

Malé jaderné reaktory

 world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx

(Aktualizováno v lednu 2023)

- **Velký zájem je o malé a jednodušší bloky na výrobu elektřiny z jaderné energie a na technologické teplo.**
- **Tento zájem o malé a střední jaderné reaktory je řízen jak přáním snížit dopad kapitálových nákladů, tak zajistit elektřinu mimo velké sítě.**
- **Použité technologie jsou četné a velmi rozmanité.**

Jak se výroba jaderné energie od 50. let 20. století prosadila, velikost reaktorových bloků vzrostla z 60 MWe na více než 1600 MWe, s odpovídajícími úsporami z rozsahu v provozu. Současně bylo postaveno mnoho stovek menších energetických reaktorů pro námořní použití (až 190 MW tepelných) a jako zdroje neutronů.^a přináší obrovské odborné znalosti v oblasti konstrukce malých energetických bloků a shromažďuje více než 12 000 let zkušeností s reaktory.

Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) definuje „malé“ jako pod 300 MWe a do přibližně 700 MWe jako „střední“ – včetně mnoha provozních jednotek z 20. století. Společně je MAAE označuje jako malé a střední reaktory (SMR). „SMR“ se však běžněji používá jako zkratka pro „malý modulární reaktor“, který je navržen pro sériovou výstavbu a společně zahrnuje velkou jadernou elektrárnu. (Na této informační stránce není použití různých prefabrikovaných modulů pro urychlení výstavby jednoho velkého reaktoru relevantní.) Podkategorie velmi malých reaktorů – vSMR – je navržena pro bloky do cca 15 MWe, zejména pro vzdálené komunity.

Malé modulární reaktory (SMR) jsou definovány jako jaderné reaktory obecně ekvivalentní 300 MWe nebo méně, navržené modulární technologií využívající tovární výrobu modulů, sledující úspory sériové výroby a krátké doby výstavby. Tato definice od

Světové jaderné asociace se úzce opírá o definice od IAEA a US Nuclear Energy Institute. Některé z již provozovaných malých reaktorů uvedených nebo uvedených níže této definici neodpovídají, ale většina z popsaných jí vyhovuje. Typy PWR mohou mít integrované parní generátory, v takovém případě musí být tlaková nádoba reaktoru větší, což omezuje přenositelnost z továrny na místo. Proto mnoho větších PWR, jako je Rolls-Royce UK SMR, má externí parní generátory.

Tato informační stránka se zaměřuje na pokročilé designy v kategorii small, *tzv.* ty, které se nyní staví poprvé nebo jsou stále na rýsovacím prkně, a některé větší, které nespádají do běžných kategorií, kterými se zabývá stránka Pokročilé jaderné reaktory. Některé ze zde popsaných návrhů se ještě ve skutečnosti neupravují, jiné jsou v provozu nebo ve výstavbě. Usilují se o čtyři hlavní možnosti: lehkovodní reaktory, reaktory s rychlými neutrony, grafitem moderované vysokoteplotní reaktory a různé druhy reaktorů s roztavenou solí (MSR). První má nejnižší technologické riziko, ale druhý (FNR) může být menší, jednodušší a s delším provozem před tankováním. Některé MSR jsou rychlespektrální.

V dnešní době částečně kvůli vysokým kapitálovým nákladům na velké energetické reaktory vyrábějící elektřinu prostřednictvím parního cyklu a částečně kvůli potřebě obsluhovat malé elektrické sítě do asi 4 GWe,^b došlo k posunu k vývoji menších jednotek. Ty mohou být postaveny samostatně nebo jako moduly ve větším komplexu, přičemž kapacita se podle potřeby postupně zvyšuje (viz níže o modulární konstrukci s použitím malých reaktorových bloků). Vzhledem k vyrobeným počtům se předpokládají úspory z rozsahu. Existují také kroky k vývoji nezávislých malých jednotek pro vzdálené lokality. Malé jednotky jsou považovány za mnohem lépe zvládnutelnou investici než velké jednotky, jejichž cena často soupeří s kapitalizací příslušných veřejných služeb.

Dalším důvodem zájmu o JMK je, že se mohou snáze začlenit do brownfields místo vyřazených uhelných elektráren, jejichž jednotky jsou zřídka velmi velké – více než 90 % má méně než 500 MWe a některé méně než 50 MWe. . V USA uhelné bloky vyřazené z provozu v letech 2010–2012 měly průměrně 97 MWe a ty, o nichž se očekávalo, že v letech 2015–25 budou vyřazeny, průměrně 145 MWe.

