (Emsland, Neckarwestheim 2 a Isar 2) měly být podle původního plánu uzavřeny 31. prosince 2022. Nicméně kvůli energetické krizi, která byla důsledkem geopolitických událostí, se německá vláda rozhodla jejich provoz dočasně prodloužit. Po rozsáhlé debatě bylo stanoveno nové datum uzavření na 15. dubna 2023. [135] Tímto dnem byla v Německu definitivně ukončena výroba elektřiny z jádra a země se po více než šedesáti letech stala státem bez jaderné energetiky. [136]

Německo se rozhodlo místo jádra vsadit na strategii známou jako energetická transformace, jejímž cílem bylo nejen uzavření jaderných elektráren, ale také rozsáhlé investice do obnovitelných zdrojů energie, jako jsou větrné a solární elektrárny. Energetická trans-

formace zároveň klade důraz na snižování emisí skleníkových plynů a na rozvoj technologií pro skladování energie a zlepšení energetické efektivity. [137]

3.3 Severní Amerika

3.3.1 Spojené státy americké

Bezprostředně po havárii došlo ve Spojených státech amerických (USA — United States of America) k rozsáhlému přehodnocení jaderné bezpečnosti, které probíhalo ve dvou hlavních směrech. První vedl přes regulační orgán, což byla americká Komise pro jadernou regulaci (NRC — Nuclear Regulatory Commission). Druhým směrem byla iniciativa samotného jaderného průmyslu, realizovaná pod záštitou Nuclear Energy Institute, Institute of Nuclear Power Operations a Electric Power Research Institute. [138]

NRC po havárii zahájila 90denní zkoumání, jehož cílem bylo dát dohromady poznatky, které byly v té době známy, a vydat doporučení pro zvýšení schopnosti elektráren reagovat na vnější události přesahující původní projektové předpoklady [139]. Komisaři NRC měli pravomoc nařídit jakékoli opatření ke zvýšení bezpečnosti, pokud by byla zjištěna nedostatečná ochrana veřejného zdraví a bezpečnosti. Na základě těchto zjištění byly vydány tři zásadní příkazy. [140]

Prvním bylo nařízení EA-12-049, které nařizuje americkým jaderným elektrárnám zavést Diverzifikační a flexibilní strategie zvládání (FLEX — Diverse and flexible coping strategies). [141]

Další opatření EA-12-050 vyžaduje, aby jaderné elektrárny s varnými reaktory Mark I a Mark II instalovaly spolehlivé odvětrávací systémy kontejnmentu, které umožní uvolnění tlaku a snížení rizika jeho poškození během těžké havárie. [142]

Poslední příkaz EA-12-051 ukládá provozovatelům jaderných elektráren povinnost zavést spolehlivý systém pro monitorování hladiny vody v bazénech s vyhořelým palivem, aby byla zajištěna lepší kontrola a reakce během mimořádné události. [143]

Současně s regulačními kroky zavedl americký jaderný průmysl řadu dobrovolných opatření ke zvýšení bezpečnosti. Jak již bylo uvedeno výše, klíčovým opatřením se stala FLEX, jejímž cílem je zajistit chlazení reaktorů, kontejnmentu a skladovaného paliva v případě rozsáhlých havárií [144]. FLEX zahrnuje tři fáze reakce. První fází je použití pevného trvale instalovaného vybavení k zahájení stabilizace situace. Druhou fází je nasazení mobilních zdrojů umístěných přímo v areálu elektrárny. Ve třetí fázi se do 24 hodin z národních centrálních skladů dopravuje další mobilní vybavení, viz obr. 37, 38 a 39. [145]

Další opatření zahrnují vylepšení nouzové komunikace, nové přístupy k personálnímu zajištění krizového řízení a důkladné kontroly ochrany proti povodním. Kromě toho byly zavedeny nové standardy pro zajištění dodatečných zásob elektrické energie a vodního chlazení, které umožňují jaderným elektrárnám zachovat klíčové bezpečnostní funkce i při dlouhodobém výpadku vnějšího napájení [147] Americké jaderné elektrárny rovněž posílily systémy pro kontrolu koncentrace vodíku v kontejnmentu, aby se snížilo riziko exploze podobné té, která nastala ve Fukušimě. Zavedly se pokročilé monitorovací systémy umožňující lepší vyhodnocení kritických parametrů během nouzových situací. [148]

Přijatá opatření vedla k podstatnému posílení jaderné bezpečnosti v USA. NRC pokračuje v monitorování zavádění těchto změn a provádí průzkumy, které posuzují účinnost nových strategií. I když byly některé návrhy dodatečných zlepšení, například plně filtrované odzdušňovací systémy, zamítnuty kvůli ekonomickým nákladům, celkově došlo



Obrázek 37: Zařízení na čištění vody, umístěné v Národním centru ve Phoenixu v Arizoně, je navrženo tak, aby umožňovalo využití kvalitnější vody pro doplňování chladicího systému reaktoru, převzato z [146].



Obrázek 38: Vysokotlaké čerpadlo k vstřikování borové chladicí vody do reaktoru v elektrárně Palo Verde v Arizoně. Tato voda se vstřikuje do chladicího systému reaktoru, aby se udržela podkritičnost reaktoru, převzato z [146].



Obrázek 39: Čerpadlo z artézské studny pro parogenerátor elektrárny Turkey Point na Floridě. Slouží k doplňování nádrže vodou ze studny za účelem dodání vody do parogenerátoru, převzato z [146].

k významnému pokroku v oblasti havarijní připravenosti. Dále se diskutuje o možnosti zavedení dodatečných opatření zaměřených na zvládnutí vícenásobných havárií v rámci jedné lokality, to je problém, který plyne ze zkušeností z Fukušimy. [138]

3.3.2 Kanada

Po oznámení jaderné havárie ve Fukušimě Daiichi Kanadská komise pro jadernou bezpečnost (CNSC — Canadian Nuclear Safety Commission) okamžitě aktivovala své krizové operační centrum v Ottawě, aby sledovala situaci a zavedla bezpečnostní opatření. Už 6 dní po havárii 17. března 2011 CNSC vydává směrnici pro všechna významná jaderná zařízení v Kanadě a nařizuje jim zhodnotit první získané poznatky, přehodnotit své bezpečnostní analýzy a podat zprávu o řešení zjištěných nedostatků. 22. března CNSC vydává směrnici pro uranové doly a zařízení s výzkumnými reaktory. Do konce července 2011 CNSC vydává kritéria pro bezpečnostní posouzení, aby ujasnila rozsah kanadských zátěžových testů. [149]

Přezkum jaderných elektráren potvrdil jejich bezpečnost a robustnost konstrukce, která zajišťuje, že nedojde k ohrožení veřejnosti v případě havarijních scénářů vyvolaných vnějšími událostmi. Zároveň byl vytvořen akční plán na další posílení bezpečnosti jaderných elektráren. Také bylo potvrzeno, že zařízení s reaktory, která neslouží k výrobě elektrické energie, jako jsou uranové doly a zařízení na zpracování jaderného paliva, zařízení pro nakládání s odpady a výzkumná zařízení, jsou bezpečná a připravená na řešení potenciálních mimořádných událostí. [149, 150]

CNSC stanovila komplexní čtyřletý akční plán, který se realizuje ve třech fázích: krátkodobá do prosince 2012, střednědobá do prosince 2013 a dlouhodobá opatření do prosince 2015, viz tab. 5. [151]

Tabulka 5: Harmonogram provádění akcí, převzato a upraveno z [151].

Doporučení CNSC	Krátkodobé	Střednědobé	Dlouhodobé
Posílení ochrany reaktorů			
1. Provéřit odolnost návrhů JE	x		x
2. Analyzovat externí rizika pro každou lokalitu		x	x
3. Posílit modelovací schopnosti		x	
Zlepšení reakce na mimořádné situace			
4. Analyzovat plány nouzových opatření	x		
5. Modernizovat nouzové vybavení a zařízení	x		
6. Mimoareálové havarijní plány a opatření			x
Zlepšení regulačního rámce			
7. Novelizace vyhlášky <i>Class I Nuclear Facilities Regulations</i>		x	
8. Novelizace vyhlášky <i>Radiation Protection Regulations</i>		x	
9. Aktualizace okruhu regulačních dokumentů	x	x	
10. Úprava provozních licencí pro jaderné elektrárny	x		
11. Zavedení periodických přezkumů bezpečnosti	x		
Zlepšení mezinárodní spolupráce			
12. Zlepšení spolupráce se zeměmi provozujícími reaktory CANDU	x		
13. Zlepšení mezinárodní spolupráce	x		

Provozovatelé JE museli začít zohledňovat i ty nejméně pravděpodobné události. Proto provozovatelé přehodnotili rizika, která byla dříve v některých částech Kanady považována za nepravděpodobná. Posuzovali povodně, zemětřesení a tornáda. Na základě posouzení byly instalovány vodotěsné dveře, protipovodňové bariéry a výztuže zařízení. [152]

JE byly vybaveny přenosným nouzovým vybavením, jako jsou EDG, čerpadla a hadice, aby v havarijní situaci mohly nahradit nefunkční zařízení elektrárny. Nouzové vybavení v případě potřeby zajistí chlazení reaktorů a vyhořelého jaderného paliva. [152]

Do kontejnmentů byly přidány pasivní autokatalytické rekombinátory ke snížení koncentrace vodíku. Tato zařízení fungují bez napájení a byla instalována jako rozšíření stávajících zapalovačů nebo hořáků vodíku. [152]

