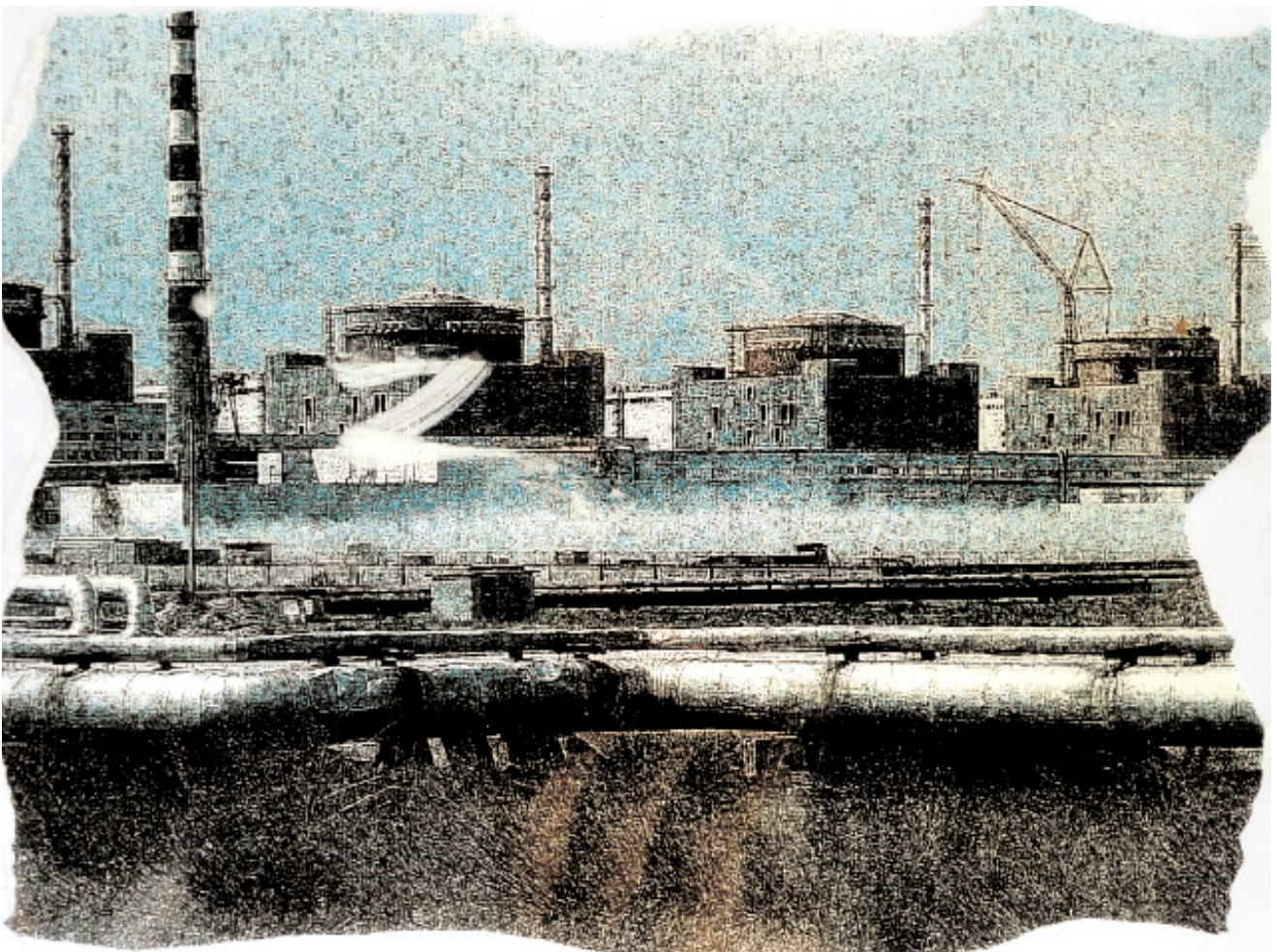


Zpráva o stavu jaderného průmyslu ve světě 2022

Stručné shrnutí



OBSAH

ÚVODNÍ PŘEHLED	4
FRANCIE.....	6
JIŽNÍ KOREA	9
SPOJENÉ STÁTY	10
NASAZENÍ JADERNÝCH A OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ ENERGIE	12
JADERNÁ ENERGETIKA A VÁLKA	16

Editační poznámky:

Zpráva o stavu světového jaderného průmyslu v roce 2022 (WNISR2022) na 385 stranách hodnotí stav a trendy mezinárodního jaderného průmyslu. Poskytuje komplexní přehled údajů o jaderných elektrárnách, včetně informací o provozu, výrobě, výstavbě a vyřazování z provozu. Pro účely českého Stručného shrnutí jsme vybrali jen některé kapitoly a v nich provedli tyto změny:

- Z rozsáhlé kapitoly *FRANCE FOCUS* (ve zkrácené české verzi označené *FRANCIE*) čtenáři v následujícím textu nenajdou části *Nuclear Unavailability Review 2021*, *Lifetime Extensions – Fact Before License*, *Embattled Clientele*, *Financial Trouble*, *Volatile Market* a *The Flamanville-3 EPR Saga Continued*. Kapitoly jsme vzhledem k přímé souvislosti doplnili částí *Elektrárna Hinkley Point C* původně zařazené do kapitoly *UNITED KINGDOM FOCUS*.
- Z kapitoly *SOUTH KOREA FOCUS* (ve zkrácené české verzi označené *JIŽNÍ KOREA*) jsme do shrnutí nezařadili části *South Korea Abandons Nuclear Phaseout Policy* a *Radiation Leakage at Wolsong NPP*.
- Jen v originále kapitoly *UNITED STATES FOCUS* (ve zkrácené české verzi nazvané *SPOJENÉ STÁTY*) pak čtenáři naleznou části *Large New Subsidies for Nuclear Power*, *Securing Subsidies to Prevent Closures*, *Criminal Investigations of Nuclear Power Corporations* a *Conclusion*. Přeložené části *Prodloužené licence reaktorů* a *Fiasko v elektrárně Vogtle* pak byly pro účely shrnutí kráceny.
- Oproti kompletnímu znění kapitoly *JADERNÁ ENERGETIKA A VÁLKA* jsme se rozhodli vynechat část *TIMELINE: WAR IN UKRAINE*.
- A konečně v kapitole *NASAZENÍ JADERNÝCH A OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ* chybí části *ENERGY INVESTMENT*, dále *STATUS AND TRENDS IN CHINA*, *THE EUROPEAN UNION*, *INDIA*, *AND THE UNITED STATES* a *CONCLUSION ON NUCLEAR POWER VS. RENEWABLE ENERGY*.

Abychom čtenářům přinesli úplné údaje za celý rok 2022 (WNISR2022 byla zveřejněna 5. října 2022), je *ÚVODNÍ PŘEHLED* převzat z článku [Did We Pass „Peak Nuclear“ Years Ago?](#), který byl rovněž zkrácen. Aktualizovány oproti originálu WNISR2022 byly i obrázky č. 2 a 4.

Kompletní verzi zprávy v anglickém a francouzském jazyce si můžete stáhnout zde:
www.worldnuclearreport.org.

PŘEDMLUVA

Vážené čtenářky, vážení čtenáři,

shrnutí *Zprávy o stavu jaderného průmyslu ve světě* za rok 2022 (WNISR), které jsme pro Vás připravili ve spolupráci s organizacemi Calla a Hnutí DUHA, přináší stejně jako v předešlých letech aktuální a komplexní přehled údajů o jaderných elektrárnách – jejich provozu, stáří, výstavbě nových bloků a podílu na celosvětové výrobě elektřiny. Tento zdroj expertních informací o jaderném průmyslu z ekonomické, technické i ekologické perspektivy již od roku 2007 připravuje kolektiv autorů a autorek, jimž se za tu dobu podařilo dát dohromady unikátní soubor dat a analýz. Tím nejen umožňují komplexní dlouhodobý pohled na toto odvětví a jeho vývoj v jednotlivých zemích, ale také přispívají k zvěcnění často emocionálně vedené debaty o budoucnosti energetiky – za to jim patří velký dík a respekt.

Nová zjištění autorského týmu WNISR potvrzují mnohé trendy předchozích let, avšak ve světle nové geopolitické situace. Invaze Ruska na Ukrajinu katapultovala téma energetické bezpečnosti mezi nejpálčivější otázky, které dnes musí vlády nejen evropských zemí řešit, a přidala k argumentu, že konec fosilních paliv je podmínkou pro záchranu před klimatickým kolapsem, ještě výraznou geopolitickou dimenzi – konec fosilních paliv povede k ukončení naší závislosti na Rusku a dalších zemích s autokratickým režimem, odkud se dováží. Tyto okolnosti rozproudily debatu o energetických alternativách – kromě obnovitelných zdrojů také právě o jádru. Jsou nové jaderné bloky cestou, jak se odstránit od Putina Ruska, nebo jen slepou uličkou, která nás zdržuje od rychlejší výstavby obnovitelných zdrojů? Válka na Ukrajině také znovu obrátila naši pozornost na debatu o bezpečnostních rizicích jaderných elektráren, která v západní Evropě nikdy zcela nezmizela, v Česku však téměř neexistuje. Válečný konflikt zuřící v blízkosti těchto zařízení patří k těm nejméně vypočitatelným. Zařadili jsme proto do shrnutí i kapitoly o jaderných elektrárnách ve válce, která vysvětluje, za jakých okolností a podmínek by konflikt mohl vést k obávanému úniku radioaktivity do okolního prostředí.

V soutěži o energii budoucnosti obnovitelné zdroje stále zvyšují náskok – v roce 2022 svým růstem překonaly jádro i fosilní paliva, a jsou již ekonomicky nejvýhodnějším zdrojem pro novou výrobu elektřiny. Také z geopolitického pohledu může být riskantní spoléhat se nejen na fosilní, ale také na jaderný průmysl, jehož výstavba je dnes výrazně spojená s dvěma zeměmi – Ruskem a Čínou. I tomu letošní zpráva věnuje pozornost. Také samotná klimatická krize, v jejímž jménu argumenty pro jádro někdy zaznívají, vznáší nad budoucností jaderného průmyslu nové otázky – příkladem toho je Francie, kde v současné době způsobuje extrémní sucho problémy nejen zemědělcům a obyvatelstvu především na jihu země, ale také při chlazení jaderných bloků. Sucho je však jen jedním z problémů, se kterými se tamní jaderný průmysl v roce 2021 potýkal. O tom a dále také o situaci jaderného průmyslu v Jižní Koreji a v USA se podrobněji dočtete níže. Kapitoly věnující se právě těmto třem zemím jsme do českého zkráceného překladu WNISR nevybrali náhodou – reaktory firem z těchto států jsou v tendru na nový reaktor v Dukovanech, a proto se vyplatí tamní situaci sledovat obzvlášť pozorně.

Děkuji Edvardu Sequensovi z organizace Calla a Karlu Polaneckému z Hnutí DUHA za odbornou spolupráci na přípravě této publikace a jejich dlouholetou, neúnavnou účast na veřejné i odborné debatě o jaderné energetice a jejích alternativách. Společně doufáme, že tato zpráva obohatí českou debatu o budoucnosti energetiky o nové podněty a přispěje k tomu, aby byla vedena co nejvíce realisticky a v zájmu co největší energetické nezávislosti, efektivnosti a dostupnosti pro všechny.

Přeji Vám poučnou a inspirativní četbu.

Adéla Jurečková

Ředitelka pražské kanceláře Heinrich-Böll-Stiftung

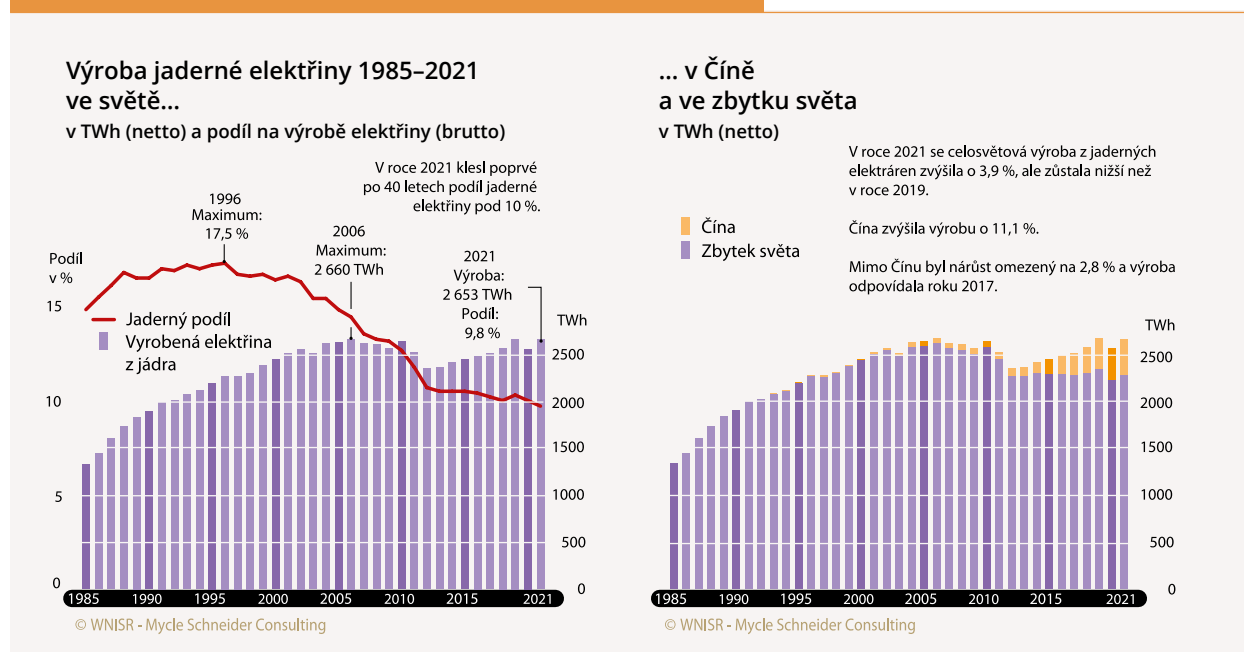
ÚVODNÍ PŘEHLED

K 1. lednu 2023 je podle WNISR v provozu 411 reaktorů, zatímco na webu MAAE-PRIS je jich 422 [1], což je rozdíl 11 jednotek, nejmenší rozdíl mezi oběma datovými řadami za posledních deset let. Podle aktualizovaných údajů dosáhl počet provozovaných reaktorů MAAE vrcholu v roce 2005, kdy bylo v provozu 440 reaktorů, zatímco údaje WNISR uvádějí vrchol v roce 2002, kdy bylo v provozu 438 reaktorů – což je velmi blízko.

V průběhu roku 2022 Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) nečekaně vyřadila 17 jaderných reaktorů ze svých statistik provozovaných reaktorů, vytvořila novou kategorii stavu nazvanou „Pozastavený provoz“ a odpovídajícím způsobem zpětně upravila své datové řady.

Vzhledem k tomu, že ke konci roku nebyly uzavřeny tři zbývající reaktory v Německu s instalovaným výkonem 4 gigawatty (GW), překročil podle datové řady WNISR světový provozovaný jaderný výkon předchozí rekord z roku 2006 o 2 GW a dosáhl 369,3 GW. Revidované údaje MAAE uvádějí „provozní“ kapacitu 378,3 GW, přičemž historického maxima bylo dosaženo v roce 2018 na úrovni 381 GW. Podíl jaderných elektráren na globální hrubé výrobě elektřiny klesl již v polovině roku 2022 na 9,8 %, především v důsledku dlouhodobého růstu obnovitelných zdrojů (solární a větrné elektrárny v roce 2021 pokryly 10,2 % světové výroby elektřiny).

Obrázek 1 – Výroba jaderné elektřiny 1985–2021 ve světě



Zdroje: WNISR, s BP, IAEA-PRIS, 2022

Nově spuštěné, odstavené a rozestavěné bloky

V roce 2022 zahájilo provoz sedm nových reaktorů, z toho tři v Číně a po jednom v Pákistánu (postaveném čínskými společnostmi), Finsku, Jižní Koreji a Spojených arabských emirátech (SAE). Tento výsledek je třeba porovnat s 15 očekávanými připojeními k síti na začátku roku, protože spuštění osmi bloků bylo odloženo nejméně do roku 2023. Reaktor Hanbit-4 v Jižní Koreji byl znovu spuštěn po pětileté dlouhodobé odstávce, kdy byl zařazen v kategorii LTO – Long-Term Outage, oficiálně z důvodu údržby. [2] Naopak nově byly do kategorie LTO v roce 2022 zařazeny čtyři reaktory – po dvou v Indii a Kanadě.

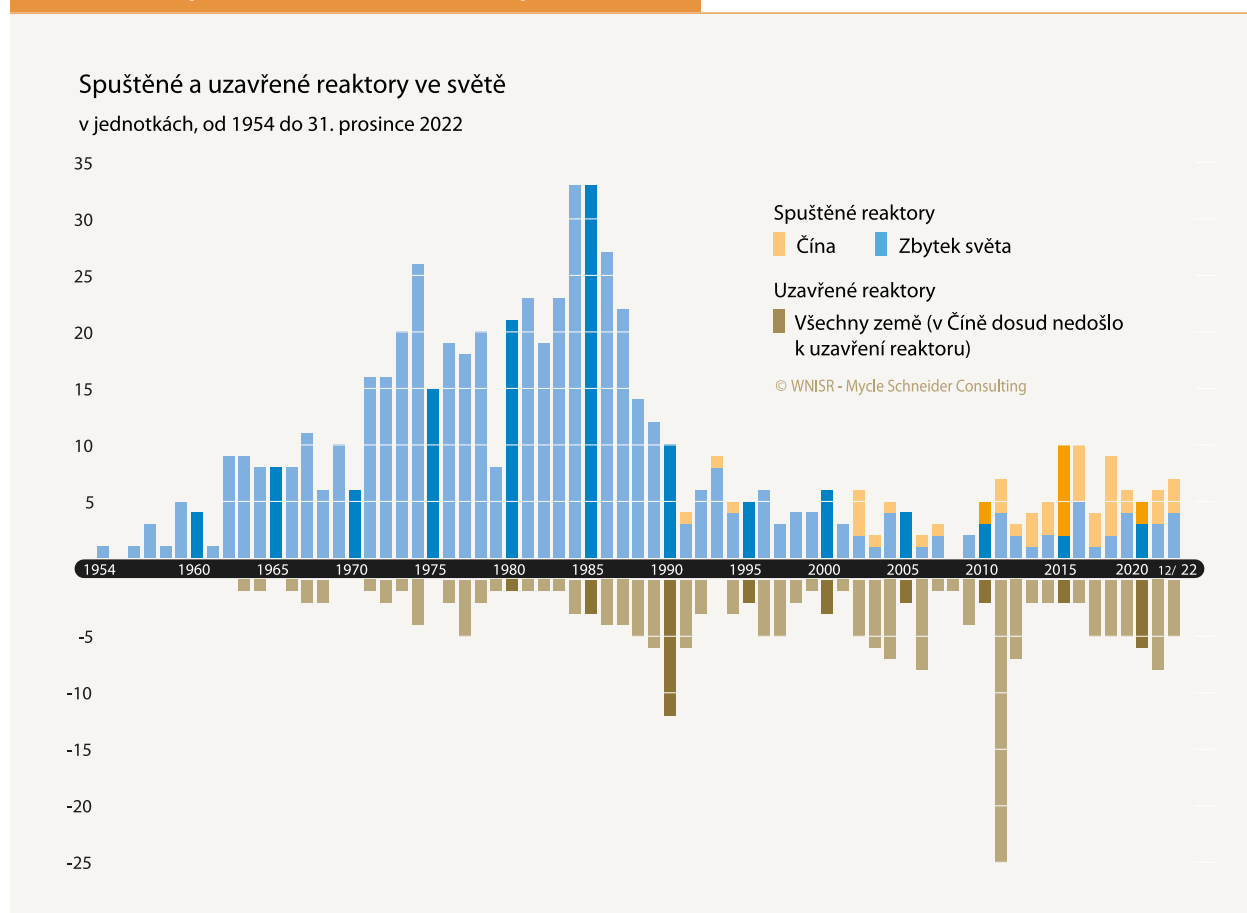
Pět reaktorů bylo uzavřeno, z toho tři ve Spojeném království (UK) a po jednom v Belgii a Spojených státech (US). Celkový počet uzavřených reaktorů na celém světě se tak zvýšil na 207. [3] V důsledku změny německého jaderného zákona se na poslední chvíli provoz tří zbývajících reaktorů, jejichž uzavření bylo původně plánováno na konec roku, prodloužil nanejvýš do poloviny dubna 2023. Provozovatelé nesmějí do reaktorů doplňovat palivo, takže výroba energie bude postupně klesat až do jejich uzavření.