Rozvoj JMK pokračuje v západních zemích s velkým množstvím soukromých investic, včetně malých firem. Zapojení těchto nových investorů naznačuje hluboký posun od vlády řízeného a financovaného jaderného výzkumu a vývoje k výzkumu vedeném soukromým sektorem a lidmi se silnými podnikatelskými cíli, často spojenými se sociálním účelem. Tímto účelem je často nasazení cenově dostupné čisté energie bez emisí oxidu uhličitého.

Zpráva z roku 2011 pro americké ministerstvo energetiky vypracovaná Institutem energetické politiky Chicagské univerzity ¹⁸ uvádí, že malé reaktory by mohly významně zmírnit finanční riziko spojené s elektrárnami v plném rozsahu a potenciálně umožnit malým reaktorům účinně konkurovat jiným zdrojům energie.

Obecně se od moderních malých reaktorů pro výrobu energie, a zejména od SMR, očekává větší jednoduchost konstrukce, hospodárnost sériové výroby převážně v továrnách, krátké doby výstavby a nižší náklady na umístění. Většina z nich je také navržena pro vysokou úroveň pasivní nebo vlastní bezpečnosti v případě poruchy ⁹. Mnohé z nich jsou také navrženy tak, aby byly umístěny pod úrovní terénu, čímž poskytují vysokou odolnost vůči teroristickým hrozbám. Zpráva zvláštního výboru svolaného Americkou jadernou společností z roku 2010 ukázala, že mnohá bezpečnostní opatření nezbytná, nebo alespoň prozíravá, ve velkých reaktorech nejsou nutná v připravovaných malých konstrukcích. To je z velké části způsobeno jejich vyšším poměrem plochy povrchu k objemu (a teple jadra) ve srovnání s velkými jednotkami. To znamená, že v malých reaktorech není potřeba velké množství technických prostředků pro bezpečnost, včetně odvodu tepla ve

velkých reaktorech. Vzhledem k tomu, že se předpokládá, že malé reaktory v mnoha situacích nahrazují elektrárny na fosilní paliva, je požadovaná zóna nouzového plánování navržena tak, aby nebyla větší než asi 300 m poloměr. Kombinované tabulky z této zprávy jsou připojeny spolu s poznámkami o některých raných malých reaktorech chlazených vodou, plynem a tekutým kovem.

Licencování je pro SMR potenciálně výzvou, protože náklady na certifikaci návrhu, výstavbu a provozní licence nejsou nutně nižší než u velkých reaktorů. Několik vývojářů spolupracovalo s předlicenčním procesem přezkoumání návrhu dodavatele kanadské komise pro jadernou bezpečnost (CNSC), který identifikuje základní překážky pro licencování nového návrhu v Kanadě a zajišťuje, že existuje cesta k řešení. Kontrola před udělením licence je v podstatě technickou diskusí, jejíž fáze 1 zahrnuje přibližně 5 000 hodin času zaměstnanců, s ohledem na koncepční návrh a účtované developerovi. Fáze 2 je dvojnásobná a řeší návrh na úrovni systému.

Zpráva Světové jaderné asociace z roku 2015 o standardizaci SMR udělování licencí a harmonizaci regulačních požadavků ¹⁷ uvádí, že obrovský potenciál SMR spočívá na řadě faktorů:

- Vzhledem k jejich malé velikosti a modularitě mohly být SMR téměř kompletně postaveny v kontrolovaném továrním nastavení a instalovány modul po modulu, čímž se zlepšila úroveň kvality a efektivity konstrukce.
- Jejich malá velikost a pasivní bezpečnostní prvky je propůjčují zemím s menšími rozvodnými sítěmi a menšími zkušenostmi s jadernou energií.
- Velikost, konstrukční efektivita a pasivní bezpečnostní systémy (vyžadující menší redundanci) mohou vést ke snadnějšímu financování ve srovnání s většími závody.
- Navíc dosažení „úspor sériové výroby“ pro konkrétní konstrukci SMR dále sníží náklady.