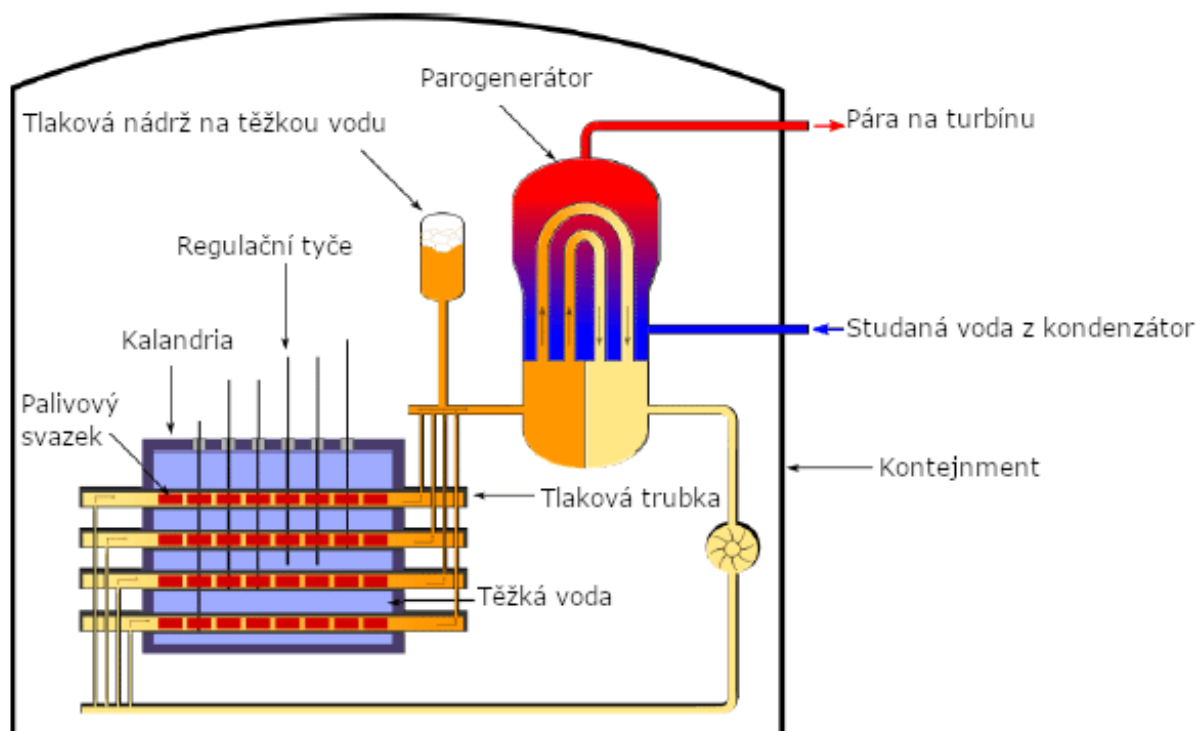
CNSC nařídila přehodnocení mechanismů zabráňujících únikům radiace. Toto nařízení vedlo ve dvou zařízeních k instalaci nouzových filtračních ventilačních systémů, které k provozu nepotřebují elektřinu a lze je aktivovat ručně. [152]

V zónách v okruhu až 50 km od jaderných elektráren CNSC vyzvala k distribuci tablet jodidu draselného. V rámci akčního plánu byly instalovány v okolí jaderných elektráren další stanice pro monitorování radiace, které jsou schopné monitorovat radiaci v reálném čase. [152]

Kanada používá pouze reaktory CANDU a v současné době jich je v zemi spuštěných 17. V současné době investuje do modernizace a prodloužení životnosti stávajících reaktorů. Zároveň se Kanada profiluje jako přední světový lídr v oblasti vývoje malých modulárních reaktorů. [153]

Reaktor CANDU

Reaktor CANDU je tlakovodní reaktor moderovaný a chlazený těžkou vodou, viz obr. 40. Těžká voda (D_2O) se využívá jako moderátor ke zpomalení neutronů v reaktoru, to umožňuje použití přírodního uranu jako paliva. Použití přírodního uranu vylučuje procesy, jako je přepracování a obohacení uranu. [154]



Obrázek 40: Schéma reaktoru CANDU, převzato a upraveno z [155].

V reaktorech CANDU 6 je přírodní uran rozdělen do 380 palivových kanálů, které jsou 6 m dlouhé a obsahují 12 palivových článků. Palivové kanály jsou uloženy v horizontální válcové nádrži, kde je chladicí těžká voda pod nízkým tlakem. [156]

Palivové stroje se připojují k jednotlivým palivovým kanálům, aby zajistily doplňování paliva za provozu, což eliminuje nutnost odstávek kvůli výměně paliva. Tyto stroje lze také použít k odstranění vadného palivového článku v případě, kdy dojde k poruše. Reaktory jsou vybaveny systémy pro identifikaci a lokalizaci vadného palivového článku. [156]

Primární chladicí systém je uzavřený okruh s vysokotlakou těžkou vodou, tlak chladiwa je 10 MPa, aby nedošlo k varu. Toto chladiwo proudí do parogenerátorů, kde předává teplo sekundárnímu okruhu s lehkou vodou a vytváří páru, a poté se vrací zpět do palivových kanálů. [156]

Všechny jaderné reaktory mají dva nezávislé a rychle reagující systémy odstavení. První systém odstavení se skládá z regulačních tyčí, které se automaticky spustí a zastaví řetězovou reakci, pokud je zjištěna mimořádná událost. Druhý systém vstřikuje do reaktoru boritou vodu, která okamžitě zastaví řetězovou reakci. Oba systémy fungují bez napájení a bez zásahu obsluhy. Lze je však také aktivovat ručně. Odstavený reaktor se automaticky sám nespustí a v odstaveném stavu je, než ho operátor spustí ručně. [157]

V případě odstavení a odpojení reaktoru od napájení mají elektrárny EDG a v případě selhání mají dva nebo tři záložní EDG a nouzové baterie. Z těchto zdrojů by byly napájeny chladicí systémy. Může nastat situace, kdy budou tyto zdroje energie vyřazeny z provozu. Reaktory CANDU mají schopnost chlazení přirozenou cirkulací. Tato cirkulace funguje díky rozdílu teplot a výškovému rozdílu mezi parogenerátory a aktivní zónou reaktoru, která je pod parogenerátory. Podmínkou cirkulace je naplnění parogenerátorů studenou vodou. [157]

Proti zvýšení tlaku v kontejnmentu způsobenému únikem páry uvnitř budovy reaktoru jsou nainstalovány bezpečnostní systémy. V elektrárně s jedním reaktorem by byl tlak snížen rozstříkáním vody z hasicí nádrže. V elektrárně s více reaktory by byl tlak snížen odváděním páry a horkých plynů z budov reaktorů do vakuové budovy. Vakuová budova je konstruována pro snížení tlaku uvnitř reaktoru a je také vybavena hasícím systémem. [157]

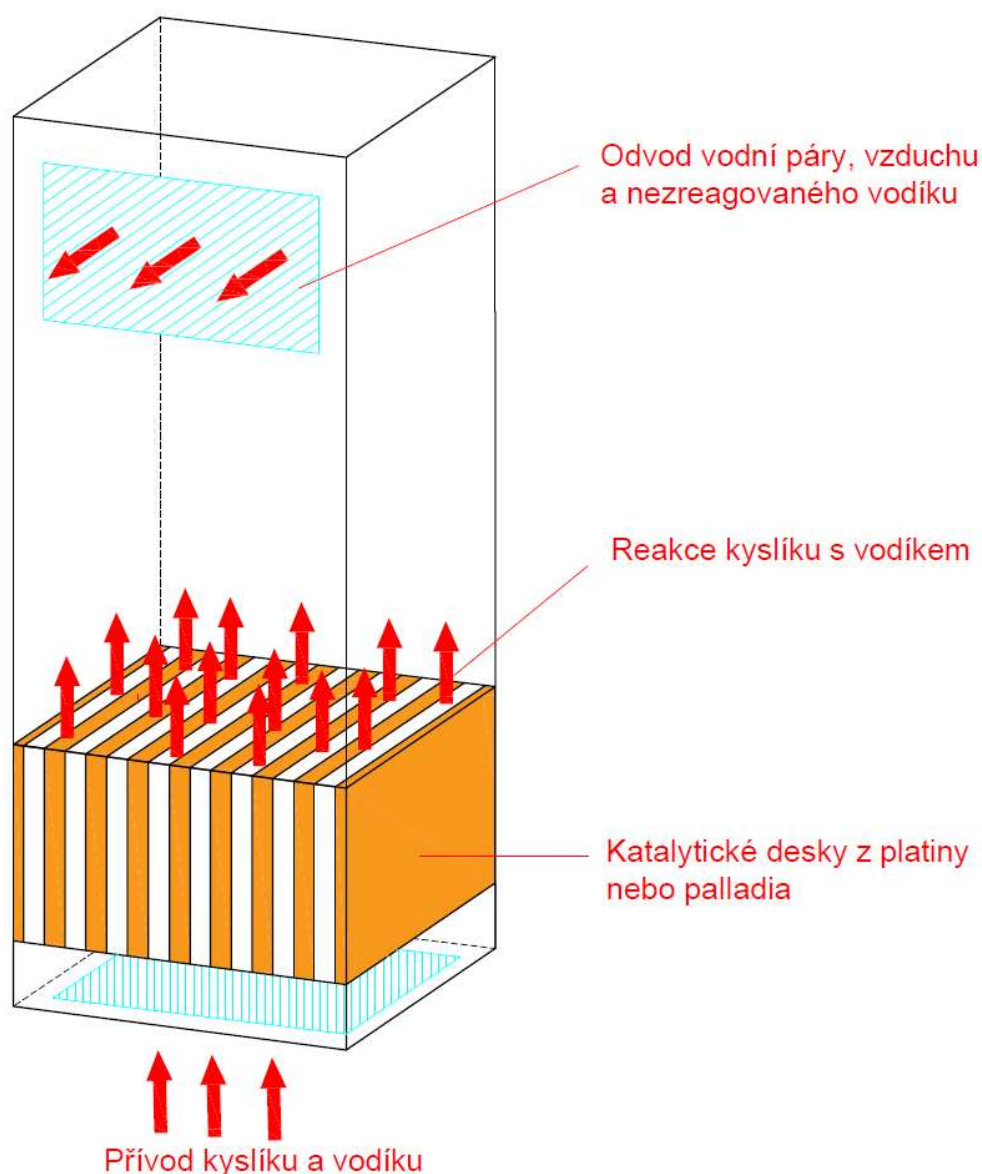
Pasivní autokatalický rekombinátor reaktoru CANDU

Při těžkých haváriích může dojít k uvolnění vodíku do kontejnmentu. Pro snížení rizika nekontrolovaného vznícení byly uvnitř kontejnmentů instalovány pasivní autokatalytické rekombinátory, viz obr. 41. Toto zařízení dokáže během havárie přeměnit vodík na vodní páru. [158, 159]

Katalytické desky, například platina nebo palladium, podporují chemické reakce tím, že snižují aktivační energii, což umožňuje, aby reakce probíhaly při nižších teplotách a koncentracích vodíku. [159]

Pasivní autokatalytický rekombinátor dokáže přeměnit vodík na vodní páru bez potřeby vnějšího zdroje energie. Vodík vstupuje do zařízení ve tvaru komínu, kde se katalytický materiál nachází na jeho spodní části. Na povrchu katalytických desek se vodík společně s kyslíkem adsorbuje a katalytická reakce, která zde probíhá, uvolňuje teplo. Toto uvolněné teplo následně samočinně udržuje konvekční proudění v zařízení. [159]

Testy prokázaly, že rekombinátory jsou odolné proti vlhkosti, vysokým teplotám, radiačnímu zatížení a chemickým podmínkám, které mohou nastat v kontejnmentu po havárii. Katalyzátory použité v těchto zařízeních si zachovávají svou účinnost i po opakovaném vystavení nepříznivým podmínkám a dokážou se znovu aktivovat, pokud dojde k dalšímu uvolnění vodíku. [158]



Obrázek 41: Pasivní autokatalický rekombinátor, převzato a upraveno z [158].