Byla zahájena výstavba deseti reaktorů, z toho pěti v Číně, dvou v Egyptě a jednoho v Turecku. Všechny projekty mimo Čínu jsou ruské konstrukce; ruský průmysl navíc navrhl čtyři projekty v Číně. Na druhé straně byla v Číně zahájena výstavba dvou plavidel, která měla být v Rusku vybavena ruskými reaktory. Kromě toho byla v Brazílii oficiálně obnovena výstavba reaktoru Angra-3 po sedmiletém pozastavení, které bylo vyvoláno rozsáhlým korupčním skandálem.

K 1. lednu 2023 je v 17 zemích ve výstavbě 59 jaderných reaktorů. Zatímco v Číně se staví nejvíce reaktorů (22), ruský jaderný průmysl je zdaleka největším stavitelem na světě s 25 reaktory v devíti zemích (včetně Ruska a Slovenska, kde dva reaktory ruské konstrukce dokončuje konsorcium pod českým vedením).

Čtyři z pěti reaktorů ve výstavbě na světě tedy staví buď čínský, nebo ruský jaderný průmysl. Jediné dvě další země, které staví v zahraničí, jsou Francie (ve Velké Británii) a Jižní Korea (ve Spojených arabských emirátech), zatímco Argentina, Indie a USA realizují jaderné projekty pouze na domácím trhu. Jen tři ze 17 zemí realizují projekty jaderné energetiky ve více lokalitách, v ostatních 14 zemích se práce omezují na jedinou lokalitu.

Obrázek 2 – Spuštěné a uzavřené reaktory ve světě



Zdroje: WNISR, s IAEA-PRIS, 2023

FRANCIE

Úvod

Jak jsme psali v poslední zprávě o stavu jaderného průmyslu (WNISR 2021), rok 2020 byl z pohledu francouzského jaderného sektoru „obzvláště náročný“, ale vyhlídky na rok 2022 byly ještě podstatně horší. Ačkoli se výroba z jádra za rok 2021 zvýšila, odhalení prasklin v systémech havarijního chlazení v prosinci 2021 vedlo k odstavení čtyř největších (1 450 MW) a nejnovějších francouzských reaktorů. Došlo tak k nečekané ztrátě téměř 6 GW výkonu uprostřed zimy, kdy spotřeba ve Francii, kde asi třetina budov používá elektrické přímotopy, dosahuje vrcholu. Brzy se ukázalo, že podobné potíže trápí i některé z 20 reaktorů o výkonu 1 300 MW. V polovině roku 2022 bylo kvůli tomu 12 těchto bloků odstaveno na neurčito. Zatím není jasné, nakolik tento problém zasáhl také zdejších 32 reaktorů o výkonu 900 MW.

Technické provádění inspekcí tak, aby přinesly spolehlivé výsledky, je samo o sobě velmi náročné. Inspekce zaberou hodně času a francouzskému jadernému dozoru (ASN) trvalo do konce července 2022, aby posoudil, zda je inspekční postup zvolený EDF vhodný a zohledňuje dostupné znalosti o fenoménu prasklin i související požadavky jaderné bezpečnosti. Po zjištění závad následuje časově náročná výroba a výměna dílů. Špičkových svářečů se zkušenostmi z jaderných elektráren není mnoho. Práce je o to náročnější, že jsou zde lidé vystaveni značné dávce záření. Vzhledem k tomu, že v některých reaktorech je nutné vyměnit několik popraskaných kusů potrubí, potvrzují kontroly a opravy ještě dlouho. Přesto chce francouzský výrobce a distributor EDF prohlídku všech 56 francouzských reaktorů dokončit už v roce 2025.

Po odhalení koroze vydala EDF 13. ledna 2022 revidovaný odhad výroby elektřiny z jádra a francouzská vláda oznámila, že společnosti EDF nařídí dodávat konkurenčním obchodníkům s elektřinou o 20 % více energie (120 TWh) za pevnou cenu, než se očekávalo, aby prudce rostoucí ceny nedopadly tak tvrdě na spotřebitele... a voliči byli před volbami v dubnu a červnu 2022 spokojenější. Díky tomuto kroku se regulovaný tarif nezvedl o 40 %, ale pouze o 4 %, nicméně v roce 2023 budou sazby muset dohnat situaci na trhu.

Akcie EDF se hned 14. ledna 2022 propadly o 15 % a za další tři dny ratingová agentura Standard & Poor's (S&P) zařadila EDF do negativně hodnocené kategorie. Agentura totiž odhadla, že výsledky EDF budou za těchto okolností o 10–13 miliard eur horší, než se čekalo.¹ [4]

Zmíněné technické potíže navázaly na řadu mimořádných odstávek nařízených kvůli údržbě a opravám. V první polovině roku běžela většinou méně než polovina reaktorů. V květnu a červnu 2022 výkon provozovaných zdrojů nikdy nepřesáhl polovinu instalovaného výkonu, a dokonce místy klesl až na třetinu. To nejhorší má však teprve přijít, až se v zimě ve velkém zapnou elektrické přímotopy. „Současná slabá výroba elektřiny z jádra by pro Francii mohla být katastrofou,“ napsal ekonomický deník *Les Echos*.² [5]

Navzdory novým problémům v odvětví s už tak pošramocenou pověstí se francouzský prezident nezdráhá hovořit o „francouzském jaderném obrození“. Prozatím bloky typu EPR2 neexistují pořádně ani na papíře.

Podle interních odhadů státní správy z října 2021 chybělo ještě 19 milionů hodin inženýrských prací, aby se vývoj EPR2 dostal od základních návrhů k detailním. První blok typu EPR2 by měl být zprovozněn mezi lety 2039–2040. V případě nečekaných technických potíží – které známe z minulosti i současnosti – by se spuštění prvního EPR2 protáhlo až do roku 2043. [6]

Vláda požádala EDF, aby do poloviny roku 2021 vypracovala dokumentaci „v souvislosti s programem obnovy jaderných zařízení ve Francii“. [7] EDF už „začala připravovat ekonomické a průmyslové návrhy postavené na technologii EPR2“. Ve výroční zprávě z roku 2021 přitom EDF jasně uvádí, že „zatím nebylo přijato žádné investiční rozhodnutí a program se neobejde bez odpovídajících regulačních a finančních opatření“. [8]

Mezitím se objevily odhady, podle kterých měl čistý dluh EDF vystoupat do konce roku 2022 do výše 65 miliard eur. [9] Představitelé odborů vyjádřili obavu, že společnost nemusí přežít následující rok. Začátkem července 2022 vláda oznámila, že EDF opět plně znárodní (aktuálně má 84% podíl). V důsledku série špatných

1 Hospodaření EDF skončilo v roce 2022 ve ztrátě 18 miliard eur a čistý dluh firmy dosáhl na konci roku 64,5 miliardy eur. – pozn. red.

2 Na začátku roku 2023 odhaduje vedení EDF meziroční nárůst produkce jaderných elektráren z 279 TWh v roce 2022, což je nejnižší hodnota od konce 80. let, na 315 až 330 TWh v roce 2023. Pochopitelně bude záviset na průběhu oprav korodovaných potrubí v jaderných blocích. – pozn. red.

zpráv během posledních let klesla cena akcií EDF pod 8 eur, což je méně než desetina oproti maximální hodnotě z roku 2007. Zůstává tak pod cenou 12 eur, kterou vláda nabídla menšinovým akcionářům k odkoupení jejich podílu. Podle analytiků a komentátorů se však problémy EDF zestátněním nevyřeší. Jak napsal deník *Les Echos*: „EDF zachrání jedině transformace, která ve všech patrech společnosti posílí flexibilitu a efektivitu. V posledních 40 letech ovšem stát ani jednou nepředvedl, že by z mamutů dokázal udělat gazely.“ [10]

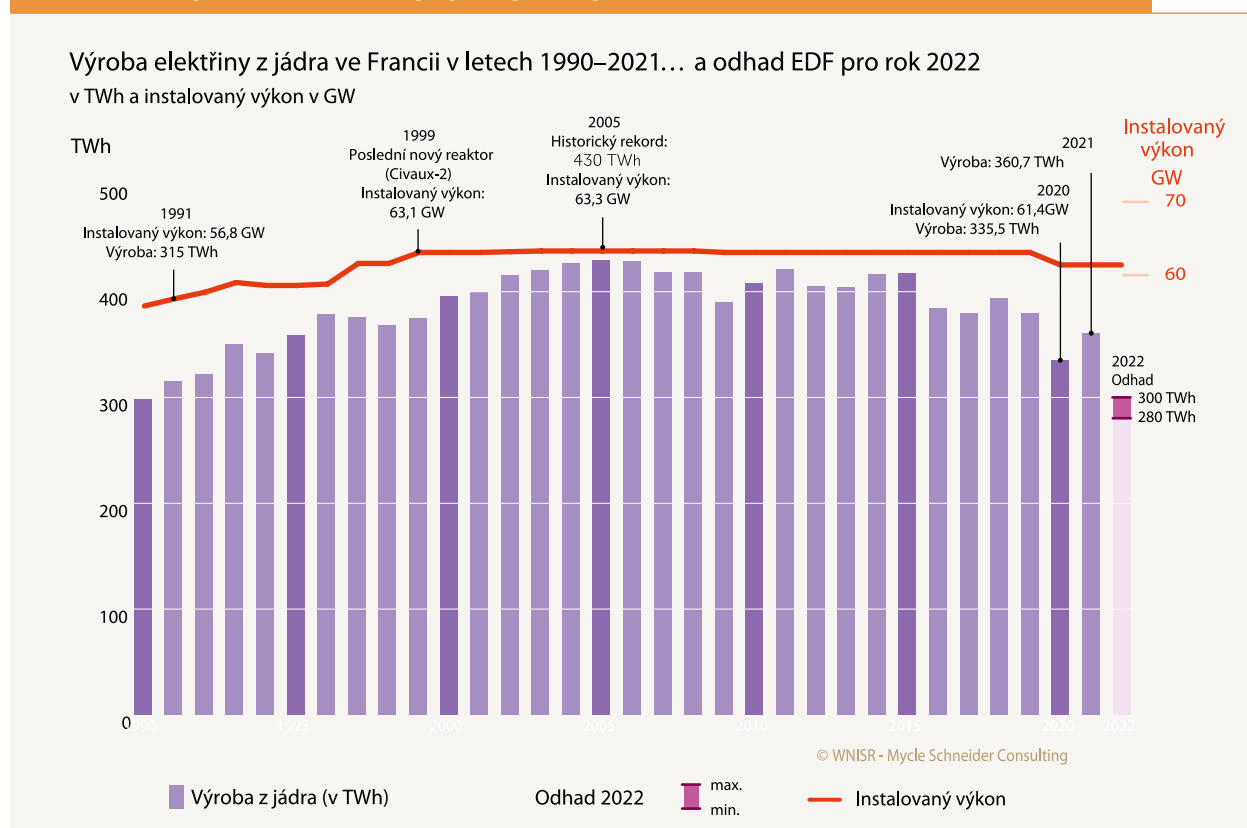
Nejslabší výsledky za desítky let, ale to nejhorší teprve přijde

Až do uzavření dvou nejstarších francouzských bloků ve Fessenheimu na jaře 2020 se francouzský reaktorový park po dobu 20 let příliš neměnil, s výjimkou uzavření množivého reaktoru Phénix o výkonu 250 MW v roce 2009 a dlouhodobého odstavení dvou bloků v letech 2015–2017.

Od připojení Civaux-2 v roce 1999 nepřibyl ve francouzské síti žádný nový reaktor. První a jediný tlakovodní reaktor uzavřený před Fessenheimem byl Chooz-A o výkonu 300 MW vypnutý roku 1991. Dále bylo uzavřeno osm reaktorů UNGG první generace, dva množivé reaktory a malý prototyp těžkovodního reaktoru. V roce 2021 vyrobilo 56 [11] provozovaných reaktorů 360,7 TWh, meziročně o 7,5 % elektřiny více, ale stále pod úrovní z roku 2019 a šestý rok po sobě, kdy výroba z jádra zůstala pod 400 TWh. Vrchol nastal v roce 2005, kdy Francie v jaderných elektrárnách vyrobila 431,2 TWh. K tomuto maximálnímu výkonu se sektor dopracovával pět let. Po roce 2015 se však navzdory relativní stabilitě instalované kapacity výkon propadl (viz obrázek 3).

Po mimořádném poklesu v roce 2020 vyrobila Francie v roce 2021 z jádra 69 % (+ 1,9 procentního bodu) elektřiny, avšak úrovně z roku 2019 nedosáhla. Podíl jaderné energetiky dosáhl maxima v roce 2005, kdy činil 78,3 %. Situace v průběhu roku 2022 nebyla příznivá. Po několika technických revizích EDF odhaduje roční výrobu na 280–300 TWh. To by byla nejnižší hodnota od roku 1990 (viz obrázek 3). Pokles měsíční produkce pokračoval v roce 2022, kdy v každém jednotlivém měsíci prvního pololetí byla nejnižší za posledních deset let.

Obrázek 3 – Výroba a instalovaný výkon jaderných elektráren ve Francii v letech 1990–2022



Zdroje: RTE, 2000–2022; EDF, 2022

V roce 2021 představovala elektřina ve Francii 24,5 % konečné spotřeby energie. Jaderné elektrárny, které měly 69% podíl v mixu, tak stály za pokrytím 17 % konečné spotřeby energie jak v roce 2020, tak v roce 2021. Největší díl pokryla fosilní paliva – ropa 42 % a zemní plyn 20 %, zatímco pouze 11 % konečné spotřeby energie zajistily obnovitelné zdroje. [12]

Elektrárna Hinkley Point C

Projekt společnosti EDF Energy na výstavbu dvou reaktorů v elektrárně Hinkley Point byl schválen v dubnu 2013. V říjnu 2015 upřesnila EDF spolupráci s britskou vládou [13] a oznámila podmínky smlouvy o výstavbě Hinkley Point C (HPC) za 16 miliard liber bez započítání budoucí inflace. [14] Odhadovaná cena výstavby od té doby několikrát vzrostla (všechny uvedené sumy odpovídají hodnotě měny z roku 2015):

- V roce 2017 stoupla z 18,1 na 19,6 miliardy liber. EDF tehdy uvedla, že k nárůstu o 1,5 miliardy došlo „na základě lepšího pochopení návrhu upraveného podle požadavků britských regulačních orgánů a v souvislosti s objemem a posloupností prací na stavbě a postupnou realizací dodavatelských smluv“. [15]
- V listopadu 2019 EDF oznámila další zdražení kvůli „náročným stavebním podmínkám“, „revidovaným cílům akčního plánu“ a „dodatečným nákladům na implementaci dokončeného provozního návrhu“. Nově se tak náklady na vyhotovení stavby vyšplhaly do výše mezi 21,5 až 22,5 miliardy liber. Firma dále uvedla, že vzrostlo riziko zdržení, které by stálo dalších 0,7 miliardy liber, což horní hranici odhadů posunulo k 23,2 miliardy liber. EDF oznámila, že „vedení projektu nadále dělá všechno proto, aby první blok začal vyrábět elektřinu před koncem roku 2025“, což nezní jako pevné přesvědčení o splnitelnosti harmonogramu. [16]
- Ve výroční uzávěrce z března 2022 EDF uvedla, že první blok má začít vyrábět v červnu 2026 (od roku 2016 přitom hovořila o konci roku 2025). Náklady na dokončení projektu nově odhadla v rozmezí 22–23 miliard liber, o dalších 0,5 miliardy liber draž. [17]
- Za necelé tři měsíce, v květnu 2022, EDF oznámila, že odhadované náklady opět vzrostly, tentokrát o 3 miliardy, tedy na 25–26 miliard liber, a že spuštění se posouvá o další rok – na červen roku 2027.³ [18]

Zásadní součástí kontraktu k HPC je smlouva podle principu Contract for Difference, která garantuje po dobu 35 let výkupní cenu elektřiny, jejíž výše by se podle počtu dokončených bloků pohybovala v rozmezí 89,5–92,5 libry za MWh (v cenách roku 2012) a každoročně by se zvyšovala v návaznosti na britskou inflaci (Retail Price Index). [19] Začátkem roku 2020 EDF upřesnila, že z 92,5 libry za MWh by 19,5 libry šlo na provoz a údržbu a pouze 11 liber na běžné stavební náklady vyjma financování stavby. Zbývajících 62 liber pokrývá rizika, přičemž 26 liber má jít na finanční náklady pro typické regulované aktivum bez rizika výstavby a 36 liber na pokrytí rizika výstavby první stavby svého druhu. [20]

Očekávalo se, že výstavba bude v první řadě financována na dluh (půjčkou) zajištěný státními úvěrovými zárukami Velké Británie v odhadované výši okolo 17 miliard liber, ale úvěrové záruky využity nebyly. [21] EDF v říjnu 2015 oznámila, že chce HPC a další náročné investice v průběhu následujících pěti let financovat prodejem vedlejších aktiv v hodnotě až 10 miliard eur. [22]

³ V únoru 2023 ve zprávě pro akcionáře uvedla EDF nový odhad. Vzhledem k inflaci a zdražení materiálů i subdodávek nyní očekává náklady ve výši 32,7 miliardy liber. – pozn. red.

JIŽNÍ KOREA

Korejská republika (Jižní Korea) provozuje 24 reaktorů a tři reaktory staví. Hanbit-4 je od května 2017 dlouhodobě odstavený, a to především kvůli 140 dutinám zjištěným ve stěnách betonového kontejnmentu a kvůli korozi výztuže.

Prezident Jun Sok-jol, který se stal hlavou státu v květnu 2022, ustoupil od politiky odstavování jaderných elektráren, kterou prosazovala bývalá vláda Mun Če-ina (2017–2022). V srpnu 2022 nastupující Junův kabinet představil první návrh „Základního plánu dlouhodobých dodávek a poptávky po elektřině“, který si klade za cíl zvýšit podíl jádra na výrobě elektřiny na úkor rychlejšího rozšiřování obnovitelných zdrojů.

Jihokorejský reaktorový park, ve vlastnictví společnosti Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP), zahrnuje elektrárny Hanbit, Hanul, Kori a Wolsong. Průměrný počet reaktorů na jednu elektrárnu je v Jižní Koreji nejvyšší na světě. Se sedmi reaktory a výkonem 7 489 MW je Kori největší jadernou elektrárnou světa.

Podle údajů Korejské statistické informační služby vyrobily roku 2021 zdejší jaderné elektrárny 158 TWh elektřiny (brutto; 27,5 % mixu), tedy o něco méně než 160 TWh (29 %) v roce 2020. [23]

Výstavba reaktorů

Všechny tři budované reaktory – Shin Hanul-2 a Shin Kori-5 a 6 – jsou typu APR-1400. Výstavba Shin Hanul-2, která začala v červnu 2013, je téměř dokončena, ale spuštění bylo už několikrát odloženo. Naposledy měl být druhý blok uveden do komerčního provozu v květnu 2022 [24], k čemuž však nedošlo, a nyní se spuštění očekává v průběhu roku 2023. [25] Přetrvávající problémy na prvním bloku navíc ohledně harmonogramu vyvolávají další nejistotu.