Světová jaderná asociace uvádí seznam funkcí SMR, včetně:

- Malý výkon a kompaktní architektura a obvykle (alespoň pro jaderný parní systém a související bezpečnostní systémy) použití pasivních koncepcí. Proto se méně spoléhá na aktivní bezpečnostní systémy a přídatná čerpadla, stejně jako na AC napájení pro zmírnění nehod.
- Kompaktní architektura umožňuje modularitu výroby (ve výrobním závodě), což může také usnadnit implementaci vyšších standardů kvality.
- Nižší výkon vedoucí ke snížení zdroje a také menší radioaktivní zásoby v reaktoru (menší reaktory).
- Potenciál pro podúrovňové (podzemní nebo podvodní) umístění reaktorového bloku poskytující větší ochranu před přírodními (*např.* seismická nebo tsunami podle umístění) nebo umělými (*např.* náraz letadla) nebezpečími.
- Modulární design a malá velikost se hodí pro více jednotek na stejném místě.
- Nižší požadavky na přístup k chladicí vodě – proto vhodné pro vzdálené regiony a pro specifické aplikace, jako je těžba nebo odsolování.
- Schopnost odstranit modul reaktoru nebo vyřazení na místě z provozu na konci životnosti.

V roce 2020 IAEA vydala aktualizaci své knihy SMR, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments , s příspěvky od vývojářů zahrnujících více než 70 návrhů.

IAEA má program posuzující koncepční víceaplikační design malého lehkovodního reaktoru (MASLWR) s integrálními parogenerátory, zaměřený na přirozenou cirkulaci chladiva, av roce 2003 zveřejnila americká DOE zprávu o tomto koncepčním návrhu MASLWR. Několik níže uvedených integrálních návrhů PWR má určité podobnosti.

Existuje řada malých modulárních reaktorů, které vyžadují palivo obohacené na horním konci toho, co je definováno jako low-enriched uranium (LEU) – 20 % U-235. Americká rada pro jadernou

infrastrukturu (NIC) vyzvala k tomu, aby se část vojenských HEU snížila pouze na asi 19,75 % U-235, aby byla zajištěna malá zásoba paliva, kterou by bylo jinak velmi obtížné získat (od civilního obohacování rostliny normálně nemohou překročit 5 %). Byla navržena rezerva 20 tun vysoce kvalitního nízko obohaceného uranu (HALEU). NIC uvedla, že jedinou dodávkou paliva pro mnoho vyvíjených pokročilých reaktorů by jinak byl zahraniční obohacený uran. „Bez snadno dostupných domácích dodávek více obohacených LEU v USA bude extrémně obtížné provádět výzkum pokročilých reaktorů. potenciálně tlačí americké inovátory do zámoří.“ V roce 2019 uzavřela DOE smlouvu se společností Centrus Energy na nasazení kaskády velkých odstředivek k výrobě paliva HALEU pro pokročilé reaktory. Urenco USA oznámilo, že je připraveno dodávat HALEU z vyhrazené výrobní linky ve svém závodě v Novém Mexiku.

Americká podpora pro SMR

V lednu 2012 vyzvala DOE k žádostem z průmyslu na podporu vývoje jednoho nebo dvou návrhů lehkovodních reaktorů v USA a vyčlenila 452 milionů USD na pět let prostřednictvím programu SMR Licensing Technical Support (LTS). Byly provedeny čtyři aplikace, od Westinghouse, Babcock & Wilcox, Holtec a NuScale Power, jednotky v rozsahu od 225 do 45 MWe. DOE oznámilo své rozhodnutí v listopadu 2012 podpořit design B&W 180 MWe mPower, který má být vyvinut s Bechtel a TVA. Prostřednictvím pětileté dohody o sdílení nákladů by DOE investovalo až polovinu celkových nákladů na projekt, přičemž průmysloví partneři projektu by tomu alespoň odpovídali. Celková částka bude vyjednána mezi DOE a B&W a DOE zaplatila 111 milionů \$ do konce roku 2014, než oznámila, že finanční prostředky byly odříznuty kvůli B&W odkládání projektu. B&W však nemusí splácet žádné peníze DOE a projekt s maximálním limitem 15 milionů \$ ročně je nyní pod BWX Technologies. Společnost do února 2016 utratila více než 375 milionů dolarů na program mPower.

V březnu 2012 DOE podepsalo dohody se třemi společnostmi, které mají zájem o výstavbu demonstračních malých reaktorů v lokalitě Savannah River v Jižní Karolíně. Tyto tři společnosti a reaktory jsou: Hyperion (nyní Gen4 Energy) s rychlým reaktorem o výkonu 25 MWe, Holtec se 160 MWe PWR a NuScale s výkonem 45 MWe PWR (od té doby zvýšen na 60 MWe a poté na 77 MWe – viz níže) . Dohody se týkaly poskytování pozemků, nikoli financí. DOE diskutovala se čtyřmi dalšími vývojáři malých reaktorů ohledně podobných uspořádání s cílem mít za 10-15 let sadu malých reaktorů, které budou dodávat energii pro komplex DOE. (V letech 1953-1991 byla na řece Savannah postavena a provozována řada produkčních reaktorů pro zbrojní plutonium a tritium.)