3.4 Další země

Čína

Po havárii ve Fukušimě Daiichi Čína okamžitě pozastavila schvalování nových jaderných elektráren a nařídila bezpečnostní kontroly všech jaderných projektů, včetně těch ve výstavbě. Tato opatření vedla k dočasnému zastavení rychlé expanze čínského jaderného programu. [160]

Po provedení důkladných bezpečnostních prověrek a schválení nového bezpečnostního plánu v říjnu 2012 Čína obnovila schvalování nových jaderných projektů [161]. Od té doby pokračuje ve svém plánu rozšiřování jaderné energetiky, přičemž klade důraz na moderní reaktorové technologie a přísnější bezpečnostní standardy. V srpnu 2024 schválila čtyři nové reaktory AP1000 od společnosti Westinghouse pro dva různé projekty. [162]

Rusko

Po havárii ve Fukušimě Rusko, podobně jako mnoho dalších zemí, nařídilo bezpečnostní prověrky svých jaderných elektráren, aby zajistilo jejich odolnost proti extrémním událostem. Dne 9. června 2011 ruská Státní rada v rámci přezkumu identifikovala více než 30 nedostatků, včetně snížených bezpečnostních standardů pro mimořádné události a nejasné strategie pro nakládání s vyhořelým jaderným palivem a dalším radioaktivním odpadem [163]. Tyto závěry poukázaly na nutnost posílení bezpečnostních opatření, ale nevedly k přehodnocení jaderné politiky země. Na rozdíl od některých států, které se po fukušimské havárii rozhodly postupně odstavovat své reaktory, Rusko svůj jaderný program nezastavilo, ale naopak se zaměřilo na jeho další rozvoj. Místo uzavírání jaderných elektráren se ruské úřady soustředily na modernizaci a bezpečnostní úpravy jak u stávajících zařízení, tak i u nově budovaných reaktorů, s cílem zajistit vyšší úroveň ochrany proti možným haváriím. [133, 164]

Zásadním rozdílem oproti jiným státům byla také silná orientace Ruska na export jaderných technologií. Zatímco některé země po Fukušimě omezily výstavbu nových reaktorů a zpřísnily legislativu, Rusko využilo situace k posílení svého postavení na mezinárodním trhu. Státní korporace Rosatom se stala jedním z hlavních světových dodavatelů jaderných technologií a podepsala dohody o výstavbě elektráren v řadě zemí, včetně Běloruska, Maďarska, Egypta a Turecka [165]. Tato strategie nejen podpořila ruský průmysl, ale také posílila geopolitický vliv země, protože jaderná spolupráce často zahrnovala dlouhodobé kontrakty na dodávky paliva a údržbu elektráren. Ruský přístup tak ilustruje pragmatickou strategii, která namísto ústupu od jádra kladla důraz na modernizaci technologií, bezpečnostní inovace a expanzi na zahraniční trhy, čímž se odlišil od mnoha západních zemí. [166]

4 Srovnání opatření přijatých ve vybraných státech světa

V této kapitole budou srovnána opatření, která byla přijata v České republice, Francii, Německu, Japonsku, Jižní Koreji, USA a Kanadě.

4.1 Založení regulačních orgánů

V Japonsku byla před havárií regulace jaderných elektráren nedostatečná kvůli propojení s vládními orgány a jaderným průmyslem. Proto byl v roce 2012 založen úřad pro jadernou bezpečnost (NRA — Nuclear Regulation Authority). NRA nahradil Japonskou komisi pro jadernou bezpečnost (NSC — National Security Council) a úřad pro jadernou a průmyslovou bezpečnost (NISA — Nuclear and Industrial Safety Agency), který nebyl dostatečně nezávislý, protože byl pod Ministerstvem hospodářství, obchodu a průmyslu. NRA je zřízený jako „externí úřad“ Ministerstva životního prostředí, a proto se jedná o nejvíce nezávislý orgán v Japonsku. Předsedu a čtyři členy komise jmenuje na funkční období pěti let premiér se souhlasem parlamentu. [102]

Podobně reagovala Jižní Korea, kde mělo regulaci na starost Ministerstvo školství, vědy a technologie (MEST — Ministry of Education, Science and Technology), které také podporovalo jadernou energetiku. Proto byla už v roce 2011 založena Nuclear Safety and Security Commission (NSSC), která byla později zařazena přímo pod úřad předsedy vlády. [112]

Naopak Česká republika nadále spoléhala na svůj stávající Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB), který zůstal zodpovědný za jadernou bezpečnost a radiační ochranu beze změn své regulační působnosti. [98]

Francie, Německo, USA a Kanada také nezaložily nový regulační orgán, ale regulační orgány posílily bezpečnostní požadavky na provozovatele jaderných elektráren. [124, 134, 138, 149]

4.2 Zátěžové testy

V Japonsku byla přijata nejprísnější bezpečnostní opatření. V zemi odstavili všechny z 54 provozovaných reaktorů, aby mohli provést rozsáhlé zátěžové testy a související modernizace. Hlavní pozornost byla zaměřena na testování ochrany proti zemětřesení a tsunami. [102]

V Jižní Koreji zahájila KHNP pět dní po fukušimské havárii dobrovolné testy, na které navázala kontrola nařízená vládou. [111]

V Evropské unii, včetně České republiky, Francie a Německa, proběhly zátěžové testy pod vedením ENSREG. Zahrnovaly třífázový proces. Provozovatelé elektráren provedli individuální posouzení odolnosti, ve kterých se zabývali iniciačními událostmi (zemětřesení, povodně a povětrnostní podmínky), výpadkem bezpečnostních systémů (problémy s výpadkem elektrické energie nebo chlazením reaktoru) a řízením těžkých havárií. Následovalo přezkoumání národními regulačními orgány, které vyvrcholilo přezkoumáním na evropské úrovni. Zátěžové testy se zaměřily na více než 140 reaktorů v zemích EU a vedly k přijetí

národních akčních plánů k řešení bezpečnostních nedostatků, včetně mobilních zařízení. [54]

V USA probíhalo přehodnocování bezpečnosti přes Komisi pro jadernou regulaci (NRC — Nuclear Regulatory Commission) a přes iniciativu jaderného průmyslu. NRC provedla 90denní zkoumání a poté měla pravomoc nařídit jakékoliv kroky pro zvýšení bezpečnosti. [138, 139]

V Kanadě probíhaly zátěžové testy pod vedením Kanadské komise pro jadernou bezpečnost (CNSC — Canadian Nuclear Safety Commission) a testovala se připravenost na extrémní přírodní události. CNSC kladla důraz na schopnost zařízení zvládat dlouhodobé výpadky elektrické energie a chlazení. [149]

4.3 Záložní napájení a chlazení

Hlavním zjištěním havárie ve Fukušimě byla nutnost zajistit napájení a chlazení i při úplné ztrátě elektrické energie. V reakci na toto zjištění státy přijaly technická opatření k posílení nezávislého napájení a zajištění chlazení jaderného paliva v reaktoru a v bazénu s vyhořelým palivem.

V České republice došlo k pořízení dieselgenerátorů, mobilních dieselových generátorů a čerpadel, které jsou umístěny mimo hlavní budovy. Tato zařízení jsou odolná proti povětrnostním podmínkám a zemětřesení. [64]

Ve Francii Francouzský úřad pro jadernou bezpečnost (ASN — Nuclear Safety Authority) vyžadoval zavedení bateriových systémů a mobilních dieselových generátorů umístěných v seismicky odolném kontejneru. [127]

Německo posilovalo záložní zařízení souběžně s rozhodnutím o postupném odstavení jaderných elektráren. Proto využívalo dočasná opatření, jako jsou mobilní záložní systémy, které mohly být flexibilně nasazeny ve více elektrárnách dle potřeby. [167]

V Japonsku a Jižní Koreji také instalovali mobilní dieselgenerátory a bateriové systémy. V Japonsku byla přijata opatření proti tsunami postavením mořských valů u jaderných elektráren. [108, 111]

V USA se záložní napájení a chlazení spoléhá na strategii Diverse and flexible coping strategies (FLEX). Tato strategie kombinuje instalované záložní zdroje energie a čerpadla přímo v elektrárně s nasazením mobilních zařízení umístěných mimo areál elektrárny ve skladech. Tyto mobilní zařízení jsou společné pro více elektráren současně. [145]

V Kanadě stejně jako v dalších zemích instalovali dieselgenerátory a mobilní čerpadla. Nouzové plány se zde ale zaměřily na schopnost dlouhodobého samostatného provozu záložních systémů bez externí pomoci, to se týkalo zásob paliva a vody. [152]

4.4 Srovnání počtu reaktorů před havárií a v roce 2025

V této kapitole bude podrobně vysvětlena tab. 6 a graf, viz obr. 42.