Jihokorejská Komise pro jadernou bezpečnost (NSSC) 9. července 2021 podmíněčně schválila vydání provozní licence pro Shin Hanul-1, téměř deset let od udělení stavebního povolení v prosinci 2011. Od podání žádosti KHNP v prosinci 2014 uplynulo 79 měsíců, než NSSC dospěla k rozhodnutí, čímž byl stanoven nový rekord v délce licenčního řízení v historii korejské jaderné regulace. K průtahům s licencí Shin Hanul-1 došlo především kvůli bezpečnostním obavám souvisejícím mimo jiné s pasivním autokatalytickým rekombinátorem (PAR), který má při určitém typu havárií odstraňovat vodík z reaktorového kontejnmentu, a také kvůli rizikům spojeným s leteckým provozem. Souhlas byl proto doplněn čtyřmi konkrétními technickými podmínkami. [26]

Shin Hanul-1 dosáhl 22. května 2022 kritického stavu a 9. června 2022 byl zapojen do sítě. K oběma krokům však došlo předtím, než KHNP úspěšně otestovala PAR a odevzdala regulátorovi závěrečnou zprávu. Zároveň NSSC 11. srpna 2022 upravila bloku Shin Hanul-1 podmínky provozní licence. Ještě počátkem září 2022 nebylo jasné, jestli bude Shin Hanul-1 v roce 2022 uveden do komerčního provozu. Vydání provozní licence pro Shin Hanul-2 bude podléhat výsledkům několika přezkumů.

Výstavby zbývajících dvou reaktorů, Shin Kori-5 a 6, probíhají od dubna 2017 a září 2018 a mají být dokončeny v březnu 2023 a v červnu 2024. [27] KHNP však v březnu 2021 požádala o prodloužení stavebního povolení, přičemž plánované dokončení Shin Kori-5 se posunulo o rok (na 31. března 2024) a Shin Kori-6 o devět měsíců (na 31. března 2025). [28]

Trvalé uzavírky

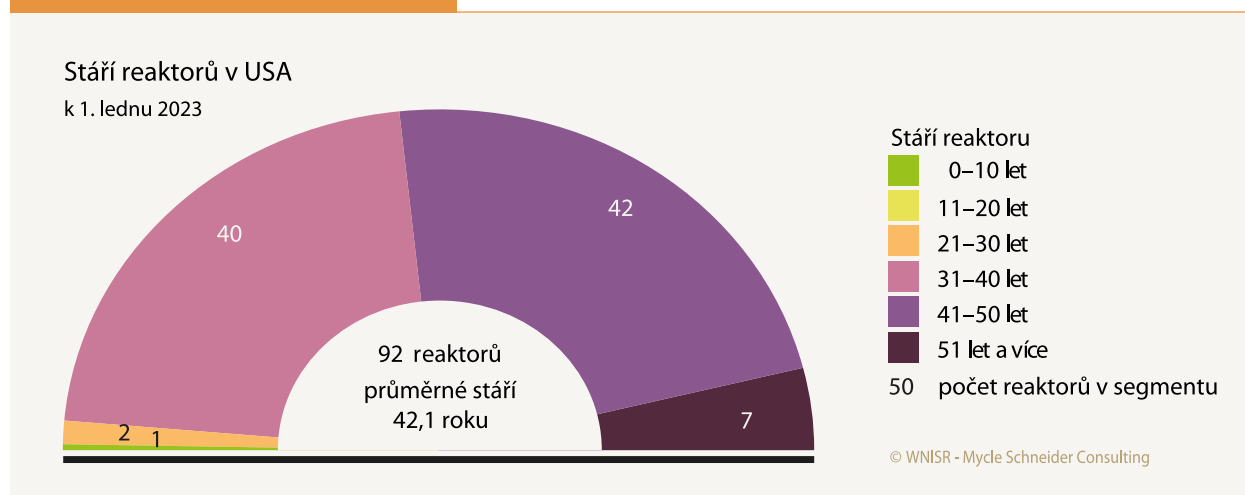
V Jižní Koreji byly dosud uzavřeny pouze dva reaktory, Kori-1 a Wolsong-1. Deseti dalším o celkovém výkonu 8 450 MW skončí do roku 2030 provozní licence. Jde o reaktory Kori-2 (plánované uzavření v roce 2023), Kori-3 (2024), Kori-4 a Hanbit-1 (2025), Hanbit-2 a Wolsong-2 (2026), Hanul-1 a Wolsong-3 (2027), Hanul-2 (2028) a konečně Wolsong-4 (2029). Junova vláda se provozní licence všech těchto reaktorů pravděpodobně pokusí prodloužit, počínaje Kori-2, který o pokračování provozu požádal už v roce 2022. Proti těmto vládním plánům se začíná formovat opozice. [29] Je možné, že prodloužení životnosti neprojde tak snadno, jak nová vláda doufá, vzhledem k bezpečnostním obavám, ekonomickým důsledkům a odmítavému postoji veřejnosti.

SPOJENÉ STÁTY

Přehled

S 92 komerčními reaktory, které byly k 1. červenci 2022 v provozu, disponují Spojené státy nadále největším reaktorovým parkem na světě. Po 50 letech skončil 20. května 2022 provoz Palisades-1 v Michiganu. [30] Plánované uzavření bylo oznámeno v roce 2018 a mělo se krýt s vypršením lukrativní smlouvy o odběru energie uzavřené mezi Energy Nuclear a původním vlastníkem elektrárny Consumers Energy. Dne 1. září 2022 schválila Kalifornie financování dalších pěti let provozu reaktorů Diablo Canyon-1 a 2 do roku 2029 a 2030. [31] Americké reaktory vyrobily v roce 2021 778,2 TWh elektřiny, o 1,5 % méně než o rok dříve. Podle informačního systému IAEA-PRIS pokryly jaderné elektrárny 19,6 % elektřiny spotřebované v USA za rok 2021 – 18,9 % podle údajů amerického ministerstva energetiky, což představuje mírný pokles oproti 19,7 % v roce 2020 a rozdíl 3,6 procentních bodů oproti nejvyššímu podílu 22,5 %, kterého zdejší jaderný sektor dosáhl roku 1995. Pokud započítáme elektřinu vyrobenou nekomerčními solárními panely na střechách (která meziročně vzrostla o 18 %), podíl jádra v energetickém mixu za rok 2021 činil 18,7 %. [32] Za posledních 26 let byl spuštěn jediný nový blok. Americký reaktorový park nejenže dále stárne, ale patří už k vůbec nejstarším na světě. Na konci roku 2022 činilo průměrné stáří reaktorů 42,1 roku, 49 bloků je v provozu přes 40 let (sedm z nich přes 51 let) a pouze tři běží méně než 31 let (viz obrázek 4).

Obrázek 4 – Stáří reaktorů v USA



Zdroje: WNISR a IAEA-PRIS, 2023

V jediné nové jaderné elektrárně na území USA se dále stavělo – Vogtle v Georgii má být rozšířen o třetí a čtvrtý blok typu AP-1000. Odhadované náklady za posledních 12 měsíců dále rostly a spuštění bylo znovu odloženo. Podle údajů tiskové agentury Associated Press z června 2022 [33] dosáhla cena Vogtle-3 a 4 minimálně 30,34 miliardy dolarů. [34] Částka navíc nezahrnuje 3,68 miliardy dolarů, které společnost Westinghouse uhradila spoluvlastníkům v roce 2017. [35] Celkové náklady tohoto projektu tak přesahují 34 miliard dolarů, což je 2,4krát více než 14 miliard odhadovaných na začátku výstavby v roce 2013. Nedávný nárůst nákladů a zpoždění výstavby jsou z velké části způsobeny problémy se zajištěním kvality instalované kabeláže [36] a souvisejícími administrativními nedostatky, jelikož chybí přes 26 tisíc kontrolních záznamů. [37] Americký regulační úřad pro jadernou bezpečnost (NRC) 3. srpna 2022 povolil zavážení paliva ve třetím bloku, který má být spuštěn v prvním čtvrtletí roku 2023. Společnost Georgia Power odhaduje, že čtvrtý blok bude zprovozněn koncem letošního roku.

Prodloužené licence reaktorů

Už 84 z celkem 92 amerických reaktorů získalo k 1. červenci 2022 licenci prodlouženou o 20 let, která dovo-luje vyrábět elektřinu i po překročení čtyřicetileté hranice – až do dosažení 60 let provozu. Od prosince 2019 NRC další licence zatím neprodloužoval. Čtyři reaktory měly o prodloužení zažádat v letech 2022–2024. Po-dle zákona o atomové energii z roku 1954 a nařízení NRC vydává tento úřad novým komerčním reaktorům provozní licenci na 40 let. Předpisy ji později dovolují prodloužit vždy až o dalších 20 let.⁴

V červenci 2017 NRC zveřejnil dokument obsahující „programy řízeného stárnutí“, podle kterých může NRC navýšit životnost jaderné elektrárny až na 80 let udělením „následného prodloužení licence“. [38] Toto následné prodloužení obdrželo od NRC k 4. květnu 2021 už šest reaktorů. [39] V současnosti úřad vyhod-nocuje dalších devět žádostí. [40]

V únoru 2022 však NRC vydal bezprecedentní příkaz, kterým fakticky pozastavil platnost prodloužení pro-vozu čtyř reaktorů [41] a rovněž přerušil vyhodnocování dalších žádostí, dokud pro prodloužování licencí z 60 na 80 let nevypracuje nová environmentální kritéria.

Uzavírané reaktory

Vyřazením Palisades-1 z provozu v květnu 2022 dokončila společnost Entergy plánovaný odchod z vol-ného trhu s energiemi, který předznamenalo už uzavření Vermont Yankee-1 (v roce 2014), [42] Pilgrim-1 (2018), Indian Point-2 (2020) a Indian Point-3 (2021) a odprodej FitzPatrick-1 společnosti Exelon (2016).

Průměrné stáří šesti reaktorů uzavřených v USA v letech 2018–2021 bylo 46,5 roku, jejich provoz byl tedy mnohem kratší, než jaký umožňovala licence prodloužená na 60 let.

Fiasko v elektrárně Vogtle

V USA se nyní staví pouze dva komerční reaktory na jediném místě, konkrétně třetí a čtvrtý reaktor typu AP-1000 v elektrárně Vogtle, jejichž výstavba začala v březnu a listopadu 2013. Při zahájení stavebních prací na třetím bloku se odhadovaná cena dvojice reaktorů pohybovala okolo 14 miliard dolarů a dokončení bylo plánované v letech 2017 a 2018. [43] Reaktory se nachází u města Waynesboro ve státě Georgia na jihovýchodě USA a patří pod Southern Company, jejíž dceřiná společnost Georgia Power je většinovým vlastníkem.

V roce 2017 Southern Company odložila chystané nakládání paliva ve třetím bloku na listopad 2021 a ve čtvrtém na listopad 2022. Spuštění reaktorů se od té doby znovu odložilo na březen a prosinec 2023. V srpnu 2022 NRC schválil počáteční zavážení paliva ve Vogtle-3 od října 2022, zatímco čtvrtý blok bude bez paliva minimálně do roku 2023. [44]

V posledních letech se kupí indicie, které ukazují, jak obrovským selháním celý projekt Vogtle je. Poslední zpoždění výstavby mají z velké části na svědomí administrativní chyby spočívající v nevyplnění více než 26 tisíc kontrolních záznamů o opravách instalované kabeláže. [45] V roce 2021 na nedostatky upozornil NRC a požadoval dodatečné kontroly. [46] Odsouhlasením nakládky paliva NRC fakticky uznal, že Sou-thern Company splnila požadované kontroly, zkoušky, analýzy a kritéria, které byly podmínkou pro spuštění Vogtle-3. [47]

Kritici projektu Vogtle už dávno předpovídali, že dojde ke zdržením a náklady dalece přesáhnou očeká-vání. [48] Původní 46,7% podíl na nákladech (2009) společnosti Georgia Power, schválený Výborem pro veřejné služby v Georgii, činil 6,1 miliardy dolarů [49], což odpovídá ceně 5 975 dolarů za kW instalova-ného výkonu (brutto), zatímco odhad 23 miliard z roku 2017 dává v přepočtu 10 300 dolarů za kW. Nový odhad v roce 2018 se pohyboval okolo 28 miliard dolarů [50] a v srpnu 2022 už odhadovaná celková cena projektu vystoupala na 30,34 miliardy neboli 13 581 dolarů za kW – 2,3krát více, než byl původně schválený odhad. [51] Tato čísla nezahrnují částku 3,68 miliardy dolarů, kterou Westinghouse v roce 2017 odškodnil vlastníky elektrárny Vogtle. [52] Když tyto peníze započítáme, dostaneme se na zhruba 34 miliard dolarů čili 15 219 dolarů za kW, tedy více než 2,5krát tolik, než bylo původně schváleno. Odborníci z MIT přitom v roce 2009 odhadovali budoucnost nových jaderných projektů na základě ceny 4 000 dolarů za kW (při hodnotě měny z roku 2007 a bez započítání budoucí inflace). [53]

4 Reaktor Vogtle 3 začal dodávat elektřinu v dubnu 2023, zavážení paliva do reaktoru Vogtle 4 je aktuálně očekáváno v polovině roku 2023. – pozn. red.

NASAZENÍ JADERNÝCH A OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ ENERGIE

Úvod

V roce 2021 se změna klimatu zařadila mezi nejdůležitější body současné politické agendy, mimo jiné v souvislosti s tím, jak se vlády a firmy připravovaly na 26. summit smluvních stran (COP26) Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu konaný v listopadu 2021. V průběhu příprav na COP26 Mezinárodní energetická agentura (IEA) vydala zprávu, ve které nastínila strategie pro energetický sektor s cílem naplnit Pařížskou dohodu a došla k závěru, že podle jejího scénáře „musí do roku 2050 téměř 90 % vyráběné elektřiny pocházet z obnovitelných zdrojů, přičemž větrná a fotovoltaická energie má dohromady tvořit skoro 70 %“. [54] Jde o pozoruhodné stanovisko IEA, která dosud roli obnovitelné energie dlouhodobě systematicky podceňovala a upozadovala.

Většina zemí si vytyčila ambicióznější cíle pro zmírňování změny klimatu. Některé si jako další mezník stanovily rok 2030, včetně členských zemí EU, Japonska, Velké Británie a Spojených států, jiné země jako Čína, Indie nebo Rusko zase souhlasily s dosažením uhlíkové neutrality v druhé polovině století. Kromě toho byla (znovu) oznámena řada odvětvových dohod, které mají přispět ke zmírňování a adaptaci, například smlouva Aliance Powering Past Coal o ukončení financování mezinárodního fosilního průmyslu. To vše by mělo zrychlit omezování plynu, uhlí a ropy v energetice. IEA si dokonce troufla říci, že budou-li dodržena prohlášení učiněná před a během COP26, nárůst celosvětových teplot by se mohl zastavit na 1,8 stupně oproti době před industriální revolucí. [55] Podobné závěry se však do značné míry opírají o předpoklad, že státy skutečně splní všechny své krátkodobé cíle a dosáhnou uhlíkové neutrality do roku 2050, což mnozí považují za příliš optimistické, zejména vzhledem k tomu, že cíle pro zmírňování stanovené na rok 2030 nejsou zdaleka plněné. Podle iniciativy Climate Action Tracker „bude svět bez zvýšené aktivity vlád v roce 2030 vypouštět dvakrát více emisí skleníkových plynů, než si může s ohledem na pařížský cíl 1,5 °C dovolit. Při splnění závazků pro rok 2030 svět směřuje k oteplení o 2,4 °C a při pokračování současné politiky dokonce o 2,7 °C“. [56]

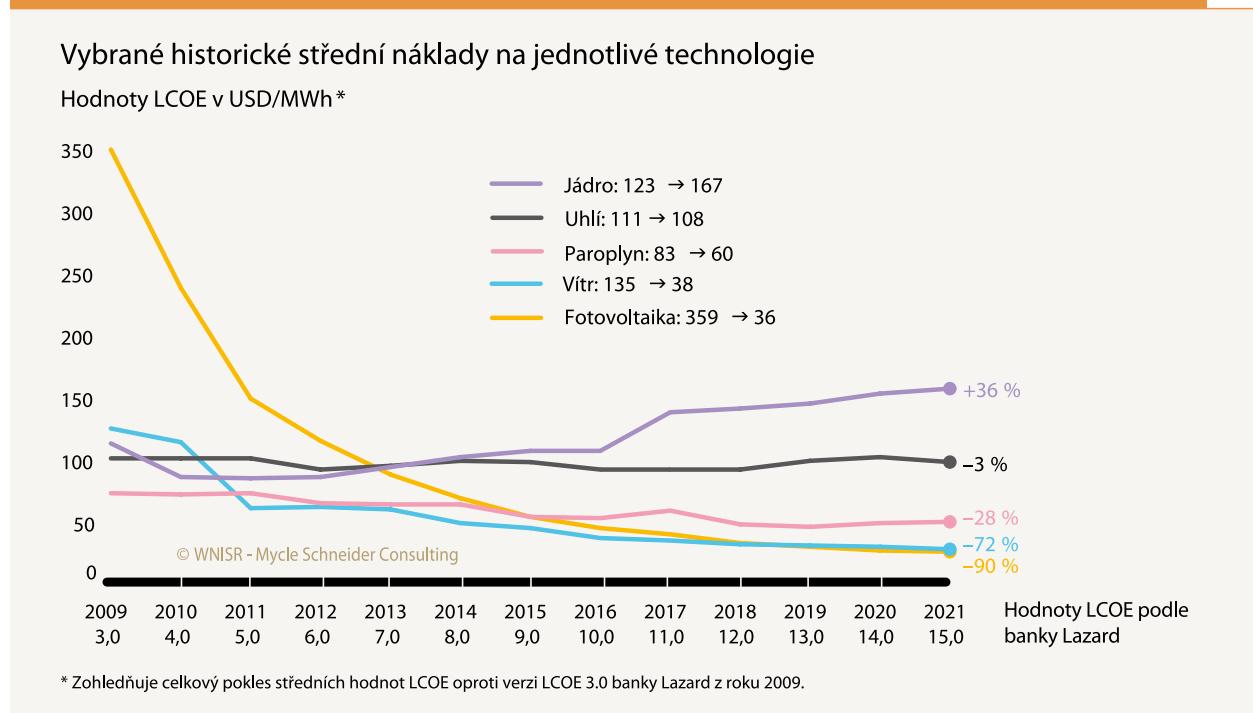
Invaze na Ukrajinu vyzdvihla otázku energetické bezpečnosti a zdůraznila problematičnost závislosti na dovozu fosilních paliv (zejména při využívání jediného zdroje). Situace vedla k novým diskusím a zájmu o nefosilní alternativy, jako jsou obnovitelné zdroje a jádro. Jak ovšem ukazujeme v této části zprávy, obnovitelné zdroje na většině trhů předstihují jadernou energii, a dokonce i fosilní paliva, protože jsou levnější, jejich výstavba je rychlejší a v konečném důsledku z nich lze vyrábět elektřinu s nižší cenou pro spotřebitele. Proto se do obnovitelných zdrojů energie více investuje, což vede k ještě nižším cenám a získávání nových zkušeností s jejich nasazováním. Obnovitelné zdroje se tak dostaly do příznivé spirály, díky níž oproti ostatním typům výroby dále zlevňují.

Náklady

Z analýzy dlouhodobých měrných nákladů (LCOE)⁵, kterou v USA každoročně zpracovává banka Lazard [57], vyplývá, že nedotovaná velkokapacitní fotovoltaika zlevnila v letech 2009–2021 o 90 % (z 359 na 36 dolarů za MWh), větrné elektrárny o 72 % (ze 135 na 38 dolarů za MWh), kdežto jaderné elektrárny o 36 % zdražily (ze 123 na 167 dolarů za MWh) (viz obrázek 5).

5 Charakteristika LCOE (Levelized Cost of Electricity) shrnuje všechny náklady spojené s výstavbou a provozem elektrárny (náklady na investici do výstavby, na palivo, obsluhu, údržbu i likvidaci), vztažené na počet megawatthodin, které zdroj vyrobí za dobu své životnosti. Obě hodnoty jsou v čase přepočítány podle zvolené diskontní sazby (cílem přepočtu je zohlednit, že pro spotřebitele je výhodnější mít peníze i energii dnes nebo za rok než ve vzdálenější budoucnosti). Pomocí LCOE tak lze srovnávat ekonomickou výhodnost různých technologií. Vzhledem k odlišnosti úrovně nákladů v různých světadílech i konkrétních zemích a citlivosti na zvolené vstupy je třeba rozlišovat, pro kterou oblast parametr LCOE počítáme.