V březnu 2013 vyzvala DOE k podávání žádostí o financování ve druhém kole a návrhy předložily Westinghouse, Holtec, NuScale, General Atomics a Hybrid Power Technologies, přičemž poslední dva byly pro EM2 a Hybrid SMR, nikoli PWR. Jiné (non-PWR) návrhy malých reaktorů budou mít skromnou podporu prostřednictvím programu Reactor Concepts RD&D. Pozdní žádost „z levého pole“ byla od společnosti National Project Management Corporation (NPMC), která zahrnuje skupinu regionálních partnerů ve státě New York, jihoafrickou společnost PBMR, a National Grid, britského provozovatele sítě s 3,3 miliony zákazníků. v New Yorku, Massachusetts a Rhode Island.*

* Projekt je pro HTR 165 MWe, zjevně dřívější verzi s přímým cyklem odloženého PBMR, zdůrazňující jeho vlastnosti „hlubokého spalování“ při ničení aktinidů a dosahování vysokého vyhoření při vysokých teplotách. Návrh PBMR byl uchazečem s podporou Westinghouse pro americký projekt jaderné energetiky nové generace (NGNP), který se zastavil přibližně od roku 2010.

V prosinci 2013 DOE oznámilo, že NuScale bude poskytnut další grant na základě podílu 50-50 na nákladech, až do výše 217 milionů \$ po dobu pěti let, na podporu vývoje designu a certifikace NRC a licencování jeho původně malého reaktoru o výkonu 45 MWe. design, následně zvýšen na 60 MWe a poté 77 MWe. V polovině roku 2013 společnost NuScale zahájila Západní iniciativu pro jadernou

energii (WIN) – široká, multi-západní státní spolupráce – ke studiu demonstrace a nasazení vícemodulových elektráren NuScale SMR v západních USA. WIN zahrnuje Energy Northwest (ENW) ve Washingtonu a Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS). Nyní se nazývá projekt bezuhlíkové energie. Demonstrační NuScale SMR postavená jako součást projektu WIN měla být v provozu do roku 2024 v národní laboratoři DOE v Idaho National Laboratory (INL), s UAMPS jako vlastníkem a ENW provozovatelem. Následovala by tam plnohodnotná (původně 12-, ale nyní šestimodulová) továrna ve vlastnictví UAMPS, provozovaná společností Energy Northwest, s cenou 5 000 \$/kW přes noc, tedy asi 3,0 miliardy \$, s očekávanými vyrovnanými náklady. elektřiny (LCOE) ve výši 58 USD/MWh od roku 2030.

V lednu 2014 Westinghouse oznámil, že pozastavuje práce na svých malých modulárních reaktorech ve světle neadekvátních vyhlídek na vícenásobné nasazení. Společnost uvedla, že nemůže ospravedlnit ekonomiku svého JMK bez státních dotací, pokud jich nedokáže dodat 30 až 50. Své plány proto oddalovala, ačkoli malé reaktory zůstávají na programu. V roce 2016 však byla společnost k SMR mnohem pozitivnější. Viz také podsekcce Podpora pro Spojené království níže. V březnu 2017 však BWXT pozastavila práce na návrhu mPower poté, co Bechtel od projektu odstoupil.

Výzkumné a vzdělávací konsorcium pro malý modulární reaktor (Small Modular Reactor Research and Education Consortium) (SmrREC) bylo založeno Missouri University of Science and Technology, aby prozkoumalo ekonomiku nasazení více SMR v zemi. SmrREC zkonstruoval komplexní model potřeb obchodu, výroby a dodavatelského řetězce pro nový jaderný průmysl zaměřený na SMR.

Počátkem roku 2016 vývojáři a potenciální zákazníci pro SMR vytvořili konsorcium SMR Start , aby pokročilo v komercializaci návrhů reaktorů SMR. Mezi členy konsorcia patří Bechtel, BWX Technologies, Dominion, Duke Energy, Energy Northwest, Fluor, GE Hitachi Nuclear Energy, Holtec, NuScale, Ontario Power, PSEG

Nuclear, Southern Nuclear, Tennessee Valley Authority (TVA) a UAMPS. Organizace bude zastupovat společnosti v interakcích s americkou komisí pro jadernou regulaci (NRC), Kongresem a exekutivou v otázkách malých reaktorů. Americký průmyslový orgán Nuclear Energy Institute (NEI) pomáhá při vytváření konsorcia a má s organizací úzce spolupracovat na politikách a prioritách týkajících se technologie malých reaktorů.