Česká republika si udržela stejný počet jaderných reaktorů, protože vláda nezměnila strategii. Je zde plánovaná nová jaderná elektrárna Dukovany II. [168]

Před havárií provozovalo Japonsko 54 reaktorů. Všechny reaktory byly po havárii dočasně odstaveny kvůli bezpečnostním kontrolám. Jejich pomalé znovuspuštění ukazuje přísná regulační předpisy zavedené NRA. V současné době je spuštěna pouze čtvrtina jaderných elektráren v zemi. [103, 107]

Jižní Korea po havárii pokračovala výstavbou dalších reaktorů a jako jediná ze srovnávaných zemí zvýšila počet jaderných reaktorů. V současné době je v zemi spuštěno 26 reaktorů. [118]

Francie s třetím největším počtem jaderných reaktorů na světě zaznamenal mírný pokles reaktorů, což souvisí s vládními plány na postupné snižování závislosti na jaderné energii a investicemi do obnovitelných zdrojů. [131]

Německo zvolilo nejradikálnější přístup. Tímto přístupem bylo postupné odstavení všech jaderných elektráren do roku 2023. Jaderná energetika zde tak po více než 60 letech přestala vyrábět elektrickou energii. [136]

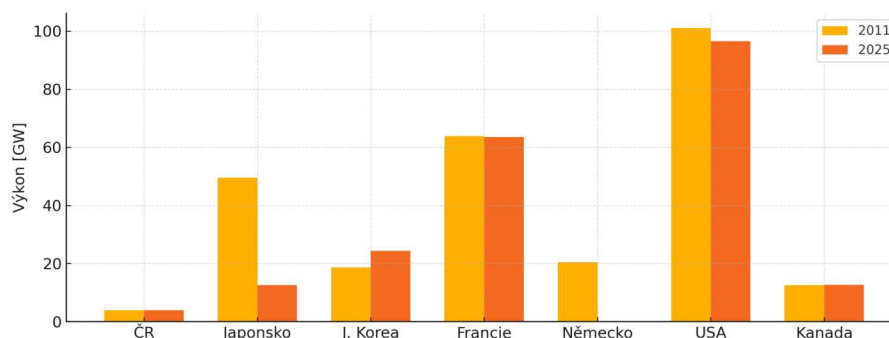
USA jako světový lídr v počtu jaderných reaktorů zaznamenaly mírný pokles počtu reaktorů, což je způsobeno postupným odstavováním starších bloků. V zemi ale pokračuje výstavba nových jaderných reaktorů. [169]

V Kanadě celkový počet reaktorů klesl v důsledku postupného odstavování starších bloků. Postupně se ale počet reaktorů bude zvyšovat, protože se připravují malé modulární reaktory. [153]

Srovnání ukazuje, že se reakce zemí na havárii lišily. Vlády zohlednily geografická rizika i postoje veřejnosti do svých politik.

Tabulka 6: Počet spuštěných reaktorů před Fukušimou a v roce 2025 ve vybraných zemích [99, 106, 111, 120, 125, 153, 168, 169, 170, 171, 172].

Země	Před Fukušimou	V roce 2025
Česká republika	6	6
Japonsko	54	14
Jižní Korea	21	26
Francie	58	57
Německo	17	0
USA	104	94
Kanada	20	17



Obrázek 42: Instalovaný výkon JE ve vybraných zemích před Fukušimou a v roce 2025 [106, 113, 131, 153, 168, 169, 171, 172].

Závěr

Tato bakalářská práce se zaměřila na analýzu opatření přijatých v jaderných elektrárnách Temelín a Dukovany v České republice po havárii ve Fukušimě Daiichi, dále na přehled obdobných opatření realizovaných v Japonsku, Jižní Koreji, Francii, Německu, USA a Kanadě a na srovnání těchto přístupů s cílem identifikovat rozdíly a podobnosti v oblasti jaderné bezpečnosti.

Kapitola věnovaná jaderné elektrárně Fukušima Daiichi popisuje umístění šesti varných reaktorů v areálu a jejich bezpečnostní systémy. Vysvětluje rozhodnutí provozovatele, společnosti Tokyo Electric Power Company, snížit úroveň terénu. Pro lepší pochopení fungování systému Isolation Condenser je uvedeno schéma. Dále je popsán průběh havárie, zahrnující dopad zemětřesení a tsunami na elektrárnu, výpadek napájení, selhání chladicích systémů, nárůst tlaku v tlakové nádobě reaktoru (TNR), odtlakování TNR a výbuchy vodíku. Zabývá se také dlouhodobým řešením havárie, jako je vypouštění vyčištěné vody obsahující pouze tritium pomocí Advanced Liquid Processing System.

V České republice byly po havárii provedeny zátěžové testy, které hodnotily odolnost jaderných elektráren proti extrémním přírodním rizikům, jako jsou zemětřesení, záplavy a extrémní počasí. V práci jsou popsána přijatá opatření, mezi která patří instalace nouzových dieselgenerátorů, výstavba ventilátorových věží, z odolnění budov proti zemětřesení, vytvoření přípojních míst pro chlazení TNR, pořízení traktorbagru pro odstraňování trosků a zřízení havarijních řídicích místností v obou jaderných elektrárnách. Technická opatření realizovaná v jaderné elektrárně Temelín jsou doplněna o vlastní fotografickou dokumentaci, která ilustruje konkrétní provedené změny a modernizace.

Porovnávané země zvolily obdobný přístup a zahájily testování bezpečnosti svých jaderných elektráren. V jaderných elektrárnách instalovaly nouzové dieselgenerátory, nouzové chladicí systémy, rekombinátory vodíku a aktualizovaly havarijní plány. Zásadní odlišnosti jsou uvedeny v tomto seznamu:

- Japonsko odstavilo všech 54 provozovaných reaktorů a založilo nový regulační úřad Nuclear Regulation Authority.
- Jižní korea založila Nuclear Safety and Security Commission jako nový regulační úřad.
- Francie zřídila jadernou zásahovou jednotku (FARN), která uchovává mobilní nouzové zařízení ve skladech mimo areál elektrárny. V případě havárie je toto zařízení rychle dopraveno na místo a do 12 hodin dokáže obnovit chlazení reaktoru.
- Německo 15. dubna 2023 uzavřelo všechny jaderné elektrárny v zemi.
- Spojené státy americké zavedly Diverzifikační a flexibilní strategii zvládnutí, která je obdobná FARN ve Francii.
- Kanada usilovala o zvýšení bezpečnosti těžkovodních reaktorů CANDU.

V práci jsou jednotlivé země porovnány podle oblastí, jako je založení a posílení regulačních orgánů, provedení zátěžových testů jaderných elektráren, pořízení záložních systémů napájení a chlazení. Tyto oblasti umožňují zhodnotit, jak jednotlivé státy reagovaly na fukušimskou havárii a jaká opatření přijaly pro zvýšení bezpečnosti a odolnosti svých jaderných zařízení proti vnějším situacím.

Seznam použitých zdrojů

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *FUKUSHIMA-DAIICHI*. 2025. Dostupné také z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=377>. [cit. 2025-03-16].
- [2] FUKADA, Takahiro; YOSHIDA, Reiji. Fukushima plant site originally was a hill safe from tsunami. *The Japan Times*. 2011. Dostupné také z: <https://www.japantimes.co.jp/news/2011/07/13/national/fukushima-plant-site-originally-was-a-hill-safe-from-tsunami/>. [cit. 2025-03-16].
- [3] AMERICAN NUCLEAR SOCIETY. *Fukushima Daiichi: ANS Committee Report*. 2012. Dostupné také z: <https://www.ans.org/pubs/reports/fukushima/report/>. [cit. 2025-03-16].
- [4] ELLINGWOOD, B.R.; BRADY, A.G. *An Investigation of the Miyagi-ken-oki, Japan, Earthquake of June 12, 1978*. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1980. Č. sv. 13. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=qEuWntnoZzYC>.
- [5] ISTERRE. *The detected acceleration at Fukushima Daiichi*. 2018. Dostupné také z: https://web.archive.org/web/20180725111529/https://isterre.fr/IMG/pdf/acceleration_data_tentative_estimate_.pdf [cit. 2025-03-16].
- [6] HIROSHI ONO AND HIDEO KONISHI. *Analysis of Early Stage Accident at TEPCO's Fukushima Daiichi NPS*. 2013. Dostupné také z: <https://asmedigitalcollection.asme.org/ICONE/proceedings-pdf/ICONE21/55836/V006T15A027/4248120/v006t15a027-icone21-16897.pdf>.
- [7] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY. *Analysis of TEPCO Fukushima Daiichi NPS Accident*. 2014. Dostupné také z: https://www.iaea.org/sites/default/files/anaylysis_nra1014.pdf. [cit. 2025-03-16].
- [8] ATOMIC ARCHIVE. *Fukushima Daiichi: Timeline of Events*. 2019. Dostupné také z: <https://atomicarchive.com/science/power/fukushima-timeline.html>. [cit. 2025-03-16].
- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *The Fukushima Daiichi Accident: Report by the Director General*. 2015.
- [10] ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. *Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, Ten Years On*. 2021. Dostupné také z: https://www.oecd.org/en/publications/2021/03/fukushima-daiichi-nuclear-power-plant-accident-ten-years-on_3cad6e48.html. [cit. 2025-05-18].
- [11] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Fukushima Daiichi Accident*. 2024. Dostupné také z: <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-daiichi-accident>. [cit. 2025-03-18].
- [12] NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving Safety of U.S. Nuclear Plants*. *National Academies Press*. 2014. Dostupné také z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK253930/>.