Obrázek 5 – Klesající náklady obnovitelných zdrojů oproti tradičním zdrojům elektrické energie



Zdroje: WNISR a IAEA-PRIS, 2022

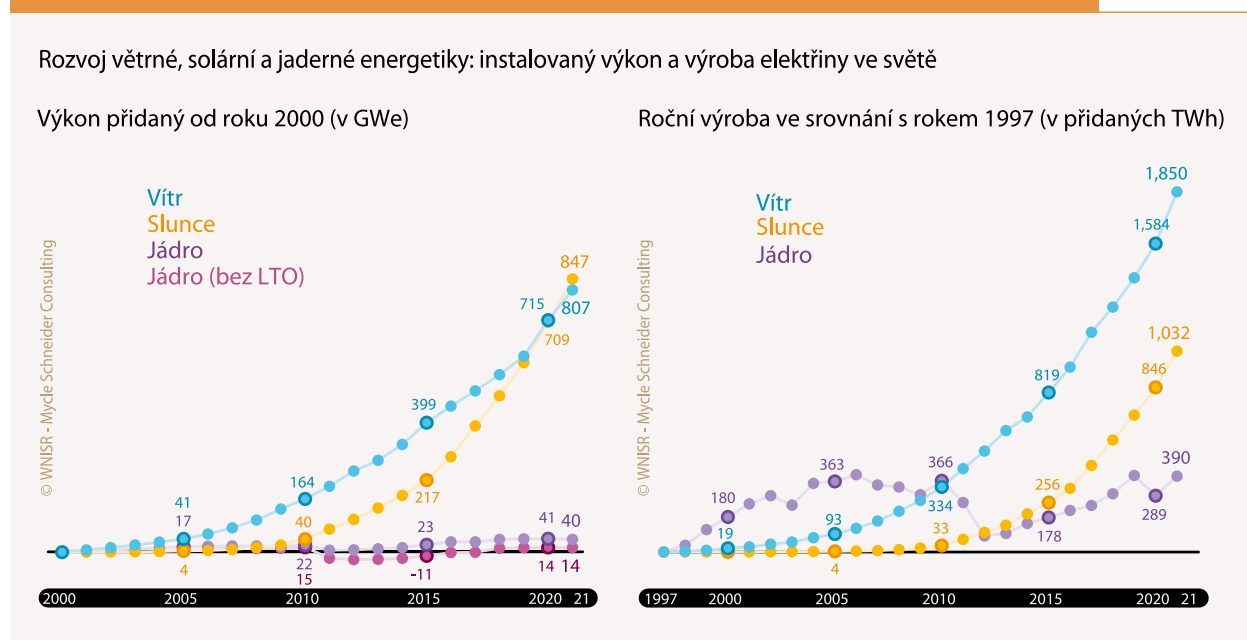
Celosvětově je nyní výroba elektřiny z obnovitelných zdrojů výrazně levnější než z jádra nebo zemního plynu. Podle analýzy Bloomberg New Energy Finance (BNEF) z roku 2020 je nyní větrná a solární energie nejlevnějším zdrojem pro novou výrobu ve většině zemí světa. BNEF navíc odhaduje, že provoz existujících uhelných a plynových elektráren v dalších pěti letech podraží nad cenu výstavby nových solárních a větrných parků. [58]

V každoročním přehledu nákladů na energii z obnovitelných zdrojů Mezinárodní agentura pro obnovitelnou energii (IRENA) shrnuje, že za rok 2021 celosvětový vážený průměr LCOE z nově instalovaných vnitrozemských větrných elektráren klesl oproti předchozímu roku o 15 % na 33 dolarů za MWh. Hodnota LCOE velké fotovoltaiky v tomtéž období rovněž klesla, a sice o 13 %, což je dvakrát větší pokles než o rok dříve. [59]

IRENA ve shodě s BNEF vypočetla, že výkon 800 GW instalovaný v existujících uhelných elektrárnách po celém světě má vyšší provozní náklady než celkové náklady velkokapacitní fotovoltaiky (57 dolarů za MWh) a vnitrozemských větrných elektráren (39 dolarů za MWh, včetně pěti dolarů za MWh kvůli dodatečné systémové integraci). Nahrazení uhelných elektráren by celé soustavě ušetřilo 32 miliard dolarů ročně a snížilo emise zhruba o tři miliardy tun CO₂.

Stejná logika platí i pro jadernou energetiku. Stárnuící jaderné elektrárny obecně vyžadují vyšší náklady na provoz a údržbu. V USA však jaderný průmysl uvádí snížení nákladů v letech 2012–2020 o 35 % na 29,4 dolaru za MWh – nejnižší hodnotu od roku 2002, kdy se souhrnná data začala sbírat, zejména díky 57% poklesu kapitálových výdajů v uvedeném období. [60] Analýza potenciálního dopadu na bezpečnost součástí této zprávy nebyla. Americkým provozovatelům jaderných elektráren se za posledních 20 let daří dosahovat obdivuhodného využití výrobní kapacity okolo 90 %. Díky tomu jsou celkové náklady nižší.

Obrázek 6 – Změny v celosvětovém výkonu větrných, solárních a jaderných elektráren



Zdroje: WNISR a IAEA-PRIS, IRENA, Statistický přehled BP, 2022

Instalovaný výkon a výroba elektřiny

Setrvalý pokles výrobních nákladů u obnovitelných zdrojů vede k ještě vyššímu přírůstku instalovaného výkonu při zvýšení investic. Podle expertní skupiny REN21 bylo za rok 2021 nainstalováno rekordních 314 GW výkonu z obnovitelných zdrojů (včetně vodních elektráren), což představuje o 17 % vyšší přírůstek než o rok dříve. [61]

Tempo rozvoje větrné energetiky se v roce 2021 opět zvýšilo. Celosvětový výkon se dostal na 823,5 GW, přičemž čistý přírůstek činil podle IRENA 92 GW. Za důležité považujeme také rozšiřování mořských větrných elektráren, zejména v Číně a USA.

Nasazování fotovoltaiky dále roste. Podle IRENA přibylo v roce 2021 dalších 138 GW (175 GW podle REN21), což znamená 25% přírůstek na celkových 848,5 GW (942 GW podle REN21).

Na obrázku 6 vidíme nasazení obnovitelných zdrojů od počátku tisíciletí, navýšení výkonu větrných elektráren o 807 GW a solárních o 847 GW (podle údajů IRENA) ve srovnání s relativní stagnací jaderného průmyslu, který v tomto období vzrostl zhruba o 40 GW při započítání všech reaktorů, které jsou v současné době dlouhodobě odstavené (LTO). Vzhledem k tomu, že ve stavu LTO byly ke konci roku 2021 zdroje o výkonu 25,4 GW, které nevyráběly žádnou elektřinu, vzrostl výkon jaderných elektráren od roku 2000 reálně pouze o cca 14 GW.

Charakteristika jednotlivých technologií se liší kvůli rozdílnému využití výrobní kapacity. Obecně platí, že jaderné elektrárny vyrobí za rok více elektřiny na jeden instalovaný MW než elektrárny využívající obnovitelné zdroje. Jak ovšem naznačuje obrázek 6, oproti roku 1997, kdy byl podepsán Kjótský protokol, se v roce 2021 na celém světě vyrobilo o 1 850 TWh více elektřiny z větru a o 1 032 TWh více ze slunce, zatímco z jádra byl čistý nárůst jen o 390 TWh. [62] V uvedeném období tedy přírůstek nízkouhlíkové elektřiny vyrobené větrnými turbínami činil 4,7násobek a solárními panely 2,6násobek nové elektřiny z jádra.

V roce 2021 dosáhla podle údajů BP roční globální míra růstu hrubé výroby z větrné energie 17 % (v roce 2020 to bylo 11,9 %), z fotovoltaiky 22,3 % (v roce 2020 to bylo 20,9 %), zatímco z jádra jen 4,2 % (3,9 % podle IAEA-PRIS).

Obnovitelná energie svým růstem překonává nejen jádro, ale rychle také fosilní paliva a stala se ekonomicky nejvýhodnějším zdrojem pro novou výrobu elektřiny. Nejvýraznější přírůstek zaznamenaly v posledním desetiletí obnovitelné zdroje (mimo vodní elektrárny) s dalšími 2 749 TWh. Druhý nejvyšší nárůst se vyskytl u plynu, dále uhlí a vodní energie. Jaderný přírůstek byl druhý nejnižší (pouze 148 TWh), 18krát menší ve srovnání s růstem obnovitelných zdrojů (bez vodních elektráren).

V roce 2021 jen větrná a solární energetika dosáhla 10,2% podílu na výrobě elektřiny. „Větrné a solární elektrárny poprvé překročily 10% hranici celosvětové výroby a překonaly jádro,“ konstatuje společnost BP ve statistickém přehledu z roku 2022.

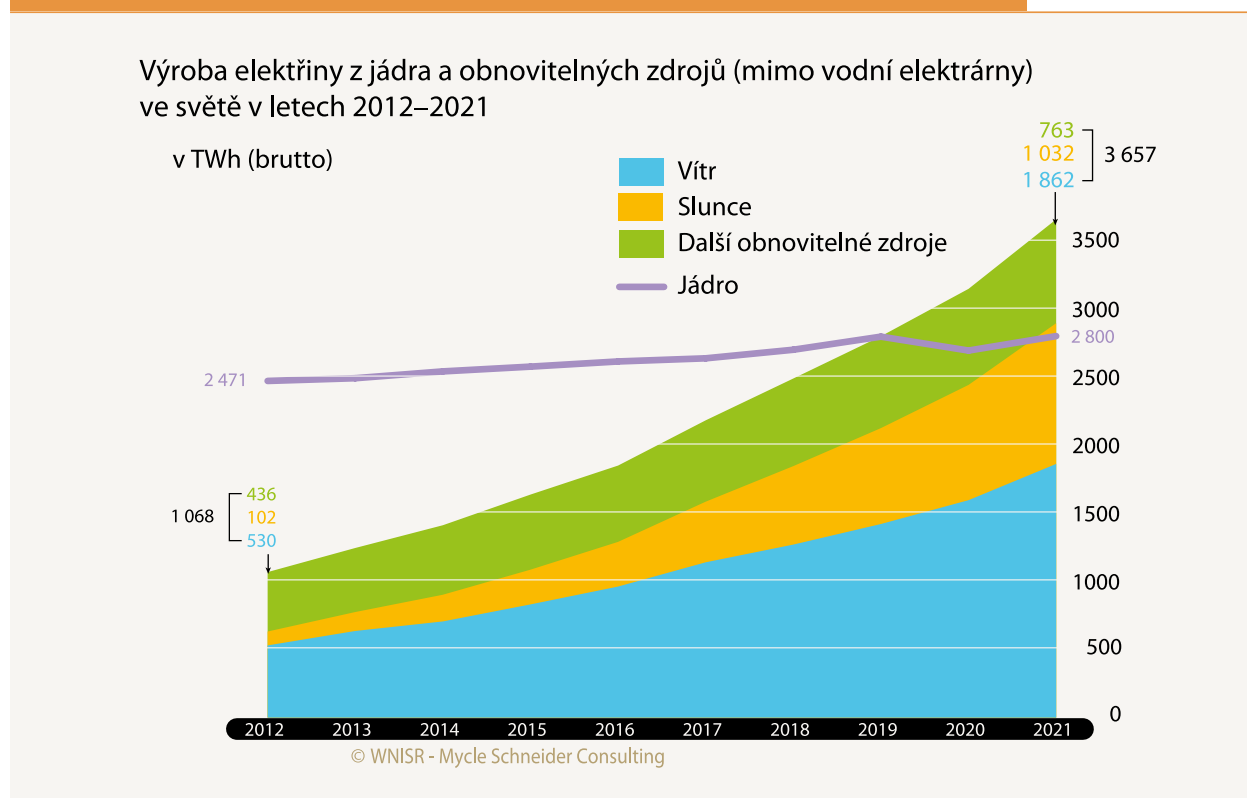
Ačkoli se výroba v jaderných elektrárnách v roce 2021 trochu vzpamatovala, zůstala pod úrovní z roku 2019 a rozdíl se téměř zdvojnásobil: z obnovitelných zdrojů (bez vodních elektráren) se vyrobilo o 30,6 % více elektřiny než z jádra a výkon solárních a větrných zdrojů v součtu poprvé překonal ty jaderné. Oběma sektorům stačilo pouhých 20 let na dosažení toho, co jadernému průmyslu trvalo více než půl století (viz obrázek 7).

Instalovaný výkon solárních elektráren poprvé překonal ty větrné. Instalovaný výkon jak solárních, tak větrných elektráren je oproti těm jaderným už více než dvojnásobný.

V roce 2019 se z obnovitelných zdrojů mimo vodní elektrárny – tedy ze slunce, větru, a hlavně biomasy – vyrobilo více elektřiny než v jaderných elektrárnách.

V roce 2020 nastal výrazný propad jaderného výkonu a rozdíl narostl. Z obnovitelných zdrojů se celosvětově vyrobilo o 16,5 % elektřiny více než v jaderných reaktorech.

Obrázek 7 – Výroba elektřiny z jádra a nevodních obnovitelných zdrojů ve světě



Zdroje: Statistický přehled BP, 2022

JADERNÁ ENERGETIKA A VÁLKA

Ruská invaze na Ukrajinu přinesla záplavu strašných obrazů destrukce a lidského utrpení. Poprvé v historii jsme také mohli vidět jadernou elektrárnu, která byla za provozu ostřelována tanky a posléze dokonce i okupována nepřátelským vojskem.

Tento informační list se zabývá riziky, jimž jsou vystavena jaderná zařízení během války. Soustředí se především na nebezpečí možných velkých úniků radioaktivity do okolního prostředí z jaderných elektráren a skladů vyhořelého paliva.

Zranitelnost jaderných reaktorů a bazénů s vyhořelým palivem kvůli nárokům na chlazení

Oproti jiným druhům energetických zařízení závisí bezpečnost jaderných elektráren na kontinuálně fungujících chladicích systémech. Z fyzikálního hlediska je důvodem radioaktivní rozpad štěpných produktů a transuranů, během něhož se uvolňuje značné množství tepla. Pokud teplo není odvedeno procesem ochlazování, dojde k silnému nárůstu teploty, jenž může způsobovat tavení, požáry a následně i významné úniky radioaktivních látek. Během provozu reaktoru a krátce po jeho odstavení jsou nároky na chlazení obzvláště velké.

Vzniku tepla uvolňovaného při rozpadu radioaktivních izotopů nelze zamezit, a proto je třeba průběžně chlazení, i když je reaktor odstaven. Množství tohoto tepla se snižuje po ukončení jaderné řetězové reakce, a to nejprve rychle a pak stále pomaleji, neboť štěpné produkty jsou směsí mnoha nuklidů s velmi rozdílnými poločasy rozpadu [63]. Zbytkové teplo se tedy snižuje s časem, ale vzhledem k podílu štěpných produktů s delšími poločasy rozpadu se stále uvolňuje ve významném množství i po velmi dlouhou dobu – po dobu několika desetiletí.

Teplo uvolňované při rozpadu radioaktivních izotopů může být v případě vážného výpadku chlazení příčinou tavení aktivní zóny reaktoru. Není rozdíl v tom, zda je narušení chladicího systému způsobeno nehodou nebo jeho úmyslným zničením.

Bezprostředně po odstavení reaktoru z plného výkonu činí zbytkový tepelný výkon téměř 7 % nominální hodnoty. U reaktoru s elektrickým výkonem 1 000 MW, a tedy asi 3 000 MW tepelného výkonu, odpovídá těchto 7 % produkci tepla 210 MW. Po jednom dni výkon klesne na přibližně 0,5 % nominální hodnoty, což stále ještě odpovídá značnému množství zbytkového tepla (15 MW), které je potřeba odvést. Dále se zbytkové teplo snižuje jen pomalu. Po deseti dnech činí přibližně 0,25 %. Proto i odstavený reaktor musí být i nadále nepřetržitě chlazený, aby se zabránilo přehřátí.

K dispozici musí být účinné chladicí systémy s kapacitou odvádět veškeré vzniklé zbytkové teplo. Takový chladicí systém má zpravidla tři prvky. Prvním je cirkulační systém, kterým se ohřátá voda čerpá z reaktorové nádoby do tepelného výměníku (který se může skládat z více jednotek) a ochlazená voda se čerpá zpět do systému reaktoru. Přes tepelný výměník se zbytkové teplo předává do druhého chladicího okruhu. Tento okruh je nutný k tomu, aby se v případě úniku vody z tepelného výměníku zabránilo přímému uvolňování radioaktivity do životního prostředí. Druhý chladicí okruh přenáší zbytkové teplo do druhého tepelného výměníku. Tam se absorbuje zbytkové teplo a toto absorbované teplo je odváděno do chladiče. Chladičem může být blízká velká vodní nádrž nebo chladicí věž. Schéma odvádění tepla je tedy následující:



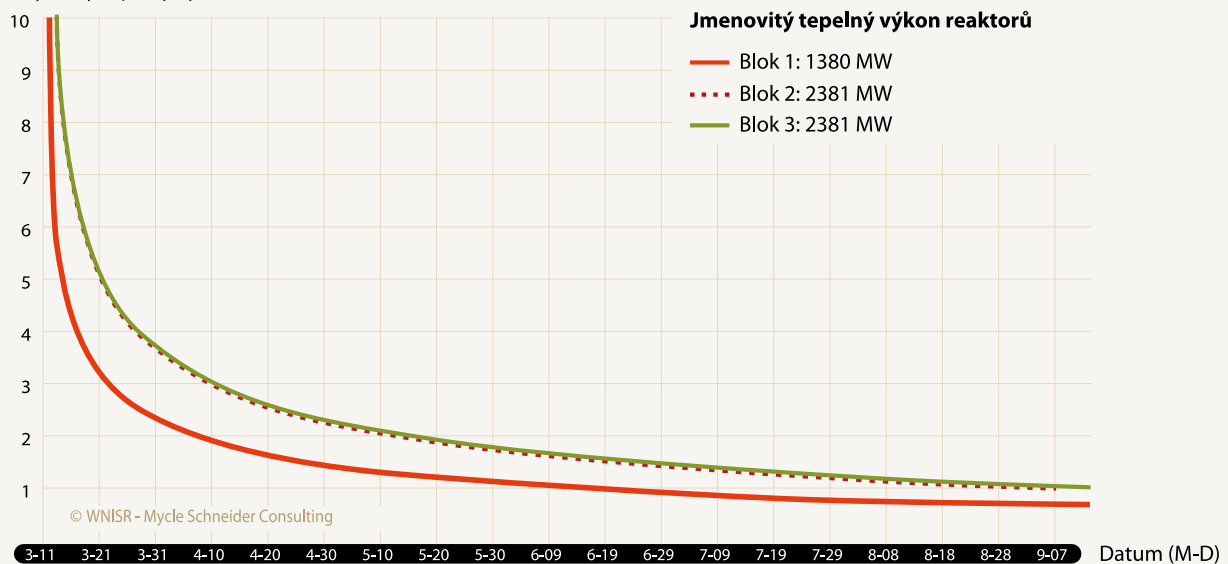
Pro každý z chladicích okruhů je nutné funkční oběhové čerpadlo – celkem tedy tři čerpadla. Pouze pokud jsou tyto chladicí systémy funkční a k dispozici s požadovaným výkonem, je možný úspěšný odvod zbytkového tepla. V opačném případě dojde k přehřátí aktivní zóny reaktoru.

Obrázek 8 – Průběh zbytkového tepelného výkonu na příkladu reaktorů havarované elektrárny Fukušima Daiiči v roce 2011

Zbytkový tepelný výkon u reaktorů elektrárny Fukušima Daiiči v roce 2011

Vývoj během půlročního období po zemětřesení 11. března 2011

Zbytkový tepelný výkon v MW



Zdroj: TEPCO, květen 2011 [64]

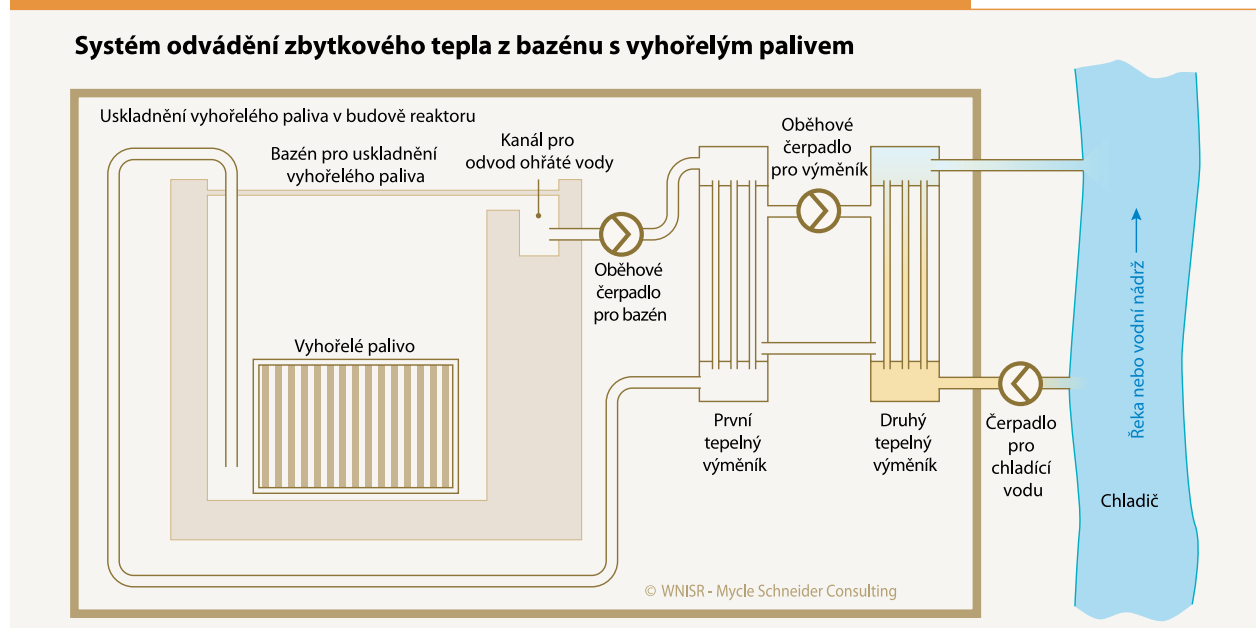
Obrázek 8 ukazuje produkci zbytkového tepla v průběhu času pro tři reaktorové bloky 1-3 v elektrárně Fukušima Daiiči za prvních šest měsíců po haváriích (od 11. března do září 2011). V prvních dnech zbytkové teplo rychle klesá. Poté však jeho produkce klesá jen zvolna. Produkce zbytkového tepla je také nižší u menšího reaktoru (blok 1, červená čára), než u větších reaktorů (bloky 2 a 3, zelená a tečkovaná čára).

Tyto tři křivky jsou reprezentativní, pro všechny jaderné reaktory vypadají podobně. Existují rozdíly ve výšce křivky, a to především v závislosti na výkonu. Další menší rozdíly závisí na vyhoření palivových článků (kvůli koncentraci intenzivně radioaktivních štěpných produktů) a na průběhu provozu bezprostředně před odstavením reaktoru. Základní tvar rozpadové křivky je však stejný, protože provoz všech energetických reaktorů vede k podobnému složení radioaktivních štěpných produktů, které uvolňují teplo. Liší se pouze jejich množstvím.

Vyhořelé palivové články se na konci své životnosti z reaktoru vyjmají a skladují se v bazénech naplněných vodou. Také voda v bazénech musí být nadále chlazená, aby se odstranilo zbytkové teplo, takže opět musí být k dispozici funkční chladicí systém.

Prvním článkem chladicího řetězce je cirkulační systém, který přečerpává ohřátou vodu ze skladovacího bazénu do tepelného výměníku. Přes tepelný výměník se zbytkové teplo přesouvá do druhého okruhu, který je přenáší do chladiče. Chladič může být v blízké velké vodní nádrži nebo chladičí věži. V mnoha mokřích skladovacích zařízeních se používá dodatečný chladicí okruh s dalším tepelným výměníkem, který je umístěn mezi oběma zmíněnými okruhy. Výsledkem je odvádění tepla podle obrázku 9. Pro každý chladicí okruh je nutné funkční oběhové čerpadlo. Pouze v případě, že celý tento chladicí systém funguje, je možné úspěšně odvádět zbytkové teplo.

Obrázek 9 – Bazén s vyhořelým palivem - systém odvádění zbytkového tepla

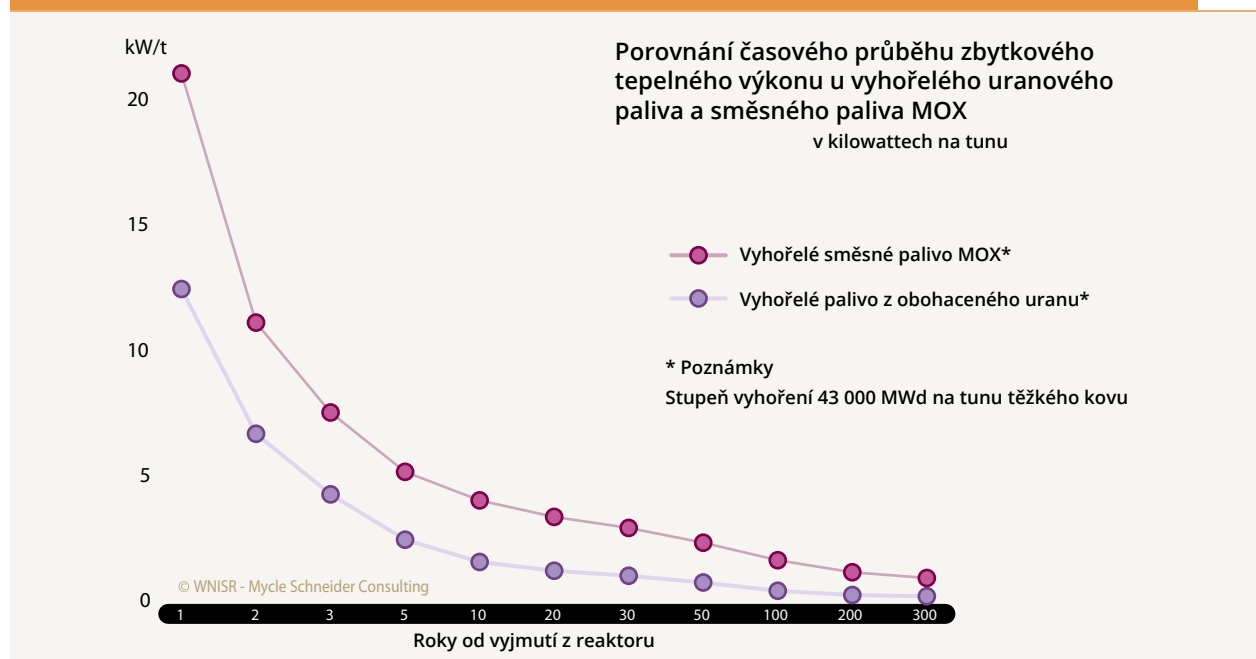


Zdroj: WNISR, 2022

Na obrázku 10 je uveden příklad odvodu zbytkového tepla z vyhořelých palivových článků v dlouhém období po vyjmutí z reaktoru. Hodnoty zbytkového tepla se vztahují na jednu tunu těžkého kovu, což je míra celkového množství uranu, plutonia, neptunia atd. v palivových článkách. Skladovací bazény obvykle obsahují několik set tun těžkého kovu, ty největší mají kapacitu až 10 000 tun těžkého kovu.

Z obrázku 10 je patrné, že pokles produkce zbytkového tepla probíhá velmi pomalu. Navíc množství zbytkového tepla narůstá se stupněm vyhoření palivových článků. Pro směsné palivo MOX (založené na směsi oxidu uranu a plutonia) jsou hodnoty zbytkového tepla výrazně vyšší. V případě společného skladování uranových článků a paliva MOX je třeba odvést součet zbytkového tepla jednotlivých palivových článků.

Obrázek 10 – Zbytkové teplo u vyhořelého paliva z obohaceného uranu a směsného paliva MOX



Zdroj: Jungmin Kang, 2022 [65]

Mnoho zemí, které provozují jaderné elektrárny, ponechává vyhořelé palivové články ve skladovacích bazénech po celá desetiletí. Nakonec se bazény zaplní a nejstarší (nejchladnější) články se musí odstranit, aby uvolnily místo pro nově vyjmuté vyhořelé palivo. Některé země provozují pro vyhořelé palivo centrální sklady. Po dostatečném snížení produkce zbytkového tepla lze rovněž palivové články skladovat v tzv. suchých skladovacích sudech. Z nich je zbývající zbytkové teplo odváděno do okolního vzduchu přes vnější povrch skladovacího kontejneru nebo sudu, které jsou optimalizované pro odvod tepla. Existují skladovací zařízení se sudy umístěnými na volném prostranství, v takovém případě se žádné speciální vedení vzduchu nevyžaduje. U jiných typů jsou sudy obklopeny betonovým stíněním, v tomto případě vzduch proudí v mezeře mezi nádobou a stíněním. Existují také typy skladovacích zařízení, kde jsou sudy umístěny v budově, která má velkoobjemový přívod vzduchu a výstupní otvory, které zaručují proudění okolního vzduchu.

Pouze některé země, které využívají jadernou energii, včetně USA a Německa, mají zavedena taková suchá úložiště ve větším měřítku. Přesun do suchých skladovacích sudů je možný asi po třech letech od vyjmutí palivových článků z reaktoru, ale často se provádí mnohem později.

Teplo musí být z palivových článků odvedeno, ať už jsou skladovány v mokřém, nebo suchém stavu, takže podmínky zobrazené na obrázku 10 platí pro obě tyto varianty. Jediný rozdíl je v tom, že při skladování v suchém prostředí není zapotřebí funkční chladicí systém; místo toho se zbytkové teplo pasivně uvolňuje přímo do okolního vzduchu, který se pohybuje pasivní konvekcí (tj. ohřátý vzduch stoupá).

Jaderné elektrárny a skladování vyhořelého paliva za války

Dodávky energií během války

Jaderné elektrárny významně přispívají k zásobování elektrickou energií v řadě zemí světa – v osmi zemích vyráběly v roce 2021 více než třetinu elektřiny [66]. Napadené země jsou závislé na pokračujících dodávkách elektřiny, které vyžadují jak přenosovou soustavu, tak elektrárny pro dodávky elektřiny. Pokud země vyrábí významný podíl elektřiny v jaderných elektrárnách, musí významná část těchto zdrojů pokračovat v provozu. Preventivní odstavení velké části z nich je prakticky nemožné bez toho, aniž by došlo k výraznému omezení dodávek elektřiny v zemi.

Útočící strana má v krátkodobém horizontu zájem na přerušení dodávek energie napadené země, aby oslabil protivníka. V dlouhodobějším horizontu musí však okupant rovněž zajistit, aby dodávky energie na okupovaném území fungovaly, a to jak pro obnovení výroby, tak pro zajištění funkce základní infrastruktury a zásobování. Narušení infrastruktury a dodávek energií hrálo v minulých válkách významnou roli, stejně jako nutnost obnovení dodávek energií.

Jaderné elektrárny jako velká zařízení na výrobu elektřiny proto mají strategickou roli. V některých zemích, včetně Ukrajiny, jsou stavěny v elektrárenských komplexech, z nichž v každém se nachází několik reaktorů. Před ruskou invazí byla více než polovina elektřiny na Ukrajině vyrobena ve čtyřech jaderných elektrárnách, přičemž v každé z nich se nachází dva až šest reaktorů (Ukrajina provozuje celkem 15 reaktorů). Každá lokalita tak představuje významný podíl ukrajinské infrastruktury pro výrobu elektřiny.

Možná úloha jaderných elektráren v souvislosti s jadernými zbraněmi

Dalším válečným aspektem je potenciální role jaderných elektráren v souvislosti s možným vojenským využitím materiálu z energetického palivového cyklu pro jaderné zbraně. Za jaderný materiál použitelný pro zbraně je obecně považován buď vysoce obohacený uran (s koncentrací nejméně 90 % štěpného izotopu U 235), nebo plutonium v jakémkoli izotopovém složení [67].

Vyhořelé uranové palivo vždy obsahuje značné množství plutonia, které vzniká zachytem neutronu v jádře uranu. Obvinění, že protivník chce využít jaderná zařízení k tomu, aby vyrobil plutonium pro zbrojní účely, je dnes běžným argumentem, který se v různé míře intenzity používá i během konfliktů. Takové diskuse obvykle podceňují důležitou roli technologií, vybavení, technických dovedností, vědeckých poznatků a znalostí a civilního „krytí“ potřebného k zamaskování vojenských aktivit. Zde se zaměříme na vojensky využitelné jaderné materiály.

Z čistě technického hlediska lze problém popsat následovně:

Běžné typy reaktorů pracují s přírodním nebo nízko obohaceným uranem a vytvářejí plutonium v průběhu řetězové štěpné reakce. Proto vyhořelé, a dokonce i jen částečně vyhořelé palivové články vždy obsahují určitý podíl plutonia. Po vyjmutí z reaktoru může být z palivových článků separováno plutonium. Vysoce obohacený uran není součástí palivových článků běžných jaderných reaktorů [68], ale používá se v různých malých výzkumných reaktorech [69].

Plutonium vyrobené v jaderných reaktorech může být separováno v závodech na přepracování vyhořelého paliva, což jsou komplexní technická zařízení. Několik zemí má taková zařízení v pilotní nebo komerční fázi. Separace plutonia v menších množstvích, která postačují pro výrobu jednotlivých jaderných náloží, je také možná v jaderné laboratoři s možností dálkové manipulace.

Sklady vyhořelého jaderného paliva nevyhnutelně obsahují velké množství plutonia, které je ovšem pro využití k výrobě jaderných náloží třeba separovat.

Podrobnou studii o této problematice, které se zde věnujeme jen stručně, provedl fyzik a bývalý komisař Komise pro jaderný dozor USA (Nuclear Regulatory Commission) Victor Gilinsky [70].

Z vojenského pohledu může být důvodem pro útok na jaderný reaktor záměr eliminovat potenciál nepřítele k výrobě separovaného plutonia pro jaderné zbraně, a to buď zničením, vyražením z provozu nebo zabením jaderných elektráren, výzkumných reaktorů a skladů vyhořelého paliva – bez ohledu na to, zda se nepřítel zabývá vývojem jaderného arzenálu, nebo ne. Ve válkách v Iráku a Sýrii vedly tyto úvahy k ničivým útokům na jaderné reaktory v těchto zemích.

Získání radioaktivních látek potřebných k výrobě „špinavých bomb“ představuje další možný motiv, ale tím se zde podrobněji nebudeme zabývat. Účelem takové bomby je rozšíření radioaktivních látek na velkém území pomocí konvenční nálože, aniž by došlo k jadernému výbuchu. Pro „špinavou bombu“ jsou v zásadě vhodné všechny radioaktivní látky, včetně těch, které pocházejí z jaderných elektráren nebo skladů vyhořelého paliva.

Strach z nehody jako nástroj politického nátlaku

Jaderné elektrárny mohou po závažné havárii uvolnit velké množství radioaktivních látek, což může vést k rozsáhlé kontaminaci půdy. To se ukázalo v případě havárií v Černobyli a ve Fukušimě.

Válečné poškození jaderné elektrárny by vedlo k podobným důsledkům. Útočící strana by jej mohla provést záměrně, aby způsobila značnou kontaminaci životního prostředí a ekonomické škody v zemi protivníka.

Ve válečných situacích se tím může vytvořit i potenciál k vydírání. Jedna strana vyhrožuje zničením jaderných elektráren a může vyvíjet nátlak na druhou stranu, která má přirozený zájem na ochraně svého obyvatelstva a zachování nekontaminované půdy. V těchto případech si lze představit rozmanité konstelace zájmů a aktérů.

Důvody pro vojenské akce v oblastech jaderných elektráren

Jednoduchým přístupem by mohlo být prohlášení, že se během války nesmí provádět žádná vojenská akce, která by mohla ohrozit bezpečnost jaderných elektráren, jejich infrastruktury, personálu nebo jejich okolí. Ve skutečnosti jde však jen o zbožné přání.

Okupace oblasti

Pokud chce útočník získat kontrolu nad danou oblastí, nemůže v ní tolerovat žádné výjimky. Je tomu tak proto, že napadená strana by zde mohla shromáždit lidi a vybavení a zahájit odtud protiútok.

Stejně tak, pokud napadená strana znovu dobyje své území zpět, nemůže na tomto znovudobytém území ponechat žádné oblasti v držení útočníka.

Z tohoto základního principu nelze vyjmout místa jaderných elektráren nebo místa s jinými jadernými zařízeními. To je pravděpodobně také jeden z hlavních důvodů, proč ruské vojenské síly v počáteční fázi války na Ukrajině obsadily černobylskou lokalitu.

Přerušení dodávek elektrické energie

Z hlediska vojenské logiky může snadno nastat situace, kdy by mělo smysl vyřadit protivníkovy zdroje elektrické energie, aby došlo k jeho oslabení. V případě déletrvající válečné situace toto hledisko nabývá na významu, stejně jako roste důležitost narušení, nebo dokonce zničení nepřítelovy schopnosti regenerovat své zdroje. To může ospravedlnit masivní útok na zařízení jaderné elektrárny, ale také zničení nadzemního přenosového vedení, které dodává energii do elektrárny a zároveň zajišťuje vyvedení vyrobené elektřiny do sítě. To by mohlo způsobit roztavení reaktorů, pokud by záložní generátory na místě selhaly nebo jim došlo palivo. Chladicí systémy pro odvádění zbytkového tepla z odstavených reaktorů by v tomto případě neměly dostatek elektřiny k provozu.

Ve válečné situaci, kdy útočník předpokládá, že bude schopen snadno a rychle ovládnout cílové oblasti, tento aspekt pravděpodobně nehraje významnou roli, protože cílem je převzetí kontroly nad infrastrukturně neporušeným územím.

Lze však uvažovat o vypnutí elektrárny jako zdroje elektřiny na omezenou dobu a její opětovné uvedení do provozu později, a to dočasným vyřazením důležitých prvků z provozu, například transformátorů elektrárny nebo souvisejících rozvodů. Rozvodny a elektrické vedení lze dočasně odstavit, aniž by došlo k jejich zničení.

Proč je obtížné vyloučit jaderná zařízení z války

Jak bylo ukázáno výše, ve válečných situacích existuje zdůvodnění, proč se vojenská akce považuje za nezbytnou. Podle mezinárodních smluv by jaderná zařízení v zásadě neměla být napadena [71]. Tyto komplexní smlouvy však obsahují i možnosti odůvodněných výjimek, např. v případě, že lze útoky zahájit z jaderného zařízení. Ve skutečnosti lze předpokládat, že vojenské akce se v případě války uskuteční i přímo na místě jaderných zařízení.

Kromě toho se některá infrastruktura nezbytná pro jadernou bezpečnost nachází mimo elektrárnu: od nadzemního elektrického vedení přes obydlí zaměstnanců a zaměstnankyň a jejich rodin až po dodavatele potřebných materiálů. Pokud se jejich území stane předmětem válečného konfliktu, bude to přímo ohrožovat i bezpečnost jaderné elektrárny.

Záměrné a nezáměrné útoky na jadernou bezpečnost

Vojenské plánování obou stran může cíleně počítat s obsazením nebo znovudobytím jaderné elektrárny. Mohou existovat i konkrétní plány na přerušování výroby energie.

Nelze vyloučit, zejména po dlouhotrvající válce, že jaderná elektrárna bude také zničena ve smyslu „spálené země“, ať už útočníkem při ústupu, zoufalým obráncem, nebo odříznutými vojáky.

Mohou však nastat i přímé dopady na jadernou bezpečnost, které nemusely být prvoplánově vojensky zamýšlené.