- [13] LOCHBAUM, Dave. Containment at Fukushima. *The Equation*. 2011. Dostupné také z: <https://blog.ucsus.org/dlochbaum/containment-at-fukushima/>. [cit. 2025-03-18].
- [14] INSTITUTE OF NUCLEAR POWER OPERATIONS. *Special Report on the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station*. 2011. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ml1134/ml11347a454.pdf>. [cit. 2025-03-18].
- [15] GUO-HAN, Chai. Severe Accident Simulation and Analysis for Fukushima NPS Unit 3. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-beam Interactions With Materials and Atoms*. 2012. Dostupné také z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:101961044>. [cit. 2025-03-18].
- [16] PSHENICHNIKOV, Anton; YAMAZAKI, Saishun; BOTTOMLEY, D.; NAGAE, Yuji; KURATA, Masaki. Features of a control blade degradation observed in situ during severe accidents in boiling water reactors. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2019, roč. 56. Dostupné také z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00223131.2019.1592724?scroll=top&needAccess=true#abstract>. [cit. 2025-03-18].
- [17] PSHENICHNIKOV, Anton; NAGAE, Yuji; KURATA, Masaki. On the degradation progression of a BWR control blade under high-temperature steam-starved conditions. *Mechanical Engineering Journal*. 2020. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/340450699_On_the_degradation_progression_of_a_BWR_control_blade_under_high-temperature_steam-starved_conditions. [cit. 2025-03-18].
- [18] OSEL.CZ. *Japonsko: Přírodní katastrofa zasáhla čtyři jaderné elektrárny*. 2011. Dostupné také z: <https://www.osel.cz/5627-japonsko-prirodni-katastrofa-zasahla-ctyri-jaderne-elektrarny.html>. [cit. 2025-03-18].
- [19] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Action Plan on Nuclear Safety*. 2011. Dostupné z: <https://www.iaea.org/sites/default/files/actionplans.pdf> [cit. 2025-05-05].
- [20] MINING TECHNOLOGY. *Concrete Pumps Used for Fukushima Reactor Cooling*. 2011. Dostupné také z: <https://www.mining-technology.com/contractors/data/pressreleases/press2-89/>. [cit. 2025-03-18].
- [21] INFRASTRUCTURES. *Putzmeister Concrete Pump Used to Cool Fukushima*. 2011. Dostupné také z: <https://www.infrastructures.com/0411/putz.htm>. [cit. 2025-03-20].
- [22] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY. *Fuel Removal from Unit 4 Spent Fuel Pool*. 2024. Dostupné také z: <https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/progress/removal/unit4/index-e.html>. [cit. 2025-03-20].
- [23] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY. *Fuel Removal from Unit 3 Spent Fuel Pool*. 2024. Dostupné také z: <https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/progress/removal/unit3/index-e.html>. [cit. 2025-03-20].
- [24] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY. *Fuel Removal from Unit 1 Spent Fuel Pool*. 2024. Dostupné také z: <https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/progress/removal/unit1/index-e.html>. [cit. 2025-03-20].

- [25] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY. *Fuel Removal from Unit 2 Spent Fuel Pool*. 2024. Dostupné také z: <https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/progress/removal/unit2/index-e.html>. [cit. 2025-03-20].
- [26] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY. *Status of Fuel Removal from Spent Fuel Pools*. 2024. Dostupné také z: <https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/progress/removal/index-e.html>. [cit. 2025-03-20].
- [27] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Fukushima Nuclear Accident Update Log*. 2011. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/newscenter/news/fukushima-nuclear-accident-update-log-34>. [cit. 2025-03-20].
- [28] NUCLEAR ENERGY AGENCY. *Timeline for the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident*. 2011. Dostupné také z: <https://www.oecd-nea.org/news/2011/NEWS-04.html>. [cit. 2025-03-20].
- [29] KANEKO, Hiroyuki; NAKAGAWA, Tokiko; HIRAIZUMI, Kousei; SAKAI, Ryo. Accelerated Corrosion Tests of Nuclear Reactor Pressure Vessel Materials in NaCl–H₃BO₃ Solutions. *MATERIALS TRANSACTIONS*. 2013, roč. 54. Dostupné také z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/54/5/54_M2012405/_article. [cit. 2025-03-20].
- [30] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY. *Outflow of Radioactive Water from the Concrete Crack Near Intake Canal for Unit 2 of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station*. 2011. Dostupné také z: https://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/110421e2.pdf. [cit. 2025-03-20].
- [31] ANZAI, K.; BAN, N.; OZAWA, T.; TOKONAMI, S. Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident: facts, environmental contamination, possible biological effects, and countermeasures. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*. 2012. Dostupné také z: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3246178/>. [cit. 2025-03-20].
- [32] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY. *Plant Status of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station*. 2011. Dostupné také z: <https://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11053103-e.html>. [cit. 2025-03-20].
- [33] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY HOLDINGS. *Contaminated Water Treatment*. 2015. Dostupné také z: <https://www.tepco.co.jp/en/decommission/planaction/alps/index-e.html>. [cit. 2025-03-20].
- [34] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY. *Plant Status of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station*. 2012. Dostupné také z: <https://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2012/12033103-e.html>. [cit. 2025-03-20].
- [35] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY. *Status of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station*. 2011. Dostupné také z: <https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/6019786/www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11122606-e.html>. [cit. 2025-03-20].
- [36] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY. *Roadmap towards Settlement of the Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station*. 2011. Dostupné také z: https://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/111216e4.pdf. [cit. 2025-03-20].

- [37] NUCLEAR ENERGY AGENCY. *Safety Research Opportunities Post-Fukushima*. 2017. Tech. zpr. Organisation for Economic Co-operation a Development. Dostupné také z: https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2021-02/csni-r2016-19_2021-02-23_23-16-58_644.pdf. [cit. 2025-03-20].
- [38] CASTAÑÓN, Laura. Fukushima and the Ocean: A decade of disaster response. *Woods Hole Oceanographic Institution*. 2021. Dostupné také z: <https://www.whoi.edu/oceanus/feature/fukushima-disaster-response/>. [cit. 2025-03-20].
- [39] HSU, Jeremy. Radioactive Water Leaks from Fukushima: What We Know. *Scientific American*. 2013. Dostupné také z: <https://www.scientificamerican.com/article/radioactive-water-leaks-from-fukushima/>. [cit. 2025-03-20].
- [40] YAMAGUCHI, Mari. Experts: Fukushima must do more to reduce radioactive water. *Phys.org*. 2018. Dostupné také z: <https://phys.org/news/2018-03-fukushima-ice-wall-partly-radioactive.html>. [cit. 2025-03-20].
- [41] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY. *Water management at Fukushima Daiichi*. 2021. Dostupné také z: https://www.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/images/202107_pamphlet-e.pdf. [cit. 2025-03-20].
- [42] WORLD NUCLEAR NEWS. *Survey under way of Fukushima Daiichi 1 vessel*. 2017. Dostupné také z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Survey-under-way-of-Fukushima-Daiichi-1-vessel>. [cit. 2025-03-28].
- [43] HRUSKA, Joel. Fukushima's Reactor 2 is far more radioactive than previously realized. *ExtremeTech*. 2017. Dostupné také z: <https://www.extremetech.com/extreme/243904-fukushimas-reactor-2-far-radioactive-previously-realized-no-sign-containment-breach>. [cit. 2025-03-28].
- [44] KIM, Angela Seme. Fukushima Radioactive Water Release and Its International Legal Implications. *The Korean Journal of International and Comparative Law*. 2024. Dostupné také z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:274651843>. [cit. 2025-03-28].
- [45] SANADA, Yukihiisa; ABE, Tomohisa; SASAKI, Miyuki; KANNO, Marina; YAMADA, Tsutomu; NAKASONE, Takamasa; MIYAZAKI, Nobuyuki; OSHIKIRI, Keisuke; WATABE, Hiroshi. Basic study on tritium monitor using plastic scintillator for treated water discharge at Fukushima Daiichi Nuclear Power plant. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2023. Dostupné také z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:262583129>. [cit. 2025-03-28].
- [46] MABON, Leslie; KAWABE, Midori. Bring voices from the coast into the Fukushima treated water debate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2022. Dostupné také z: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2205431119>. [cit. 2025-03-28].
- [47] MATSUO, Akiko; MIURA, Asako; KITAMURA, Hideya; MURAYAMA, Aya. The Ebb and Flow of Morality: The Role of Purity in the Public Perceptions of Fukushima's Processed Water Release. *Japanese Psychological Research*. 2024. Dostupné také z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:271618928>. [cit. 2025-03-28].

- [48] KYODO NEWS. IAEA says Fukushima soil recycling plan meets safety standards. *Kyodo News*. 2024. Dostupné také z: <https://english.kyodonews.net/news/2024/09/4895fe8d3ef8-japans-plan-to-reuse-decontaminated-soil-in-fukushima-safe-iaea.html>. [cit. 2025-03-28].
- [49] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY. *Technical Strategic Plan 2024 for Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station*. 2024. Dostupné také z: https://dd-ndf.s2.kuroco-edge.jp/files/topics/778_ext_02_1.pdf. [cit. 2025-03-28].
- [50] NAOE, Kaida. The First Small Steps: Debris Removal at Fukushima Daiichi. *Nippon.com*. 2025. Dostupné také z: <https://www.nippon.com/en/japan-topics/g02501/>. [cit. 2025-03-28].
- [51] BURNIE, Shaun. *Fukushima Daiichi Decommissioning Time for a new long term strategic plan*. 2021. Dostupné také z: https://www.greenpeace.org/japan/wp/wp-content/uploads/2021/03/8323f3ca-gpsummary_decommissioning_eng.pdf. [cit. 2025-03-29].
- [52] NUCLEAR DAMAGE COMPENSATION AND DECOMMISSIONING FACILITATION CORPORATION. *Japan - Nuclear Decommissioning and Decontamination*. 2020. Dostupné také z: <https://www.privacyshield.gov/ps/article?id=Japan-Nuclear-Decommissioning>. [cit. 2025-03-29].
- [53] ENSREG. *Peer review country report Stress tests performed on European nuclear power plants*. 2012. Dostupné také z: https://sujb.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/aktualne/Country_Report_CZ_Final.pdf. [cit. 2025-03-29].
- [54] ENSREG. *Peer review report: Stress tests performed on European nuclear power plants*. 2012. Dostupné také z: <https://www.ensreg.eu/document/final-report-peer-review-eu-stress-tests>. [cit. 2025-03-29].
- [55] ČEZ. *Stress tests of nuclear power plants*. 2012. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/pro-media-2012/02-unor/final-report-st-ete.pdf>. [cit. 2025-03-29].
- [56] EUROPEAN NUCLEAR SAFETY REGULATORS GROUP. *National Report on „Stress Tests“ NPP Dukovany and NPP Temelín Czech Republic*. 2011. Dostupné také z: https://www.ensreg.eu/sites/default/files/CZ%20-%20National_Report_CZ.pdf. [cit. 2025-03-29].
- [57] NEWS WIRES. Japan restarts first nuclear reactor after post-Fukushima shutdown. *FRANCE 24*. 2015. Dostupné také z: <https://www.france24.com/en/20150811-japan-restarts-reactor-after-break-due-fukushima>. [cit. 2025-04-18].
- [58] STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Convention on Nuclear Safety: Questions Posted To Czech Republic*. 2014. Dostupné také z: https://sujb.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/narodni_zpravy/ODPOVEDI_CR_na_cizi_dotazy_anonymizace.pdf. [cit. 2025-03-29].
- [59] ČEZ. *ČEZ do modernizace Temelína letos investuje 3,1 miliard korun. Je to součást programu zajištění minimálně šedesátiletého provozu*. 2025. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/cez-do-modernizace-temelina-letos-investuje-31-miliard-korun.-je-to-soucast-programu-zajisteni-minimalne-sedesatileteho-provozu-206949>. [cit. 2025-03-29].