- Použité zbraně jsou přesné jen v omezené míře a procentu. K zničení příslušných součástí elektrárny, nebo dokonce budovy reaktoru či bazénu s vyhořelým palivem proto může být dojit i neúmyslně.
- Během bojové akce se může ukázat jako vojensky nezbytné naříditi masivní použití zbraní proti nepříteli v určitém směru. Vedlejší škody způsobené zničením zařízení důležitých z hlediska bezpečnosti a ochrany obyvatel nejsou v takovém případě v centru pozornosti bojujících stran.
- Nelze předpokládat, že vojáci mají hluboké znalosti o bezpečnostním významu jednotlivých částí jaderné elektrárny. I kdyby operační velení takové znalosti mělo, bylo by nesmírně obtížné nebo nemožné je převést do podoby prakticky účinných operačních instrukcí. Vojáci proto obvykle nejsou schopni posoudit vedlejší účinky svých bojových akcí.
- Stěží lze předpokládat, že v bojové situaci, kdy jde o život, jsou zúčastněné osoby schopny provádět jemné kalkulace o významu svých činů pro bezpečnost jaderných elektráren.

- Může se také stát, že vojenské jednotky záměrně využívají areál elektrárny jako štít proti útokům. Očekávají pak, že nepřítel upustí od útoků na jejich pozice, protože nechce způsobit škody na jaderných zařízeních. Tímto způsobem má být vytvořena nedobytná pevnost.

Specifická místa zranitelnosti jaderných elektráren

Jaderné elektrárny jsou složitá průmyslová zařízení. Jejich bezpečný provoz závisí na stabilním prostředí, jako je tomu obvykle v době míru, kdy převládají běžné politické a ekonomické podmínky. Provoz jaderných elektráren klade značné nároky na stabilní infrastrukturu.

Dosavadní výzkum bezpečnosti jaderných elektráren bral tyto stabilní podmínky za samozřejmé. Nicméně odhady bezpečnostních rizik ve válečných situacích lze vyvodit z existujících studií o haváriích v době míru. Je tomu tak proto, že výsledek selhání systému v jaderné elektrárně je stejný bez ohledu na to, zda je vyvolán náhodou, nebo válečnými vlivy.

Na rozdíl od všech ostatních typů technologií výroby elektřiny se jaderné elektrárny spoléhají na trvale fungující chlazení, a to i v době, kdy jsou odstaveny. Během provozu a přímo po odstavení jsou požadavky na chlazení obzvláště vysoké a důsledky jeho selhání závažné.

Přímá destrukce

Přímá palba (útok vojenskou municí) může být záměrná s cílem zničit reaktor nebo nezbytné bezpečnostní zařízení, případně může zasáhnout části a systémy důležité pro bezpečnost „náhodně“ v průběhu války.

Samotný reaktor a některé důležité bezpečnostní systémy se nacházejí přímo v reaktorové budově. Konstrukce budovy se značně liší v závislosti na národních předpisech a typu reaktoru. Některé typy konstrukce reaktorů fungují jen s mírně větší bezpečnostní ochranou, než která je běžná v jiných průmyslových zařízeních s rizikovým potenciálem. To platí pro mnoho starších reaktorů. Některé reaktory jsou konstruovány na odolnost proti nárazu letadel, ale často vydrží pouze náraz malého a pomalu letícího letadla. Skutečně opevněné budovy reaktorů se nacházejí pouze na několika málo lokalitách na světě.

Kromě toho se mnoho důležitých bezpečnostních systémů nenachází v budově reaktoru, ale v jiných budovách v areálu elektrárny. Tyto budovy jsou obvykle konstruovány jako ostatní průmyslové objekty. Pouze v několika málo jaderných elektrárnách ve světě jsou některé z těchto budov také bunkrové konstrukce pro zvláštní ochranu před vnějšími vlivy. K takovým důležitým bezpečnostním systémům umístěným mimo budovu reaktoru patří části chladicího systému, transformátory, diesellové generátory pro nouzové napájení (a palivo pro ně), rozvaděče a řídicí místnost.

Ve válečných podmínkách jsou zbraně speciálně navrženy tak, aby ničily stavební konstrukce a byly schopny mnohem většího zásahu do konstrukcí budovy reaktoru, než dokáže náraz letadla. Za války je také možné, že několik projektilů může zasáhnout reaktorové budovy postupně, což by zvýšilo celkové škody. To platí v každém případě pro úmyslné bombardování, ale nelze to vyloučit ani v případě „náhodného“ ostřelování. Je nutné předpokládat, že stávající systémy pro zadržování radioaktivních látek by mohly být vojenským útokem zničeny a v případě vážné nehody nebudou plnit funkci. To se týká zejména ochranné obálky (kontejnmentu) reaktoru, která není navržena tak, aby odolala mimořádným účinkům moderních zbraní.

Výbušniny nebo vojenské střely mohou zničit chladicí potrubí reaktoru (a v extrémních případech i samotnou tlakovou nádobu reaktoru) v takovém rozsahu, že dojde ke ztrátě velkého množství chladicí vody. Poté již není možné zajistit chlazení reaktoru a rychlý ohřev aktivní zóny reaktoru je nevyhnutelný. Instalované systémy havarijního chlazení nejsou dimenzovány na všechny možné případy, kdy dojde ke ztrátě chladicí vody. Kromě toho je třeba předpokládat, že samotné havarijní systémy nouzového chlazení a jejich zásoby chladicí vody by mohly být rovněž vážně poškozeny při útoku, a proto by nemusely fungovat.

Některé konstrukce vně budovy reaktoru jsou rovněž nezbytné pro chlazení a řízení reaktoru. Mezi ně například patří:

- **Ovládání** bezpečnostních systémů reaktoru. Jak řídicí místnost, tak související elektrické rozvodny jsou umístěny odděleně od budovy reaktoru a jsou stavebně srovnatelné s kancelářskými nebo lehkými průmyslovými budovami.

- **Hlavní parní potrubí** tlakovodních reaktorů. V mnoha konstrukčních provedeních jsou částečně vedena mimo budovu reaktoru, a jsou proto obzvláště zranitelná.
- **Napájení** potřebné pro bezpečnostní systémy (viz níže).
- Další systémy v **chladicích systémech** pro odvod tepla (viz níže).

Konstrukce všech těchto systémů – vyvinutých výhradně pro mírové podmínky – předpokládá pouze jedinou havarijní událost. Předpokládá se také, že k této události dojde jen na jednom místě a že paralelní systémy (redundance) nebudou ovlivněny. Při této jednorázové destruktivní události se dále předpokládá, že personál a zbývající systémy jsou plně schopné plnit své úkoly a omezovat následky. U těchto podmínek, které jsou základem standardních bezpečnostních analýz, není pravděpodobné, že by byly splněny ve válečných situacích.

Dodávka energií

Nejdůležitějším požadavkem dodávky elektřiny je stabilní připojení k elektrické síti. To je obvykle nutné pro odběr vyrobené elektřiny, ale když je reaktor odstaven, je místo toho nutné přivádět elektřinu potřebnou pro další bezpečné chlazení.

Chlazení aktivní zóny odstaveného reaktoru vyžaduje velká provozuschopná čerpadla. Z konstrukčního hlediska musí být potřebná elektřina během provozu vyráběna samotnou jadernou elektrárnou, ale při odstavení reaktoru je nutné elektřinu do elektrárny přivádět z elektrické sítě. Pokud elektřina vyrobená v elektrárně z důvodu poškození rozvodny nebo přenosové sítě nemůže být dodána do sítě, snaží se provozovatel omezit výkon reaktoru na krytí vlastní spotřeby, což je režim, kterému se říká „ostrovní provoz“. To se může, ale nemusí podařit.

Výkon jaderné elektrárny pro vlastní spotřebu je minimálně několik desítek MW a může se vyšplhat až na cca 100 MW. Tento výkon pokrývá především spotřebu velkých čerpadel: hlavní oběhová čerpadla a hlavní čerpadla chladicí vody pracují nepřetržitě.

Pokud se přechod do ostrovního provozu nepodaří, dojde k odstavení reaktoru, který je pak závislý na jiném spolehlivém zdroji energie. Není-li k dispozici elektrická síť, všechna čerpadla v chladicím řetězci musí být zásobována elektrickou energií z nouzových diesellových generátorů. Tyto generátory mají omezený výkon v rozsahu několika MW a nejsou navrženy a testovány pro dlouhodobý nepřetržitý provoz. Mají také začnou míru poruchovosti a další podmínky provozu popsané níže.

Pokud dojde k přerušení vedení nebo zničení elektrické sítě v důsledku války, reaktor nelze znovu spustit, dokud se nepodaří obnovit stabilní dodávku elektřiny ze sítě do jaderné elektrárny. Je tomu tak proto, že k opětovnému spuštění reaktoru je nezbytné zajistit externí dodávku elektřiny pro pohon hlavních oběhových čerpadel a čerpadel všech chladicích okruhů.

Poněkud jiná situace nastává v lokalitách s několika reaktory. V tomto případě by reaktor, který je stále v provozu, mohl dodávat elektřinu i sousedním reaktorům pro chlazení a opětovné spuštění. Tato možnost však již není možná ve chvíli, kdy je i poslední reaktor v lokalitě odstaven. Předpokládá se také, že personál i technické vybavení může normálně fungovat. Poškození jednoho reaktoru ovšem může donutit provozovatele k útěku, takže nemohou udržovat ostatní reaktory v bezpečném stavu.

Všechna zařízení pro řízení elektrárny jsou závislá na spolehlivé dodávce elektřiny. Aby bylo možné ovládat zařízení bezpečně, je zapotřebí mít zajištěnou dodávku elektřiny, a to z vlastní výroby zařízení, z elektrické sítě nebo ze systémů nouzového napájení. To platí i pro osvětlení místností, v nichž často nejsou okna, a pro komunikaci s vnějším světem.

Přerušení dodávek elektřiny v důsledku válečných operací znamená ztrátu schopnosti chlazení aktivních zón reaktoru a ztrátu řízení. Je nepravděpodobné, že by vojáci či snad jejich velitelé rozuměli těmto bezpečnostním požadavkům.

Přívod chladicí vody

Pro odvod zbytkového tepla je nezbytný vedle funkčního zdroje elektřiny pro pohon čerpadel také stálý přísun chladicí vody. Chlazení může zajistit jen velká zásoba vody, například v případě využití přehradní nádrže nesmí dojít k jejímu zničení nebo k ucpaní vstupních potrubí (ve válečné situaci je třeba brát v úvahu

riziko zanesení vodních nádrží troskami stavebních konstrukcí). Konstrukce chladicích systémů je specifická pro dané místo a areál elektrárny. Většina jaderných elektráren je v blízkosti řeky nebo mořského pobřeží. Jiné jsou napojeny potrubím na vzdálenější větší vodní plochu. Ztráta chladicí vody v důsledku přerušení potrubí, poruchy čerpadla apod. znamená ztrátu chladicího výkonu.

Reaktory potřebují nejen své běžné chladicí systémy pro normální provoz, ale také nouzové chladicí systémy aktivní zóny a systémy pro odvod zbytkového tepla. Jejich kapacita je odpovídajícím způsobem menší, takže mohou být napájeny z nouzových systémů. Chladicí řetězec pro havarijní chlazení nebo pro odvod zbytkového tepla však musí být za všech okolností neporušený a musí mít možnost dosáhnout vychlazení vody například ve vodní nádrži. Zničení potrubí nebo jiná ztráta vody v některém článku chladicího řetězce v důsledku vojenské akce odstraní schopnost odvádět zbytkové teplo.

Další důležitá infrastruktura

Jak bylo popsáno výše, významným bezpečnostním prvkem je řada nouzových dieselových generátorů pro výrobu elektřiny na pohon čerpadel. Ty pro svůj nepřetržitý provoz potřebují palivo. Obvyklá zásoba paliva v areálu elektrárny umožňuje pokračovat v provozu po dobu několika dní, protože bezpečnostní analýzy vždy předpokládají nepřetržitou dodávku paliva z okolí. V době války to však může být obtížné nebo nemožné a velitelé mohou upřednostnit zásobování vlastních vozidel a zbraňových systémů. Přerušení provozu nouzových generátorů by vedlo ke ztrátě odvodu zbytkového tepla. Podobná situace je i u dalších provozních zásob, například maziv.

K bezpečnému fungování, i když je elektrárna odstavena, patří volný přístup k areálu po silnici. To je nezbytné pro střídání provozního personálu, který obvykle pracuje ve třech denních směnách a který musí být odpočatý, zdravý, klidný a bdělý, aby mohl bezpečně vykonávat soustředěnou práci. Silniční přístup je také nutný pro dodávky provozních materiálů a náhradních dílů a pro přístup externích pracovníků potřebných pro kontrolu a údržbu zařízení. V případě války může být volný přístup přerušeno. Je přitom třeba brát v úvahu, že dopravní spojení pro personál nebo přepravu náhradních dílů musí být udržováno i na delší vzdálenost.

Další relevantní infrastrukturou jsou externí hasičské sbory. Jaderné elektrárny mají zpravidla menší závodní hasičský sbor, který je v případě větších požárů doplněn hasičskými sbory z okolí. V případě války vyvstává otázka, zda tyto hasičské sbory mají přístup do areálu a zda jsou vůbec připraveny na zásah, nebo jsou vázány jinými hasičskými pracemi.

Pokud válka způsobí únik radiace, není jisté, zda plánovaná havarijní opatření (pro mírovou havárii) mohou být vůbec zahájena a provedena, neboť se opírají o rozsáhlou neporušenou infrastrukturu, mnoho zúčastněných sil a ochotné a kvalifikované pracovníky v dobré psychické a fyzické kondici.

Kvalifikovaný provozní personál

K obsluze a monitorování systémů je zapotřebí speciálně vyškolený personál, který musí rovněž znát všechny konstrukční detaily a aktuální podmínky v konkrétním zařízení.

Obzvláště důležitou roli hrají operátoři reaktoru, kteří mají na starosti řídicí místnost reaktoru. Jejich úkoly mohou být vykonávány pouze po mnohaletém školení a schválení pro konkrétní elektrárny. To také znamená, že útočící strana nemůže jednoduše přivést vlastní personál a provozovat tak elektrárnu sama. To platí i pro personál se zkušenostmi z podobné elektrárny, dokonce i v případě, že obě elektrárny byly postaveny toutéž firmou.

V mírových podmínkách funguje rotace personálu a odpočinek mezi směnami obvykle bez problémů, jak předpokládají všechny standardní bezpečnostní analýzy.

Ve válečné situaci se některé podmínky výrazně mění:

- Není jasné, zda personál může na konci směny opustit zařízení. Důvodem může být jak nebezpečí, které představují válečné akce na cestě domů, tak donucení vyvíjené silami útočníka. (Nátlakové situace byly hlášeny jak z černobylské, tak ze záporožské elektrárny).
- Totéž platí i pro příjezd střídající směny.

- To může vést k situacím, kdy je personál nucen zůstat na místě mnohem déle, než bylo zamýšleno. To dále zvyšuje stres způsobený situací ohrožení, obavami o rodinu a přátele, delší pracovní dobou, únavou nebo nedostatečným uspokojením životních potřeb.
- V závodě již nemusí být k dispozici dostatečný počet specialistů s potřebnými dovednostmi.
- Když útočící strana přebírá velení a prosazuje ho prostřednictvím výhrůžek, bezpečnostní protokoly snadno ustupují do pozadí, protože primárním zájmem je přežítí podřízených a případné udržení výroby energie za každou cenu.
- U násilně zadržného personálu je vysoce pravděpodobné, že bude zbaven svých zařízení mobilní komunikace; útočník chce zamezit nebo alespoň oddálit přísun informací k nepřátelské straně. Operátoři proto nemohou sdělit svůj stav nebo potřeby ani získat odborné rady.
- To také znamená, že jednotliví, pravděpodobně traumatizovaní členové personálu nejsou schopni komunikovat se svými rodinami a přáteli. Nejistota ohledně osudu jejich rodin, přátel a komunity, kteří se pravděpodobně také nacházejí ve válečné zóně, vyvolává další stres.

Tyto mezní podmínky vytvářejí vyšší náchylnost k chybám nebo opomenutím obsluhy.

Po určité době trvání válečné situace se u personálu jistě objeví nutnost řešit otázky loajality.

Na jedné straně otázka poslušnosti vůči okupantovi, na druhé straně loajalita k vlastní zemi, ale také ke kolegům, k zachování jaderné bezpečnosti a vůči svým rodinám a jejich bezpečnosti. Tyto potenciálně protichůdné priority mohou zaměstnance přivést k velmi rozdílným rozhodnutím.

První otázkou je, zda zaměstnanec vůbec ještě přijde do služby, nebo zda jeho motivy zůstat mimo elektrárnu (útěk, vlastní ochrana před válečnými událostmi, ochrana rodiny...) převáží.

Další otázka zní, jak se zaměstnanec chová na místě – na příkaz okupanta, nebo ve skryté snaze podkopat úsilí okupanta? A kam až může zajít?

Svou roli hraje i záměr útočníků. Hodlají se objektu zmocnit natrvalo, protože se nachází na jejich budoucím území, a chtějí tím pádem získat personál pro sebe? Nebo chtějí spíše nechat situaci zhoršit, či dokonce zařízení zničit, aby uškodili napadené straně? Nebo snad obojí?

Údržba

Jaderná elektrárna vyžaduje k bezpečnému fungování pravidelnou údržbu a výměnu opotřebovávaných dílů. Za každodenní údržbu je z velké části zodpovědný stálý tým jaderné elektrárny, stejně jako za opakované kontroly všech systémů důležitých pro bezpečnost. Pokud je tým pod neustálým stresem, jak je popsáno výše, mohou být některé z těchto prací zapomenuty, zkráceny nebo vynechány. Kromě toho kvalita této pečlivé a vysoce kvalifikované práce téměř nevyhnutelně klesá v důsledku stresu a únavy. Účinky se projeví především ve střednědobém horizontu, neboť se neustále snižuje technicko-bezpečnostní stav zařízení. Čím déle bude válka trvat, tím silnější budou tyto účinky.

Další problémy vznikají v oblasti údržby:

- Náhradní díly musí být dodávány na místo. To vyžaduje funkční objednávku, platbu a přepravní řetězec. Náhradní díly také musí být ze strany dodavatele k dispozici.
- Náhradní díly jsou částečně získávány od zahraničních dodavatelů. Zde záleží na tom, zda je dodavatel vůbec ochoten dodávat do jaderné elektrárny ve válečné zóně a do jaké míry je mu v dodávkách bráněno například kvůli sankcím.
- Hlavní údržbářské práce se provádějí během ročních odstávek. Ty jsou obvykle ve značném rozsahu prováděny subdodavateli. Tyto společnosti by musely být připraveny přijet do jaderné elektrárny, která se nachází ve válečné zóně; v opačném případě by tyto práce musely být zrušeny.
- Některé úkony údržby vyžadují specialisty mimo elektrárnu. Zejména v zemích s menší jadernou infrastrukturou to často znamená personál z jiné země. To vyvolává otázku, zda takový personál může být a bude vyslán do postižené elektrárny v případě války. Taková omezení by pravděpodobně znamenala, že některé údržbářské práce by již nebyly možné.

Inspekce

Dalším nástrojem udržování bezpečnosti jaderných elektráren jsou inspekce. Jsou prováděny buď státním dozorem, a/nebo pověřenými třetími stranami. Na to však musí mít tyto externí osoby nejprve přístup do areálu elektrárny. Válečná situace v mnoha ohledech může představovat překážku.

Jako představitelé nepřátelské státní moci nebudou pracovníci státní dozoru vpuštěni do jaderné elektrárny obsazené protivníkem. To se pravděpodobně bude týkat i třetích stran, pokud i v předválečné době nepocházely ze země agresora. Může se také stát, že toto omezení se bude vztahovat i na vnější orgány, jako je Mezinárodní agentura pro atomovou energii (International Atomic Energy Agency, IAEA).

Dozor založený na inspekcích a kontrole je tedy nástrojem pro udržení bezpečnostních standardů, který nelze použít ve válečných situacích.

Závěr o zranitelnostech jaderných elektráren

Jaderné elektrárny jsou ve válečných situacích bezprostředně zranitelné. To je přímo způsobeno konstantní a permanentní potřebou chlazení. Rozsáhlé výpadky elektrické energie potřebné k pohonu čerpadel nebo zničení chladicích systémů by vedly k přehřátí aktivní zóny reaktoru.

S rostoucí dobou trvání válečné situace se zvyšuje specifická zátěž personálu a komplikace s prováděním údržby zhoršují provozní podmínky, což rovněž zvyšuje pravděpodobnost vzniku vážných nehod.

Specifická zranitelnost skladů vyhořelého paliva

Vyhořelé palivové články se z reaktoru zpravidla vyjímají během každoročního (nebo o něco méně častého) doplňování paliva. Vzhledem k teplu uvolňovanému při rozpadu radioaktivních izotopů musí zůstat nepřetržitě chlazeny. V zásadě se tak děje buď v mokřém, nebo suchém skladu.

Mokrý skladovací zařízení jsou vodou naplněné skladovací bazény, z nichž se teplo odvádí prostřednictvím chladicího systému do chladiče (obvykle vnější vodní nádrže) nepřetržitou cirkulací vody. Takovéto mokré sklady se nacházejí ve všech jaderných elektrárnách, a to buď v budově reaktoru, nebo v jeho bezprostřední blízkosti v samostatné budově. Palivové články, které byly vyjmuty z reaktoru, jsou vždy nejprve uloženy v bazénu pro vychlazení. Vzhledem k mnoha radioizotopům s krátkým poločasem rozpadu tyto nedávno vyjmuté palivové soubory uvolňují zdaleka nejvíce tepla ze všech palivových souborů mimo samotnou nádobu reaktoru.

V některých případech několik reaktorů sdílí společné mokré skladovací zařízení, které obvykle obsahuje výrazně více radioaktivních látek než bazén jednoho reaktoru.

Suché sklady jsou místa, kde jsou umístěny kontejnery s vyhořelými palivovými články. Vyhořelé palivové články lze do těchto skladovacích sudů přemístit až po uplynutí několika let. V některých typech jsou kontejnery umístěné pod širým nebem, v jiných jsou ve skladovacích halách – od relativně lehkých budov až po masivní stavby.

Chlazení v suchých skladech je zajištěno odvodem tepla ze skladovacího kontejneru do okolního vzduchu („pasivní chlazení“). Suché skladovací budovy proto musí být navrženy tak, aby umožňovaly nerušené proudění okolního vzduchu. Poškození jednoho kontejneru by nemělo obvykle poškodit ostatní, ale může je znepřístupnit kvůli radioaktivní kontaminaci.

Přímé zničení

Přímý požár skladu vyhořelého paliva může být způsoben úmyslně vojenským útokem nebo může být vyvolán „náhodným zásahem“ v průběhu válečných operací.

Zařízení mokřých skladů mají betonový bazén obklopený budovou. Pokud je mokřý sklad umístěn v budově reaktoru, je stupeň ochrany proti bombardování podobný jako u samotného reaktoru, avšak bez ochrany vlastní ocelové nádoby reaktoru. Je třeba rovněž poznamenat, že úroveň ochrany jednotlivých budov reaktoru proti silným vnějším vlivům se značně liší. Stejně tak se liší úroveň ochrany mokrého skladování v samostatných budovách.

V případě mokrého skladování hrozí za války následující rizika:

- Jedno ze zařízení v chladicím řetězci by mohlo být zničeno, takže by již nemohlo být odváděno teplo. Chladicí voda by se postupně odpařovala. V závislosti na množství a stáří paliva obvykle jeho odkrytí trvá dny nebo týdny.
- Samotný skladovací bazén může být zničen. V tomto případě by palivové články zůstaly v neuspořádané hromadě a voda z bazénu by unikla. Palivové články by se bez chlazení pravděpodobně samy vznítily a uvolnily by velmi velkou část svého radioaktivního obsahu.

V případě suchých skladů vzniká přímé nebezpečí v důsledku masivního bombardování, které zničí některé kontejnery. Síla potřebná k proniknutí do kontejneru nebo k vytvoření velkého poškození závisí na konstrukci kontejneru, včetně jeho materiálů, geometrie a tloušťky stěn. Testy ukazují, že v zásadě lze masivní skladovací kontejner prorazit pomocí moderních zbraní, jako jsou například přenosné protitankové střely, které jsou navrženy tak, aby prorazily metr pancéřového plátu. Palivo uvnitř by však muselo být zapáleno, aby došlo k většímu úniku radioaktivity.

Pokud má suchý sklad další stavební konstrukce (stěny haly, stínění apod.), mohou posloužit k určitému zeslabení nárazu, pokud leží v dráze střely vystřelené zvenčí.

Napájení a přívod chladicí vody

Oba typy skladů vyhořelého paliva jsou kvůli monitoringu závislé na dodávkách elektrické energie. V obou případech však platí, že trvá delší dobu, než mají poruchy systému významný vliv na bezpečnost.

Chladicí systém mokrých skladů závisí na elektřině, která může pocházet z rozvodné sítě, ze samotné jaderné elektrárny nebo z nouzového generátoru. Možnosti selhání dodávky elektřiny v době války jsou podobné těm, které byly popsány výše u chlazení reaktorů.

Objem vody v bazénu a nižší produkce zbytkového tepla však v porovnání s aktivní zónou reaktoru vedou k podstatně delší době od výpadku chlazení do vzniku problému. Ta je nejkratší v mokřém skladu, do kterého jsou uloženy velmi horké palivové články čerstvě vyjmuté z reaktoru. Pokud jsou skladovány pouze palivové články staré několik desítek let, vydrží v bazénu i v případě výpadku chlazení řádově jednotky měsíců. Problémem ovšem zůstává riziko, že vlivem války dojde k úniku nebo ztrátě vody z bazénu v kombinaci s nemožností náhrady improvizovanou doplňkovou vodou, což bezpečnou dobu výrazně zkrátí.

Kromě dodávky elektřiny je také zapotřebí neporušený chladicí řetězec pro přenos zbytkového tepla z bazénu přes výměníky tepla do chladiče, jakým může být například venkovní vodní zdroj. Zničení jakéhokoli článku chladicího řetězce by přerušilo chlazení až do obnovení tohoto článku.

Výpadek dodávky energie nebo chladicího řetězce trvajících několik dní je proto důvodem k obavám.

Naproti tomu chlazení suchých skladovacích zařízení není závislé na dodávkách energie a aktivních chladicích řetězcích díky pasivní konstrukci systému.

Kvalifikovaný provozní personál

V zařízeních pro skladování vyhořelého paliva je rovněž zapotřebí kvalifikovaný personál schopný plnit úkoly se zaměřením na monitorování a údržbu. V případě mokrých skladovacích zařízení musí udržovat funkční chladicí řetězec. I zde je personál podobně jako obsluha jaderných reaktorů postížen válečnými vlivy, jak bylo uvedeno výše. V tomto případě ale menší rozsah úkolů a delší doba pro reakci na vzniklé problémy mírní riziko způsobené chybami personálu.

Možné mechanismy a scénáře úniku radiace

Jaderná elektrárna v provozu

V provozované jaderné elektrárně po nouzovém odstavení reaktoru je produkce zbytkového tepla tak vysoká, že výpadek chlazení vede přímo k roztavení aktivní zóny. Za jak dlouho dojde k roztavení aktivní zóny po selhání chlazení, závisí na konkrétní konstrukci reaktoru, složení a množství radioaktivních izotopů, a zejména na obsahu vody v příslušných systémech. Studie havárií, během kterých došlo k roztavení aktivní zóny reaktoru, spočítaly dobu do začátku tavení v intervalu od méně než hodiny až po několik hodin.

Během tavení aktivní zóny se v rané fázi tvoří volný vodík, který může za vhodných podmínek explodovat a významně poškodit budovu reaktoru (k tomuto scénáři došlo při havárii ve Fukušimě). Studie bezpečnosti reaktoru identifikovaly i další mechanismy, které mohou způsobit explozi (např. výbuch páry způsobený pádem roztaveného paliva do vody nebo rychlé chemické oxidační reakce).

Fyzikální zákony se ve válečných podmínkách nemění. Pokud dojde k roztavení aktivní zóny v důsledku ostřelování budovy reaktoru, je pravděpodobné, že dojde k většímu úniku radiace než při jiném typu havárie. Poškozená ochranná obálka reaktoru nemůže plnit svůj zamýšlený účel zamezení úniku radiace do okolí.

Při roztavení aktivní zóny dojde k uvolnění radioaktivních izotopů do životního prostředí, které lze očekávat během několika hodin od začátku tavení. Únik radiace znamená kontaminaci rozsáhlé oblasti v okolí jaderné elektrárny na desítky let, což následně vyžaduje přemístění obyvatelstva. Stupeň zasažení konkrétních oblastí závisí na povětrnostních podmínkách. Postižen může být také personál elektrárny.

Množství uvolněné radioaktivity se pohybuje v širokém intervalu a závisí na kvalitě a míře poškození stavebních konstrukcí a úrovni včasných opatření ze strany provozního personálu. Za válečných podmínek lze pravděpodobně očekávat vyšší množství. Hrdinské činy personálu nemusí být vzhledem k bojovým operacím možné.

Uvedené principy se v zásadě vztahují na reaktory v plném i částečném provozu. Například reaktor, který generuje energii pouze pro vlastní potřebu, je v provozu s částečným zatížením a není odstaven. Nadále tedy generuje další štěpné produkty.

Odstavená jaderná elektrárna

K roztavení aktivní zóny může dojít i při výpadku chlazení odstaveného reaktoru. Prodleva mezi poruchou chlazení a roztavením aktivní zóny se ovšem zvyšuje. Čím déle je reaktor odstaven, tím méně zbytkového tepla vzniká (viz obrázek 8). V zásadě však roztavení aktivní zóny v reaktoru, který byl odstaven jen několik dní nebo týdnů, může přesto vést k rozsáhlé kontaminaci okolí.

Bazén pro skladování vyhořelého paliva

Když bazén pro skladování vyhořelého paliva přijde o funkční chladicí systém, voda se ohřeje a zůstává horká tak dlouho, dokud je do ní přiváděno více tepla, než je z ní odváděno. Bazény v sobě často mají uložené vyhořelé palivové články nahromaděné za mnoho let provozu reaktoru. To má za následek celkově značnou produkci zbytkového tepla. Poměrný příspěvek článků, které byly vyjmuty před krátkou dobou, je vyšší, v souladu s rozpádovými křivkami (viz obrázek 8 a obrázek 10).

Celkové uvolněné teplo je třeba posuzovat ve vztahu k dostupné chladicí vodě. Čím větší množství uvolněného tepla a čím menší množství chladicí vody, tím rychleji se voda z bazénu odpařuje, dokud palivové články nejsou částečně nebo zcela odkryté. Nejsou-li již ponořeny ve vodě, pak se dále zahřívají a uvolňují těkavé a polotěkavé radionuklidy do atmosféry nad skladovacími bazény. Při teplotě kolem 800 °C začíná v důsledku chemické reakce na plášti paliva vznikat vodík. To na jedné straně vede k rychlejšímu uvolňování radioaktivity, protože uvedená reakce plášť paliva poškozuje. Na druhé straně uvolněný vodík znamená hrozbu exploze. K reakci dochází paralelně u všech palivových článků v postiženém úseku bazénu. Kolem teploty 800 °C může také kovové zirkonium, které je obvykle hlavní složkou pláště, na vzduchu vzplanout [72]. Bez pláště a s dodatečným žářem při požáru opět uniká více radioaktivity.

Za těchto podmínek se z paliva ve velkém množství uvolňují těkavé a polotěkavé radioaktivní látky. Ty se dostanou do bezprostředního i širšího okolí a způsobí rozsáhlou kontaminaci.

Doba trvání těchto procesů se pohybuje od dní do řady týdnů v závislosti na úrovni produkce zbytkového tepla a objemu vody. Časové úseky se významně zkracují v případech, že v důsledku válečných operací dojde k poškození skladovacího bazénu a úniku vody.

Teprve po mnoha letech skladování palivových článků v mokřém skladu se podaří dosáhnout stavu, kdy je zbytkové teplo natolik nízké, že v případě ztráty chlazení se bude voda v bazénu pouze ohřívát, aniž by došlo k podstatně rychlejšímu odpařování. Při splnění těchto předpokladů by se selhání systému chlazení obešlo bez následků. Vážné mechanické poškození bazénu s vyhořelým palivem by ovšem stále mohlo vést k úniku radiace.

Vzhledem k tomu, že ohřev je relativně pomalý (ve srovnání s aktivní zónou jaderného reaktoru), mohly by úniky být omezené zásahem obsluhy. Je ovšem třeba vzít v úvahu, že náročnou manipulaci s vyhořelým palivem budou válečné podmínky dále komplikovat.

V případě mokrého skladu umístěného přímo v budově reaktoru je rovněž otázkou, jak se mohou podmínky v reaktoru a v bazénu pro vyhořelé palivo ve válečné situaci vzájemně ovlivňovat.

Suché skladování

V suchých skladovacích zařízeních může k uvolnění radioaktivity dojít pouze v případě narušení integrity kontejneru. Také vzhledem k tomu, že kontejnery jsou rozmístěny ve větších rozestupech, je riziko přehřátí článků výrazně nižší než v bazénech.

Mezi faktory ovlivňující rozsah potenciálního úniku radiace patří:

- **Rozsah poškození kontejneru.** Přes pouhý otvor ve stěně kontejneru se může uvolnit méně radiace než v případě celkové destrukce.
- **Mechanická energie úderu.** Silná exploze může vést k rozpadu palivových článků na částice o velikosti aerosolu.
- **Vliv požáru.** Dojde-li během válečných operací v okolí nebo uvnitř poškozených kontejnerů k požáru, následuje zvýšené uvolňování radioaktivních látek.
- **Intenzita odvádění zbytkového tepla okolním vzduchem.** V případě, že se prouděním okolního vzduchu daří poškozené palivové články chladit, dochází k menším únikům radiace.

Celkově lze očekávat znatelné úniky radioaktivních látek do bezprostředního okolí ze zničených kontejnerů v suchém skladu zejména v případech, kdy výbuch munice způsobí, že se vyhořelé palivo roztrhne nebo shoří.

PŘÍLOHA – STAV JADERNÉ ENERGETIKY VE SVĚTĚ

(Stav jaderné energetiky ve světě k 1. lednu 2023)

Stát	Reaktorový park					Elektřina Podíl na komerční výrobě elektřiny [b] (2021)	Energie Podíl na komerční výrobě primární energie [c] (2021)
	V provozu		Dlouhodobě odstavené (LTO)	Střední věk [a]	Ve výstavbě		
	vv	Výkon (MW)	Bloky	Roky	Bloky		
Argentina	3	1 641		32,3	1	7,2 % (=)	2,9 % (=)
Arménie	1	448		43,0		25,3 % (-)	nedostupné
Bangladéš	-	-		-	2		
Bělorusko	1	1 110		2,2	1	14,1 % (+)	4,7 %
Belgie	6	4 936		43,2		50,8 % (+)	16,8 % (+)
Brazílie	2	1 884		31,6	1	2,4 % (=)	1,1 % (=)
Bulharsko	2	2 006		33,3		34,6 % (-)	nedostupné
Kanada	17	11 929	2	39,5/40,1		14,3 % (=)	6 % (=)
Čína	56	52 170		9,3	22	5 % (=)	2,3 % (=)
Česká republika	6	3 934		31,5		36,6 % (=)	16,6 % (=)
Egypt	-	-		-	2		
Finsko	5	4 394		35,2		32,8 % (-)	18,6 % (=)
Francie	56	61 370		37,6	1	69 % (+) [d]	36,5 % (=)
Německo	3	4 055		34,5		11,9 % (=)	4,9 % (=)
Maďarsko	4	1 916		37,5		46,8 % (-)	14,2 % (=)
Indie	19	6 290	3	24,7/20,9	8	3,2 % (=)	1,1 % (=)
Írán	1	915		11,3	1	1 % (=)	0,3 % (=)
Japonsko	10	9 486	23	31,9/34,7	1	7,2 % (+)	3,1 % (=)
Mexiko	2	1 552		30,9		5,3 % (=)	1,6 % (=)
Nizozemsko	1	482		49,5		3,1 % (=)	1 % (=)
Pákistán	6	3 256		8,1		10,6 % (+)	3,7 % (+)
Rumunsko	2	1 300		21,0		18,5 % (-)	7,3 % (=)
Rusko	37	27 727		29,4	5	20 % (=)	6,4 % (=)
Slovensko	4	1 868		30,8	2	52,3 % (=)	nedostupné
Slovinsko	1	688		41,2		36,9 % (=)	nedostupné
Jihoafrická republika	2	1 854		38,1		6 % (=)	1,9 % (=)
Jižní Korea	25	24 431		22,6	3	28 % (-)	11,4 % (=)
Španělsko	7	7 121		37,9		20,8 % (-)	9,1 % (-)
Švédsko	6	6 882		40,5		30,8 % (=)	21 % (=)
Švýcarsko	4	2 960		46,8		30,8 % (-) [e]	15,6 % (-)
Tchaj-wan	3	2 859		39,0		10,8 % (-)	5 % (-)
Turecko	-	-		-	4		
Spojené arabské emiráty	3	4 107		1,3	1	1,3 %	2,1 %
Velká Británie	9	5 883		35,6	2	14,8 % (=)	5,8 % (=)
Ukrajina	15	13 107		33,9		55 % (+)	23,4 % (+)
USA	92	94 718		42,1	2	19,6 % (=)	8 % (=)
EU27	103	100 952		37,0	3	25,3 % (=) [c]	11 % (=)
Svět	411	369 279	28	31,2	59	9,8 % (=) [c]	4,3 % (=)

Zdroje: WNISR a IAEA-PRIS, 2023, BP, 2022

[a] – Včetně/mimo dlouhodobě odstavených reaktorů.

[b] – Data za rok 2021, zdroj: IAEA-PRIS, „Nuclear Share of Electricity Generation in 2021“, k červenci 2022, pokud není uvedeno jinak.

[c] – Data za rok 2021, zdroj: BP, „Statistical Review of World Energy“, 2022.

[d] – RTE, „Bilan Électrique 2021“, leden 2022.

[e] – Swiss Federal Office of Energy, „Production et consommation totales d'énergie électrique en Suisse“, 2022.

POZNÁMKY

- [1] IAEA, Databáze jaderných reaktorů, <https://pris.iaea.org/pris/>.
- [2] „Korean nuclear reactor back online after 5-year maintenance outage“, 13. prosince 2022, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Korean-nuclear-reactor-back-online-after-5-year-ma>.
- [3] U reaktorů, které přestaly vyrábět elektřinu již v letech před definitivním uzavřením, WNISR zpětně upravuje statistiky pro dotčené roky bez výroby.
- [4] S&P Global, „Electricité de France Placed On CreditWatch Negative On Nuclear Outages And Adverse Political Decisions“, zpráva o stavu výzkumu, 17. ledna 2022, viz <https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/espaces-dedies/espace-finance-en/investors-analysts/credits/rating/sp-research-update-2022-01-17.pdf>, cit. 30. srpna 2022.
- [5] Agnès Verdier-Molinié, „Coupures de courant : informez les Français!“ [„Power cuts: inform the French!“], Les Echos, aktualizováno 1. srpna 2022, viz <https://www.lesechos.fr/idees-debats/cercle/opinion-coupures-de-courant-informez-les-francais-1779786>, cit. 30. srpna 2022.
- [6] Vláda Francie, „Travaux relatifs au nouveau nucléaire – PPE 2019–2028“, cit. dle Contexte, říjen 2021, viz https://www.contexte.com/article/energie/info-contexte-nucleaire-pas-encore-lances-les-futurs-epr-deja-en-retard-et-plus-chers_140631.html, cit. 30. srpna 2022.
- [7] EDF, „Annual Financial Report 2019 – Universal Registration Document“, březen 2020.
- [8] EDF, „Consolidated Financial Statements at 31 December 2021“, únor 2022.
- [9] Christine Kerdellant, „Nationaliser EDF : pour quoi faire ?“ [„Nationalise EDF: what for?“], Les Echos, 8. července 2022, viz <https://www.lesechos.fr/idees-debats/editos-analyses/nationaliser-edf-pour-quoi-faire-1775293>, cit. 30. srpna 2022.
- [10] Les Echos, „Nationaliser EDF : pour quoi faire ?“, 8. července 2022, op. cit.
- [11] Vše jsou tlakovodní reaktory (PWR), 32× 900 MW, 20× 1300 MW a 4× 1400 MW.
- [12] Ministerstvo ekologické transformace Francie, „Bilan énergétique de la France en 2021 – Données provisoires“ [„Energy Balance of France in 2021 – Provisional Data“], duben 2022.
- [13] Ministerstvo energetiky a změny klimatu Spojeného království, „Hinkley Point C to power six million UK homes“, Vláda Spojeného království, tisková zpráva, 21. října 2015, viz <https://www.gov.uk/government/news/hinkley-point-c-to-power-six-million-uk-homes>, cit. 11. dubna 2021.
- [14] Ministerstvo obchodu, energetiky a průmyslové strategie Spojeného království a Úřad předsedy vlády Spojeného království, „Initial agreement reached on new nuclear power station at Hinkley“, tisková zpráva, 21. října 2013, viz <https://www.gov.uk/government/news/initial-agreement-reached-on-new-nuclear-power-station-at-hinkley>.
- [15] EDF, „Clarifications on Hinkley Point C project“, tisková zpráva, 3. července 2017, viz <https://www.edf.fr/en/the-edf-group/dedicated-sections/journalists/all-press-releases/clarifications-on-hinkley-point-c-project>, cit. 11. dubna 2021.
- [16] EDF, „Update on Hinkley Point C project“, tisková zpráva, 25. září 2019, viz <https://www.edfenergy.com/media-centre/news-releases/update-on-hinkley-point-c-project>, cit. 11. dubna 2021.
- [17] EDF Energy, „Annual Report and Financial Statements“, březen 2022, viz https://www.edfenergy.com/sites/default/files/edf_energy_holdings_limited_fy21_signed_financial_statements_full.pdf, cit. 8. července 2022.
- [18] EDF, „Hinkley Point C Update“, tisková zpráva, 19. května 2022, viz <https://www.edf.fr/sites/groupe/files/epresspack/3081/ccb6205433272bb0cbfac560cea3b537.pdf>, cit. 19. května 2022.