- [60] ČTK. ČEZ investuje do Dukovan skoro dvě miliardy korun. *Investice.cz*. 2022. Dostupné také z: <https://www.investice.cz/clanek/cez-investuje-do-dukovan-skoro-dve-miliardy-korun>. [cit. 2025-03-29].
- [61] ČEZ. *Elektronický zpravodaj Skupiny ČEZ pro region JE Dukovany 01*. 2023. Dostupné také z: https://www.aktivnizona.cz/file/edee/2023/02/zpravodaj-info-je-dukovany-01_2023.pdf. [cit. 2025-03-29].
- [62] ČEZ. *Elektronický zpravodaj Skupiny ČEZ pro region JE Dukovany 01*. 2024. Dostupné také z: https://www.cez.cz/webpublic/file/edee/2024/03/zpravodaj-info-je-dukovany-01_2024.pdf. [cit. 2025-03-29].
- [63] WORLD NUCLEAR NEWS. *Temelín 2 clear for longer operation*. 2022. Dostupné také z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Temelín-2-clear-for-longer-operation>. [cit. 2025-03-29].
- [64] STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Národní akční plán na zvýšení jaderné bezpečnosti – Revize 4*. 2019. Dostupné také z: https://subj.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/jaderna-bezpecnost/Cesky_NAcP_Rev4_final.pdf. [cit. 2025-03-20].
- [65] STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Czech National Action Plan - Revision 5*. 2022. Dostupné také z: https://subj.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/jaderna-bezpecnost/Czech_National_Action_Plan_rev5.pdf. [cit. 2025-03-29].
- [66] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Enclosure 3: Foreign experience*. 2012. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ml1232/ML12325A047.pdf>. [cit. 2025-03-29].
- [67] NUCLEAR ENERGY AGENCY. *Technical Report on Hydrogen Recombiners*. 2021. Dostupné také z: https://www.oecd-nea.org/mdep/documents/TR-VVERWG-05_HydrogenRecombiners_FINAL.pdf. [cit. 2025-03-29].
- [68] BACHELLERIE, E.; ARNOULD, F.; AUGLAIRE, M.; DE BOECK, B.; BRAILLARD, O.; ECKARDT, B.; FERRONI, F.; MOFFETT, R. Generic approach for designing and implementing a passive autocatalytic recombiner PAR-system in nuclear power plant containments. *Nuclear Engineering and Design*. 2003. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549302003308>. [cit. 2025-03-29].
- [69] ČEZ. *Final Report*. 2012. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/pro-media-2012/02-unor/final-report-st-edu.pdf>. [cit. 2025-03-29].
- [70] STATE OFFICE FOR NUCLEAR SAFETY. *National assessment report of the Czech republic*. 2017. Dostupné také z: https://subj.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/eng/reports/NAR_TPR_AM_CR_EN.pdf. [cit. 2025-04-13].
- [71] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Questions Posted to Czech Republic*. 2017. Dostupné také z: https://www.iaea.org/sites/default/files/czech-republic-cns-7th-rm_naseodpovedi_final_anonym.pdf. [cit. 2025-04-13].
- [72] ČTK. V Temelíně zprovoznili další variantu chlazení reaktoru. *Deník.cz*. 2013. Dostupné také z: <https://www.denik.cz/ekonomika/v-temeline-zprovoznili-dalsi-variantu-chlazení-reaktoru-20130828.html>. [cit. 2025-04-11].

- [73] ČEZ. *Odolnost a bezpečnost Dukovan posílilo 12 nových obřích ventilátorů*. 2016. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/odolno-st-a-bezpecnost-dukovan-posililo-12-novych-obrich-ventilatoru-44676>. [cit. 2025-03-29].
- [74] KOLEKTIV AUTORŮ, ČEZ. *Sekundární část JE VVER 440 M1 II. část*. 2024. Učební texty pro přípravu personálu JE.
- [75] STÁTNI ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Národní akční plán – Revize 2*. 2015. Dostupné také z: https://sujb.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/jaderna-bezpecnost/Cesky_NaCP_Rev2_final.pdf. [cit. 2025-03-29].
- [76] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations*. 2022. Dostupné také z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1950_web.pdf. [cit. 2025-03-29].
- [77] ČEZ. *Temelínští hasiči si vyzkoušeli novou techniku*. 2014. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/aktuality-z-jadernych-elektren/temelinsti-hasici-si-vyzkouseli-novou-techniku-51710>. [cit. 2025-04-11].
- [78] ČEZ. *V Dukovanech energetici mění generátor u jednoho ze záložních dieselgenerátorů*. 2023. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/v-dukovanech-energetici-meni-generator-u-jednoho-ze-zaloznich-dieselgeneratoru-185149>. [cit. 2025-04-13].
- [79] ČEZ. *Na Temelín dorazil americký motor v českém kabátě*. 2014. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/aktuality-z-jadernych-elektren/na-temelin-dorazil-americky-motor-v-ceskem-kabate-51629>. [cit. 2025-04-13].
- [80] ČTK. *V Temelíně cvičili na blackout. Z Orliku by elektrárna dostala elektřinu do hodiny. O Energetice*. 2017. Dostupné také z: <https://oenergetice.cz/elektrina/v-temeline-cvicili-na-blackout-z-orliku-by-elektarna-dostala-elektrinu-do-hodiny>. [cit. 2025-04-11].
- [81] ČEZ. *Rotor v Dalešicích je na svém místě*. 2015. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/multimedia/rotor-v-dalesicich-je-na-svem-miste-44782>. [cit. 2025-04-11].
- [82] STATE OFFICE FOR NUCLEAR SAFETY. *National Action Plan of the Czech republic On Ageing Management*. 2019. Dostupné také z: https://sujb.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/eng/reports/TPR_NaCP_CR_AJ_F.pdf. [cit. 2025-04-13].
- [83] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Guidelines for Application of the Master Curve Approach to Reactor Pressure Vessel Integrity in Nuclear Power Plants*. 2004. Dostupné také z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS429_web.pdf. [cit. 2025-04-13].
- [84] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Strategy for Assessment of WWER: Steam Generator Tube Integrity*. 2007. Dostupné také z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1577_web.pdf. [cit. 2025-04-13].
- [85] EUROPEAN COMMISSION. *Annealing and re-embrittlement of reactor pressure vessel materials*. 2008. Dostupné také z: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC46534/eur23449%20-%20ames%2019%20-%20anneal-2008.pdf>. [cit. 2025-04-13].

- [86] WHEELER, Brian. Evaluating an Unexpected Crack in Containment. *Power Engineering*. 2011. Dostupné také z: <https://www.power-eng.com/nuclear/evaluating-an-unexpected-crack-in-containment/>. [cit. 2025-04-13].
- [87] ČEZ. *V Dukovanech skončila odstávka, čtvrtý blok nabíhá na historicky nejvyšší výkon*. 2025. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/v-dukovanech-skoncila-odstavka-ctvrty-blok-nabiha-na-historicky-nejvyssi-vykon-209409>. [cit. 2025-03-29].
- [88] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Second Phase of Uprates at Dukovany*. 2024. Dostupné také z: <https://world-nuclear.org/our-association/publications/world-nuclear-performance-report/second-phase-of-uprates-at-dukovany>. [cit. 2025-03-29].
- [89] ČTK. *Dukovany díky lepšímu chlazení vody vyrobí elektřinu pro dalších 5000 domácností*. 2022. Dostupné také z: https://www.tyden.cz/rubriky/domaci/dukovany-diky-lepsimu-chlazení-vody-vyrobi-elektrinu-pro-dalsich-5000-domacnosti_557824.html. [cit. 2025-04-13].
- [90] STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Statement of the CZECH REPUBLIC*. 2012. Dostupné také z: https://www.pub.iaea.org/iaemeetings/Fukushima/CzechRepublic_Statement.pdf. [cit. 2025-04-13].
- [91] STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Nový atomový zákon vyšel ve Sbírce zákonů*. 2016. Dostupné také z: <https://sujb.gov.cz/aktualne/detail/novy-atomovy-zakon-vysel-ve-sbirce>. [cit. 2025-04-13].
- [92] KOREA HYDRO & NUCLEAR POWER. *Nuclear New-build Project in the Czech Republic*. 2024. Dostupné také z: <https://www.khnp.co.kr/eng/contents.do?key=560>. [cit. 2025-04-13].
- [93] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Integrated regulatory review service mission to the Czech republic*. 2023. Dostupné také z: https://www.iaea.org/sites/default/files/documents/review-missions/irrs_czech_republic_final_report.pdf. [cit. 2025-04-13].
- [94] WORLD NUCLEAR NEWS. *IAEA team completes Czech regulatory review*. 2023. Dostupné také z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/IAEA-team-completes-Czech-regulatory-review>. [cit. 2025-04-13].
- [95] STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Národní radiační havarijní plán*. 2016. Dostupné také z: <https://sujb.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/NRHP/NRHP.pdf>. [cit. 2025-04-13].
- [96] LIPTÁK, Ludovít; FOJČÍKOVÁ, Eva; KRPELANOVÁ, Monika; FABOVÁ, Viera; VARNÝ, Peter. Decision Support System Este for Nuclear and Radiological Emergencies: Atmospheric Dispersion Models. *Atmosphere*. 2020. Dostupné také z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:235078567>. [cit. 2025-04-13].
- [97] LIPTÁK, Ludovít; FOJČÍKOVÁ, Eva; KRPELANOVÁ, Monika; FABOVÁ, Viera; VARNÝ, Peter. The ESTE Decision Support System for Nuclear and Radiological Emergencies: Atmospheric Dispersion Models. *Atmosphere*. 2021. Dostupné také z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:234071452>. [cit. 2025-04-13].

- [98] STÁTNI ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Národní akční plán na zvýšení jaderné bezpečnosti – Revize 5*. 2022. Dostupné také z: https://sujb.gov.cz/filadmin/sujb/docs/jaderna-bezpecnost/Cesky_NAcP_Rev5_final__002_.pdf. [cit. 2025-04-13].
- [99] SLATER-THOMPSON, Nancy. Japan restarts first nuclear reactor under new safety rules. *U.S. Energy Information Administration*. 2015. Dostupné také z: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=22472>. [cit. 2025-04-13].
- [100] SYNDIGATE.INFO. Japan Faces Nuclear Shutdown for Second Time Since Fukushima. *ProQuest*. 2013. Dostupné také z: <https://www.proquest.com/docview/1272374300?pq-origsite=primo&sourcetype=Wire%20Feeds>. [cit. 2025-04-18].
- [101] STEJSKAL, Jan. Fukušima: Za jadernou havárii mohou lidé, rozhodla vyšetřovací komise. *Ekolist.cz*. 2012. Dostupné také z: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/fukusima-za-jadernou-havarii-mohou-lide-rozhodla-vysetrovaci-komise>. [cit. 2025-04-18].
- [102] ANDREWS-SPEED, Philip. Governing nuclear safety in Japan after the Fukushima nuclear accident: incremental or radical change? *Journal of Energy & Natural Resources Law*. 2020. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1080/02646811.2020.1741990>. [cit. 2025-04-18].
- [103] NUCLEAR ENERGY AGENCY. *The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: OECD/NEA Nuclear Safety Response and Lessons Learnt*. 2013. Dostupné také z: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14866/the-fukushima-daiichi-nuclear-power-plant-accident-oecd/nea-nuclear-safety-response-and-lessons-learnt. [cit. 2025-04-18].
- [104] OTSUKA, Shigeki. *Enhancement of Safety Measures Based on the Lessons Learned from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station Accident*. 2013. Dostupné také z: https://www-pub.iaea.org/iaeameetings/IEM5/IEM5_Shigeki%200tsuka_Japan.pdf. [cit. 2025-04-18].
- [105] WORLD NUCLEAR NEWS. *Eighth Japanese reactor resumes power generation*. 2018. Dostupné také z: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/eighth-japanese-reactor-resumes-power-generation>. [cit. 2025-04-18].
- [106] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Nuclear Power in Japan*. 2025. Dostupné také z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power>. [cit. 2025-04-18].
- [107] ČTK. Japonsko spustilo jaderný reaktor u Fukušimy. *iUHLLI.cz*. 2024. Dostupné také z: <https://iuhli.cz/japonsko-spustilo-jaderny-reaktor-u-fukusimy/>. [cit. 2025-04-18].
- [108] SHIMBUN, Yomiuri. Onagawa N-Plant's Safety Measures Show Lessons Learned From 2011 Meltdown. *The Japan news*. 2024. Dostupné také z: <https://japannews.yomiuri.co.jp/attachment/219621/>. [cit. 2025-04-18].
- [109] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY. *Convention on Nuclear Safety: National Report of Japan*. 2022. Dostupné také z: <https://www.nra.go.jp/data/000402611.pdf>. [cit. 2025-04-18].

- [110] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Radiation Protection after the Fukushima Daiichi Accident: Promoting Confidence and Understanding*. 2014. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/sites/default/files/radprotection0914.pdf>. [cit. 2025-04-26].
- [111] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Integrated Regulatory Review Service Mission to the Republic of Korea*. 2011. Dostupné také z: https://www.iaea.org/sites/default/files/documents/review-missions/irrs_mission_to_korea_jul_2011_1.pdf. [cit. 2025-04-26].
- [112] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Sixth National Report For The Convention On Nuclear*. 2013. Dostupné také z: https://www.iaea.org/sites/default/files/korea-republic-of-national_report_for_the_6th_cns_0.pdf. [cit. 2025-04-26].
- [113] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Nuclear Power in South Korea*. 2024. Dostupné také z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/south-korea>. [cit. 2025-04-26].
- [114] NGUYEN, Viet Phuong. *Lights Out for South Korea's Nuclear Export Ambitions*. The Diplomat, 2017. Dostupné také z: <https://thediplomat.com/2017/08/lights-out-for-south-koreas-nuclear-export-ambitions/>. [cit. 2025-04-26].
- [115] KIM, Soo Jin. *South Korea's 'unstable' nuclear energy policy: From Lee through Moon to Yoon Governments*. 2023. Dostupné také z: <https://kr.boell.org/en/2023/04/14/south-koreas-unstable-nuclear-energy-policy-lee-through-moon-yoon-governments>. [cit. 2025-04-26].
- [116] MCCURRY, Justin. *New South Korean president vows to end use of nuclear power*. The Guardian, 2017. Dostupné také z: <https://www.theguardian.com/world/2017/jun/19/new-south-korean-president-vows-to-end-use-of-nuclear-power>. [cit. 2025-04-26].
- [117] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *World Nuclear Performance Report*. 2024. Dostupné také z: <https://world-nuclear.org/images/articles/World-Nuclear-Performance-Report-2024.pdf>. [cit. 2025-04-26].
- [118] DYER, John. *South Korea to Extend Lifespan of Wolsong Nuclear Power Plant Units 2, 3, and 4*. 2024. Dostupné také z: <https://sightlineu3o8.com/2024/04/south-korea-to-extend-lifespan-of-wolsong-nuclear-power-plant-units-2-3-and-4/>. [cit. 2025-04-26].
- [119] AGENCE FRANCE-PRESSE. *South Korea Approves Building Two Nuclear Reactors*. 2024. Dostupné také z: <https://www.voanews.com/a/south-korea-approves-building-two-nuclear-reactors/7781297.html>. [cit. 2025-04-26].
- [120] WORLD NUCLEAR NEWS. *South Korea confirms need for new reactors*. 2025. Dostupné také z: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/south-korea-confirms-need-for-new-reactors>. [cit. 2025-04-26].
- [121] GALANG, Vincent Mariel. *Eyes on Nuclear Hybrid Power in 2025*. Asian Power. 2025. Dostupné také z: <https://asian-power.com/power-utility/exclusive/eyes-nuclear-hybrid-power-in-2025>. [cit. 2025-04-26].

- [122] JOHNSON, Slade. South Korea is one of the world's largest nuclear power producers. *Energy information Administration*. 2020. Dostupné také z: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=44916>. [cit. 2025-04-26].
- [123] KOREA HYDRO & NUCLEAR POWER. *Design Control Document Tier 1*. 2018. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1822/ML18228A647.pdf>. [cit. 2025-05-10].
- [124] AUTORITE DE SURETE NUCLEAIRE. *Its roles key figures its organisation*. 2011. Dostupné také z: https://www.asn.fr/annual_report/2011gb/files/RA2011%20UK%20Commission.pdf. [cit. 2025-04-26].
- [125] EUROPEAN NUCLEAR SAFETY REGULATORS GROUP. *Peer review country report: Stress tests performed on European nuclear power plants*. 2012. Dostupné také z: <https://www.ensreg.eu/sites/default/files/Country%20Report%20FR%20Final.pdf>. [cit. 2025-04-26].
- [126] EUROPEAN NUCLEAR SAFETY REGULATORS GROUP. *Peer review country report: Stress tests performed on European nuclear power plants*. 2020. Dostupné také z: <https://www.french-nuclear-safety.fr/information/news-archive/s/european-stress-tests-asn-publishes-the-closing-report-for-the-action-plan>. [cit. 2025-04-26].
- [127] AOKI, Masahiko; ROTHWELL, Geoffrey. *A comparative institutional analysis of the Fukushima nuclear disaster: Lessons and policy implications*. 2013. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/322921503_A_comparative_institutional_analysis_of_the_Fukushima_nuclear_disaster_Lessons_and_policy_implications. [cit. 2025-04-26].
- [128] LE GUEN, Bernard. *EDF FARN - Focus on radiation protection of workers*. 2014. Dostupné také z: <https://inis.iaea.org/records/qq55e-e6s43>. [cit. 2025-04-26].
- [129] ELECTRICITE DE FRANCE. *Watt Info*. 2024. Dostupné také z: <https://www.edf.fr/sites/groupe/files/2024-06/Watt%20Info%20Juin%202024.pdf>. [cit. 2025-04-28].
- [130] COURTIADÉ, Jean-Michel. *Force d'Action Rapide Nucléaire*. 2017. Dostupné také z: https://sfenral.fr/images/Reunions_Debats/2017-11-21_farn_courtia de.pdf. [cit. 2025-04-26].
- [131] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Nuclear Power in France*. 2025. Dostupné také z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france>. [cit. 2025-04-28].
- [132] LEVERENZ, R.; GERHARD, L.; GOEBEL, A. *The European Pressurized Water Reactor. A safe and competitive solution for future energy needs*. 2004. Dostupné také z: <https://inis.iaea.org/records/xh6p6-kjk02>. [cit. 2025-04-28].
- [133] ČTK. Ministryně: Německo po odpojení jaderných elektráren vstoupí do nové éry. *ČeskéNoviny.cz*. 2023. Dostupné také z: <https://www.ceskenoviny.cz/zpravy/ministryne-nemecko-po-odpojzeni-jadernych-elektraren-vstoupi-do-nove-ery/2345895>. [cit. 2025-04-28].