- [19] EDF, „Agreement reached on commercial terms for the planned Hinkley Point C nuclear power station“, tisková zpráva, 21. října 2013, viz https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/espaces-dedies/espace-finance-en/investors-analysts/events/special-announcements/agreement_reached_on_commercial_terms_for_the_planned_hinkley_point_c_nuclear_power_station.pdf, cit. 13. července 2022.
- [20] Phil Chaffee, „United Kingdom: Industry Pushes for Government Action“, Nuclear Intelligence Weekly, 6. března 2020.
- [21] Phil Chaffee, „United Kingdom: Difficulties With Hinkley’s IUK Support“, Nuclear Intelligence Weekly, 4. prosince 2015.
- [22] Michael Stothard, „EDF looks to sell €10bn of assets to boost balance sheet“, Financial Times, 18. října 2015, viz <https://www.ft.com/content/fcd6a462-7578-11e5-a95a-27d368e1ddf7>, cit. 21. května 2020.
- [23] KOSIS (Korejská statistická informační služba), „Power Generation by Energy Source“, aktualizováno 22. července 2022, viz https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1339, cit. 4. září 2022.
- [24] WNN, „Korean reactor starts supplying electricity“, 10. června 2022, viz <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Korean-reactor-starts-supplying-electricity>, cit. 9. září 2022.
- [25] WNA, „Nuclear Power in South Korea | Nuclear Energy in the Republic of Korea“, červen 2022, viz <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/south-korea.aspx>, cit. 9. září 2022.
- [26] NSSC, „NSSC Commissioners Approved Issuance of Operating License of Shinhanul Unit 1“, tisková zpráva, Nuclear Safety and Security Commission, 9. července 2021, viz https://www.nssc.go.kr/ajaxfile/FR_SVC/FileDown.do?GBN=X01&BOARD_SEQ=1&SITE_NO=3&BBS_SEQ=46038&FILE_SEQ=1, cit. 9. září 2022.
- [27] S&P Global, „S Korea’s 9 nuclear plants restarting Sep-Oct to pressure LNG demand“, 2. září 2020, viz <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/natural-gas/090220-s-koreas-9-nuclear-plants-restarting-sep-oct-to-pressure-lng-demand>, cit. 9. června 2021.
- [28] KHNP, „Shin-Kori #5,6“, nedatováno, viz <https://www.khnp.co.kr/eng/url>, cit. 9. září 2022.
- [29] The Hankyoreh, „부산 시민단체 “고리 2호기 수명 연장 절차 멈춰라” „[„Busan NGOs“ Stop Lifetime Extension of Kori-2]“, 22. srpna 2022 (korejsky), viz <https://www.hani.co.kr/arti/area/yeongnam/1056154.html>, cit. 7. září 2022.
- [30] Carolyn Muyskens, „The Palisades nuclear plant is offline. What happens next and is it closed for good?“, Holland Sentinel, 27. května 2022, viz <https://www.hollandsentinel.com/story/news/local/2022/05/27/palisades-nuclear-power-plant-prepares-decommissioning/9923747002/>, cit. 29. srpna 2022.
- [31] Catherine Clifford, „California lawmakers vote to extend Diablo Canyon nuclear plant operations as state battles energy emergency“, CNBC, 1. září 2022, viz <https://www.cnbc.com/2022/09/01/california-lawmakers-vote-to-keep-diablo-canyon-nuclear-plant-open.html>, cit. 1. září 2022.
- [32] Úřad pro energetické informace USA, „Electric Power Monthly“, tabulka 1.1., Ministerstvo energetiky USA, 24. srpna 2022, viz https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=table_1_01, cit. 1. září 2022.
- [33] Jeff Amy, „Co-owners sue Georgia Power in \$685M Vogtle contract dispute“, Associated Press, 21. června 2022, viz <https://apnews.com/article/politics-lawsuits-florida-georgia-a0eaf5c77e77e2b6ba95f0ad93137572>, cit. 1. září 2022.
- [34] Associated Press, „Georgia nuclear plant’s cost now forecast to top \$30 billion“, cit. dle Georgia Public Broadcasting, 9. května 2022, viz <https://www.gpb.org/news/2022/05/09/georgia-nuclear-plants-cost-now-forecast-top-30-billion>, cit. 7. září 2022.

- [35] Georgia Power, „Toshiba fulfills \$3.68 billion parent guarantee obligation for Vogtle nuclear expansion,“ 14. prosince 2017, viz <https://www.prnewswire.com/news-releases/toshiba-fulfills-368-billion-parent-guarantee-obligation-for-vogtle-nuclear-expansion-300571464.html>, cit. 1. září 2022.
- [36] Jeff Amy, „Nuclear regulators uphold violations at Georgia reactors“, Associated Press, 19. listopadu 2021, viz <https://www.statesboroherald.com/local/nuclear-regulators-uphold-violations-georgia-reactors>, cit. 1. září 2022.
- [37] Drew Kahn, „Monitors blame Georgia Power’s lax oversight for Plant Vogtle delays“, Atlanta Journal-Constitution, 19. července 2022, viz <https://www.ajc.com/news/monitors-blame-georgia-powers-lax-oversight-for-plant-vogtle-delays/BGRQWF65PFDMLB5QXKT7XYZLZQ/>, cit. 1. září 2022.
- [38] Úřad pro regulaci jaderných reaktorů USA, „Generic Aging Lessons Learned for Subsequent License Renewal (GALL-SLR) Report“, Komise pro jaderný dozor USA, závěrečná zpráva, NUREG-2191, 2. díl, červenec 2017, viz <https://www.nrc.gov/docs/ML1718/ML17187A204.pdf>, cit. 10. června 2020.
- [39] Turkey Point-3 a -4 (2020), Peach Bottom-2 a -3 (2020) a Surry-1 a -2 (2021). Viz Komise pro jaderný dozor USA, „Status of Subsequent License Renewal Applications“, 9. června 2022, viz <https://www.nrc.gov/reactors/operating/licensing/renewal/subsequent-license-renewal.html>, cit. 1. září 2022.
- [40] North Anna-1 a 2, Oconee-1, 2 a 3, Point Beach-1 a 2, St. Lucie-1 a 2.
- [41] Jde o Turkey Point-3 a 4 a Peach Bottom-2 a 3. Jelikož proti prodloužení licence reaktorů Surry-1 a 2 se žádný účastník řízení nevyslovil, úřad v jejich případě platnost nepozastavil, přestože se tato žádost opírala o stejné posouzení vlivů na životní prostředí jako ostatní bloky. Viz Komise pro jaderný dozor USA, „Memorandum and Order CLI-22-02“, 24. února 2022, viz <https://www.nrc.gov/docs/ML2205/ML22055A496.pdf>; Komise pro jaderný dozor USA, „Memorandum and Order CLI-22-04“, 24. února 2022, viz <https://www.nrc.gov/docs/ML2205/ML22055A557.pdf>, oba zdroje cit. 1. září 2022.
- [42] WNISR, „Construction Start on US Vogtle Unit 4“, 25. listopadu 2013, viz <https://www.worldnuclearreport.org/Construction-Start-on-US-Vogtle.html>, cit. 20. července 2021.
- [43] WNISR, „Construction Start at Vogtle Reactor in the US“, 16. března 2013, viz <https://www.worldnuclearreport.org/Construction-Start-at-Vogtle.html>, cit. 7. září 2022.
- [44] Komise pro jaderný dozor USA, „NRC Authorizes Vogtle Unit 3 Fuel Loading and Operation“, tisková zpráva č. 22-031, 3. srpna 2022, viz <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/news/2022/22-031.pdf>, cit. 7. září 2022.
- [45] Drew Kahn, „Monitors blame Georgia Power’s lax oversight for Plant Vogtle delays“, Atlanta Journal-Constitution, 19. července 2022, viz <https://www.ajc.com/news/monitors-blame-georgia-powers-lax-oversight-for-plant-vogtle-delays/BGRQWF65PFDMLB5QXKT7XYZLZQ/>, cit. 1. září 2022.
- [46] Jeff Amy, „Nuclear regulators uphold violations at Georgia reactors“, Associated Press, 19. listopadu 2021, viz <https://www.statesboroherald.com/local/nuclear-regulators-uphold-violations-georgia-reactors/>; Komise pro jaderný dozor USA, „Vogtle Electric Generating Plant, Unit 3 – Final Significance Determination of a Preliminary White Finding, a Preliminary Greater than Green Finding, Notice of Violation, and Assessment Follow-Up Letter, NRC Special Inspection Report 05200025/2021011“, 17. listopadu 2021, viz <https://www.nrc.gov/docs/ML2131/ML21312A412.pdf>, oba zdroje cit. v září 2022.
- [47] Komise pro jaderný dozor USA, „Finding that all Acceptance Criteria are met for the Vogtle Electric Generating Plant, Unit 3, Combined License,“ viz <https://www.nrc.gov/docs/ML2029/ML20290A284.pdf>, cit. 5. září 2022.
- [48] Viz například NIRS, „MIT Nuke Study Uses Unsupportable Reactor Cost Estimates“, tisková zpráva, Nuclear Information and Resource Service, 16. září 2010, viz <https://www.commondreams.org/newswire/2010/09/16/mit-nuke-study-uses-unsupportable-reactor-cost-estimates>, cit. 23. května 2018; Travis Madsen, Johanna Neumann a Emily Rusch, „The High Cost of Nuclear Power—Why America Should Choose a Clean Energy Future Over New Nuclear Reactors“, Nadace Maryland PIRG, březen 2009, viz https://www.nirs.org/wp-content/uploads/nukerelapse/calvert/highcostnpower_mdpirg.pdf, cit. 28. května 2019.

- [49] Matt Kempner, „Georgia Power’s Vogtle overruns could mean billions more in profits“, Atlanta Journal Constitution, 9. července 2021, viz <https://www.ajc.com/news/business/nuclear-cost-overrun-could-mean-billions-in-extra-georgia-power-profit/YIA3T3YHZRH15A7GCZHREIXCPE/>, cit. 6. září 2022.
- [50] Liam Denning, „Nuclear Power’s Big Problem Isn’t That It’s Nuclear“, Bloomberg, 27. září 2018, viz <https://www.bloomberg.com/opinion/articles/2018-09-27/nuclear-power-s-big-problem-isn-t-that-it-s-nuclear>, cit. 28. května 2019.
- [51] Jeff Amy, „Co-owners sue Georgia Power in \$685M Vogtle contract dispute“, Associated Press, 21. června 2022, op. cit.
- [52] Georgia Power, „Toshiba fulfills \$3.68 billion parent guarantee obligation for Vogtle nuclear expansion“, 14. prosince 2017, viz <https://www.prnewswire.com/news-releases/toshiba-fulfills-368-billion-parent-guarantee-obligation-for-vogtle-nuclear-expansion-300571464.html>, cit. 1. září 2022.
- [53] John M. Deutch, Charles W. Forsberg, et al., „Update of the MIT 2003 Future of Nuclear Power“, MIT Energy Initiative, mezioborová studie, Massachusetts Institute of Technology, 2009, viz <http://web.mit.edu/nuclearpower/pdf/nuclearpower-update2009.pdf>, cit. 5. srpna 2019.
- [54] IEA, „Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector“, Mezinárodní energetická agentura, květen 2021, viz <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>, cit. 6. června 2021.
- [55] Fatih Birol, „COP26 climate pledges could help limit global warming to 1.8 °C, but implementing them will be the key“, Mezinárodní energetická agentura, 4. listopadu 2021, viz <https://www.iea.org/commentaries/cop26-climate-pledges-could-help-limit-global-warming-to-1-8-c-but-implementing-them-will-be-the-key>, cit. 10. července 2022.
- [56] Climate Action Tracker, „Glasgow’s 2030 credibility gap: net zero’s lip service to climate action“, 3. června 2022, viz <https://climateactiontracker.org/publications/despite-glasgow-climate-pact-2030-climate-target-updates-have-stalled/>, cit. 24. srpna 2022.
- [57] Lazard, „Lazard’s Levelized Cost of Energy Analysis – Version 15.0“, říjen 2021, viz <https://www.lazard.com/media/451905/lazards-levelized-cost-of-energy-version-150-vf.pdf>, cit. 17. července 2022.
- [58] Jeremy Hodges, „Wind, Solar Are Cheapest Power Source In Most Places, BNEF Says“, Bloomberg, 19. října 2020, viz <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-10-19/wind-solar-are-cheapest-power-source-in-most-places-bnef-says>, cit. 6. června 2021.
- [59] IRENA, „Renewable Power Generation Costs in 2021“, Mezinárodní agentura pro obnovitelnou energii, červenec 2022, viz <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>, cit. 13. července 2022.
- [60] NEI, „Nuclear Costs in Context“, Nuclear Energy Institute, listopad 2021, viz <https://www.nei.org/resources/reports-briefs/nuclear-costs-in-context>, cit. 15. září 2022.
- [61] REN21, „Renewables 2022 – Global Status Report“, červen 2022, op. cit.
- [62] Pokud není uvedeno jinak, údaje o výrobě z obnovitelných zdrojů jsou uvedeny brutto (TWh) podle BP, údaje o výrobě z jádra jsou obvykle netto (TWh) dle IAEA-PRIS, případně brutto dle BP.
- [63] Doba, za kterou radioaktivita ztratí polovinu své původní aktivity přirozeným rozpadem. Poločasy se liší od sekund po miliony let, v závislosti na konkrétním nuklidu.
- [64] TEPCO, „Decay Heat of Fuel in Reactor (changes in half year period after the earthquake)“, 26. května 2011, viz https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/images/handouts_110526_01-e.pdf, cit. 18. července 2022.
- [65] Jungmin Kang, ústní sdělení, 20. srpna 2022.
- [66] Belgie, Bulharsko, Česká republika, Francie, Maďarsko, Slovensko, Slovinsko a Ukrajina (55 %), což je 6 zemí východní a střední Evropy a 2 země západní Evropy.

[67] Toto tvrzení je používáno od roku 1976 špičkovými odborníky na jaderné zbraně z předních amerických laboratoří. Viz. např. Gregory S. Jones, „Reactor-Grade Plutonium and Nuclear Weapons: Exploding the Myths“, Vzdělávací centrum politiky nešíření jaderných zbraní, Arlington, Virginie, 2018, od str. 21. Jednoduchým fyzikálním vysvětlením je přehledový článek Amory B. Lovinse, viz. Amory B. Lovins, „Nuclear Weapons and Power-Reactor Plutonium“, *Nature*, 283:817–823, 28. února 1980, s typografickou korekturou 284:190, 13. března 1980, viz. <https://rmi.org/insight/nuclear-weapons-and-power-reactor-plutonium/>, cit. 1 srpna 2022.

[68] Existují však různé typy výzkumných a vojenských (především námořních) reaktorů, které pracují s vysoce obohaceným uranem. Neprodukují však komerčně elektřinu, a proto jsou mimo rozsah této analýzy.

[69] Takové materiály jsou navrženy pro použití v různých druzích „pokročilých reaktorů“, které jsou nyní ve vývoji, s vážnými důsledky pro agendu nešíření jaderných zbraní., viz. Frank von Hippel, „Perspective: The DOE Ignores History, Risks Proliferation“, *Nuclear Intelligence Weekly*, 18. února 2022, viz. <https://www.energyintel.com/0000017e-ff91-df96-a1fe-fffddf990000>, cit. 1. srpna 2022.

[70] Victor Gilinsky, Marvin Miller a Harmon Hubbard, „A Fresh Examination of the Proliferation Dangers of Light Water Reactors“, Vzdělávací centrum politiky nešíření jaderných zbraní, pracovní dokument č. 1701, aktualizováno 1. března 2017, viz. <https://npolicy.org/article.php?aid=172>, cit. 15. července 2022.

[71] Užitečné přehledy právních otázek jsou uvedeny v Tibisay Morgandi a Batuhan Betin, „Legal Implications of the Military Operations at the Chernobyl and Zaporizhzhya Nuclear Power Plants“, *EJIL: Talk!*, Blog Evropského deníku mezinárodního práva, 15. dubna 2022, viz. <https://www.ejiltalk.org/legal-implications-of-the-military-operations-at-the-chernobyl-and-zaporizhzhya-nuclear-power-plants/>, cit. 15. dubna 2022; a Anne Dienelt, „How Are Nuclear Power Plants Protected by Law During War?“, *Völkerrechtsblog*, 7. března 2022, viz. <https://voelkerrechtsblog.org/how-are-nuclear-power-plants-protected-by-law-during-war/>, cit. 23. srpna 2022.

[72] Frank N. von Hippel a Michael Schoeppner, „Reducing the Danger from Fires in Spent Fuel Pools“, *Science & Global Security*, 1. září 2016, viz. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08929882.2016.1235382>, cit. 17. července 2022.

TIRÁŽ

Zpráva o stavu jaderného průmyslu ve světě 2022 – Stručné shrnutí

Tuto publikaci společně vydávají pražská kancelář Heinrich-Böll-Stiftung, Calla – Sdružení pro záchranu prostředí a Hnutí DUHA – Friends of the Earth Czech republic.



Hlavní autoři:

Mycle Schneider
45, Allée des Deux Cèdres
91210 Draveil (Paris) France
T: +33-1-69 83 23 79
E: mycle@WorldNuclearReport.org

Antony Froggatt
53a Neville Road
London N16 8SW United Kingdom
T: +44-79 68 80 52 99
E: antony@froggatt.net

Originál: www.worldnuclearreport.org

Překlad: Karel Polanecký (Úvodní přehled), Kryštof Herold (Francie, Jižní Korea, USA a Nasazení jaderných a obnovitelných zdrojů energie a Příloha), Sára Hájková (Jaderná energetika a válka)

Editace: Karel Polanecký, Edvard Sequens

Redakce: Žaneta Gregorová, Klára Pleskačová

Jazykové korektury: Karolina Podobová

Grafická úprava: Kristýna Mothejzíková

Rok vydání: 2023

Kontakty na vydavatele:

Heinrich-Böll-Stiftung Praha,
Jugoslávská 567/16, 120 00 Praha 2, cz.boell.org

Calla – Sdružení pro záchranu prostředí,
Fráni Šrámka 35, 370 01 České Budějovice, calla@calla.cz, www.calla.cz

Hnutí DUHA,
Údolní 33, 602 00 Brno, pratele@hnutiduha.cz, www.hnutiduha.cz

ISBN 978-80-88289-48-7

Dílo je zveřejněno pod licencí Creative Commons CC BY-NC-SA. Je povoleno jej šířit, pokud bude uveden jeho autor, a to pouze k nekomerčním účelům a při zachování stávající licence.