- [134] ČT24. *Německo uzavře osm jaderných reaktorů*. 2011. Dostupné také z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/clanek/ekonomika/nemecko-uzavre-osm-jadernych-reaktoru-228296>. [cit. 2025-04-28].
- [135] ČT24. *Německo prodlouží chod všech svých jaderných elektráren, oznámil Scholz*. 2022. Dostupné také z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/clanek/svet/nemecko-prodlouzi-chod-vsech-svych-jadernych-elektraren-oznamil-scholz-15614>. [cit. 2025-04-28].
- [136] ČTK. *Německo odpojilo poslední jadernou elektrárnu, Bavorsko chce pokračovat samo*. *iDNES.cz*. 2023. Dostupné také z: https://www.idnes.cz/zpravy/zahranicni/nemecko-jaderne-elektrarny-odpojeni-obnovitelne-zdroje-bavorsko.A230416_072625_zahranicni_idvs. [cit. 2025-04-28].
- [137] REUTERS. *German emissions fell 3.4% in 2024, on track for 2030 climate goals*. *Reuters*. 2025. Dostupné také z: <https://www.reuters.com/world/europe/german-emissions-fell-34-2024-track-2030-climate-goals-2025-03-14/>. [cit. 2025-04-28].
- [138] LUTZ Robert J., Jr.; PRIOR, Robert P. *Comparison of Fukushima Response in the United States and Europe*. 2016. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1115/ICONE24-60101>. [cit. 2025-04-28].
- [139] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Policy Issue Notation Vote*. 2011. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1118/ML11186A959.pdf>. [cit. 2025-04-28].
- [140] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Regulatory Analysis Guidelines of the U.S. Nuclear Regulatory Commission*. 2004. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ml0428/ML042820192.pdf>. [cit. 2025-04-28].
- [141] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Order To Modify Licenses With Regard To Requirements For Mitigation Strategies For Beyond-Design-Basis External Events*. 2012. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1205/ML12056A045.pdf>. [cit. 2025-04-28].
- [142] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Reliable Hardened Vents*. 2012. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1212/ML12124A132.pdf>. [cit. 2025-04-28].
- [143] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Industry Guidance for Compliance with NRC Order EA-12 051, "To Modify Licenses with Regard to Reliable Spent Fuel Pool Instrumentation"*. 2012. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ml1224/ML12240A307.pdf>. [cit. 2025-04-28].
- [144] NUCLEAR ENERGY INSTITUTE. *Diverse and Flexible Coping Strategies (FLEX) Implementation Guide*. 2012. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ml1222/ML12221A205.pdf>. [cit. 2025-04-28].
- [145] NUCLEAR ENERGY INSTITUTE. *B.5.b Phase 2 & 3 Submittal Guideline - Revision 2*. 2006. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ml0700/ml070090060.pdf>. [cit. 2025-04-28].
- [146] GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE. *NRC Should Take Actions to Fully Consider the Potential Effects of Climate Change*. 2024. Dostupné také z: <https://www.gao.gov/assets/gao-24-106326.pdf>. [cit. 2025-05-01].

- [147] NUCLEAR ENERGY INSTITUTE. *Guideline for Assessing Beyond Design Basis Accident Response Staffing and Communications Capabilities*. 2012. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ml0700/ml070090060.pdf>. [cit. 2025-05-01].
- [148] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Proposed Plans For Resolving Open Fukushima Tier 2 And 3 Recommendations*. 2015. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1525/ML15254A008.pdf>. [cit. 2025-05-01].
- [149] CANADIAN NUCLEAR SAFETY COMMISSION. *Canada's Action Plan in Response to the Nuclear Accident in Japan*. 2012. Dostupné také z: https://epe.lac-bac.gc.ca/100/205/301/tbs/reports_plans_priorities/2013-2014e/www.nuclearsafety.gc.ca/eng/mediacentre/updates/2011/japan-earthquake/index.cfm#8. [cit. 2025-05-01].
- [150] CANADIAN NUCLEAR SAFETY COMMISSION. *Fukushima Accident – Canada's Action Plan*. 2021. Dostupné také z: <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/resources/fukushima/fukushima-canada-action-plan/>. [cit. 2025-05-01].
- [151] CANADIAN NUCLEAR SAFETY COMMISSION. *CNSC Integrated Action Plan on the Lessons Learned from the Fukushima Daiichi Nuclear Accident*. 2014. Dostupné také z: <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/resources/publications/reports/action-plan-fukushima/>. [cit. 2025-04-11].
- [152] CANADIAN NUCLEAR SAFETY COMMISSION. *Post-Fukushima Safety Improvements in Canada*. 2021. Dostupné také z: <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/resources/fukushima/canada-improvements-post-fukushima/>. [cit. 2025-05-01].
- [153] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Nuclear Power in Canada*. 2025. Dostupné také z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/canada-nuclear-power>. [cit. 2025-05-01].
- [154] ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED. *Enhanced CANDU 6 Technical Summary*. 2015. Dostupné také z: <https://www.scribd.com/document/369604632/Enhanced-Candu-6-Technical-Summary-En>. [cit. 2025-05-01].
- [155] LULOFF, Mark. *Numerical Modelling of Eddy Current Probes for CANDU® Fuel Channel Inspection*. 2016. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/figure/A-complete-schematic-of-the-CANDU-R-nuclear-reactor-Image-taken-from-4-with-the_fig2_315081975. [cit. 2025-05-01].
- [156] ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED. *CANDU 6 Technical Summary*. 2005. Dostupné také z: https://canteach.candu.org/content%20library/candu6_technicalsummary-s.pdf. [cit. 2025-05-01].
- [157] CANADIAN NUCLEAR SAFETY COMMISSION. *Nuclear Power Plant Safety Systems*. 2018. Dostupné také z: <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/reactors/power-plants/nuclear-power-plant-safety-systems/>. [cit. 2025-05-01].
- [158] WRITER, Staff. *A Canadian Perspective on Passive Autocatalytic Recombiners*. *NS Energy*. 2012. Dostupné také z: <https://www.nsenergybusiness.com/analysis/featurea-canadian-perspective-on-passive-autocatalytic-recombiners/>. [cit. 2025-05-20].

- [159] DOMÍNGUEZ-BUGARÍN, Araceli; JIMÉNEZ, Miguel-Ángel; REINECKE, Ernst-Arndt; JIMÉNEZ, Gonzalo. PARUPM: A simulation code for passive auto-catalytic recombiners. *EPJ Nuclear Sciences & Technologies*. 2022. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/365646648_PARUPM_A_simulation_code_for_passive_auto-catalytic_recombiners. [cit. 2025-05-20].
- [160] CHINA BYSTANDER. *China's Nuclear Energy Program Post-Fukushima*. 2011. Dostupné také z: <https://chinabystander.wordpress.com/2011/03/16/china-s-nuclear-energy-program-post-fukushima/>. [cit. 2025-05-01].
- [161] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Nuclear Power in China*. 2025. Dostupné také z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power>. [cit. 2025-05-01].
- [162] REUTERS. *China approves four Westinghouse reactors for nuclear power plants*. 2024. Dostupné také z: <https://www.reuters.com/world/china/china-approves-four-westinghouse-reactors-nuclear-power-plants-2024-08-29/>. [cit. 2025-05-01].
- [163] ENVIRONMENTAL AND ENERGY STUDY INSTITUTE. *International Reactions to the Fukushima Nuclear Disaster: Summer Update*. 2011. Dostupné také z: <https://www.eesi.org/articles/view/international-reactions-to-the-fukushima-nuclear-disaster-summer-update>. [cit. 2025-05-01].
- [164] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *IAEA Mission Concludes Peer Review of the Russian Federation's Nuclear Regulatory Framework*. 2013. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-mission-concludes-peer-review-russian-federations-nuclear-regulatory-framework>. [cit. 2025-05-01].
- [165] ENERGY CENTRAL. *Rosatom, Global Leader in Nuclear Tech, Eyes Coveted KSA Nuclear Contract*. 2024. Dostupné také z: <https://energycentral.com/news/rosatom-global-leader-nuclear-tech-eyes-coveted-ksa-nuclear-contract>. [cit. 2025-05-01].
- [166] FINANCIAL TIMES. *Russia Aims to Be Global Leader in Nuclear Power Plant Construction*. 2024. Dostupné také z: <https://www.ft.com/content/4e78c20a-dad8-4ce5-b2c9-90106c5bea31>. [cit. 2025-05-01].
- [167] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT. *Bericht der Bundesregierung für die Achte Überprüfungstagung zum Übereinkommen über nukleare Sicherheit*. 2020. Dostupné také z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=US>. [cit. 2025-05-10].
- [168] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Nuclear Power in Czech Republic*. 2025. Dostupné také z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/czech-republic>. [cit. 2025-04-26].
- [169] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Power Reactor Information System - United States of America*. 2025. Dostupné také z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=US>. [cit. 2025-04-26].

- [170] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Power Reactor Information System – France*. 2025. Dostupné také z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=FR>. [cit. 2025-04-26].
- [171] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Nuclear Power in Germany*. 2024. Dostupné také z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany>. [cit. 2025-04-26].
- [172] ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *Nuclear explained*. 2023. Dostupné také z: <https://www.eia.gov/energyexplained/nuclear/us-nuclear-industry.php>. [cit. 2025-04-26].

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka	Význam
ASN	Francouzský úřad pro jadernou bezpečnost (Nuclear Safety Authority)
BMS	Systémy řízení baterií (Battery Management Systems)
BWR	Varný reaktor (Boiling Water Reactor)
CNSC	Kanadská komise pro jadernou bezpečnost (Canadian Nuclear Safety Commission)
ECCS	Havarijní systém chlazení aktivní zóny (Emergency Core Cooling System)
EDG	Nouzové dieselgenerátory (Emergency Diesel Generator)
ENSREG	Evropská skupina regulačních orgánů pro jadernou bezpečnost (European Nuclear Safety Regulators Group)
EPR	Evropský tlakovodní reaktor (European Pressurized Water Reactor)
ESTE	Systém na měření radioaktivity (Emergency Source Term Evaluation)
FARN	Jaderná zásahová jednotka (Force d'Action Rapide du Nucléaire)
FLEX	Diverzitní a flexibilní strategie zvládnání (Diverse and flexible coping strategies)
IC	Isolation Condenser
IRRS	Integrated Regulatory Review Service (Integrated regulatory review service)
IRS	Incident Reporting System
IRSN	Francouzský institut pro jadernou bezpečnost a radiologickou ochranu (Institute for Radiation Protection and Nuclear Safety)
JE	Jaderná elektrárna
KHNP	Korea Hydro & Nuclear Power
KINS	Korea Institute of Nuclear Safety
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
MEST	Ministerstvo školství, vědy a technologie (Ministry of Education, Science and Technology)
NEA	Nuclear Energy Agency
NISA	Úřad pro bezpečnost jaderného průmyslu (Nuclear and Industrial Safety Agency)
NRA	Úřad pro jadernou bezpečnost (Nuclear Regulation Authority)
NRC	Americká Komise pro jadernou regulaci (Nuclear Regulatory Commission)
NSC	Japonská komise pro jadernou bezpečnost (National Security Council)

Zkratka	Význam
NSSC	Nuclear Safety and Security Commission
OSART	Operational Safety Review Team
PSR	Periodické hodnocení bezpečnosti (Periodic Safety Review)
RANET	Response and Assistance Network
SFOK	Systém filtrovaného odvodušnění kontejnmentu
SFP	Bazén s vyhořelým palivem (Spent Fuel Pool)
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
TEPCO	Tokyo Electric Power Company
TNR	Tlaková nádoba reaktoru
USA	Spojené státy americké (United States of America)
VVER	Tlakovodní reaktor