SMR Start vyzval k prodloužení programu LTS DOE pro SMR do roku 2025 s navýšením finančních prostředků. Zdůrazňuje: „Soukromé společnosti a DOE investovaly do vývoje SMR více než 1 miliardu USD. Je však zapotřebí více investic prostřednictvím partnerství veřejného a soukromého sektoru, aby bylo zajištěno, že SMR budou v polovině roku 2020 životaschopnou možností. k dosažení veřejného prospěchu z nasazení SMR by federální vláda obdržela návratnost investic prostřednictvím daní spojených s investicemi, vytvářením pracovních míst a ekonomickým výstupem po dobu životnosti zařízení SMR, která by jinak bez investic vlády USA neexistovala.“

V únoru 2016 TVA uvedla, že stále vyvíjí místo v Oak Ridge pro SMR a v květnu požádá o brzké povolení místa (ESP, bez identifikované technologie) pro Clinch River s cílem vybudovat zde kapacitu až 800 MWe. . TVA rozšířila diskuze od B&W o tři další dodavatele lehkovodních SMR. DOE podporuje tuto aplikaci ESP finančně ze svého programu technické podpory licencování SMR a v únoru 2016 DOE uvedla, že se zavázala poskytnout společnosti TVA 36,3 milionu dolarů na bázi sdílení nákladů.

V únoru 2021 TVA zveřejnila oznámení o záměru připravit programové prohlášení o dopadu na životní prostředí o potenciálních dopadech výstavby, provozu a vyřazení z provozu technologického parku pokročilých jaderných reaktorů v Clinch River. Park by obsahoval jeden nebo více pokročilých jaderných reaktorů s celkovým elektrickým výkonem až 800 MWe.

Další oblast vývoje malých reaktorů podporuje Agentura pro pokročilé výzkumné projekty DOE – Energy (ARPA-E) zřízená zákonem z roku 2007. To se zaměřuje na energetické technologie s vysokým potenciálem a velkým dopadem, které jsou příliš brzy na investice soukromého sektoru. ARPA-E nyní zahajuje nový štipný program pro zkoumání technologií mikroreaktorů, pod 10 MWe. To bude vyžadovat návrhy výzkumných a vývojových projektů pro takové reaktory, které musí mít velmi vysoké bezpečnostní a bezpečnostní rozpětí (včetně autonomních provozů), být odolné proti šíření, cenově dostupné, mobilní a modulární. Mezi cílené aplikace patří vzdálené lokality, záložní napájení, námořní doprava, vojenské instalace a vesmírné mise.

DOE v roce 2015 založilo iniciativu Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear (GAIN) vedenou Idaho National Laboratory (INL) „s cílem poskytnout nové komunitě v oblasti jaderné energetiky přístup k technické, regulační a finanční podpoře nezbytné k posunu nových návrhů jaderných reaktorů směrem k komercializaci. GAIN je založen na vzájemné vazbě od jaderné komunity a poskytuje jediný přístupový bod k široké škále schopností – lidí, zařízení, infrastruktury, materiálů a dat – napříč ministerstvem energetiky a jeho národními laboratořemi.“ V lednu 2016 poskytla DOE granty ve výši až 40 milionů USD společnosti X-energy na svůj Xe-100 HTR s obložkovým ložem a společnosti Southern Company na projekt rychlého reaktoru s roztaveným chloridem (MCFR) vyvíjený ve spolupráci s TerraPower a Oak Ridge National Laboratory (ORNL).

V polovině roku 2016 DOE poskytla GAIN granty na poukázky na jadernou energii v celkové výši 2 miliony USD, včetně společnosti Terrestrial Energy s Argonne National Laboratory, Transatomic Power s ORNL a Oklo Inc s Argonne a INL na jejich příslušné návrhy reaktorů. V polovině roku 2017 bylo uskutečněno druhé kolo grantů GAIN poukázek v celkové výši 4,2 milionu USD, včetně společnosti

Terrestrial a Transatomic Power s Argonne, SMR Inventec společnosti Holtec pro SMR-160 v ORNL, Oklo Inc se Sandia a Argonne a Elysium s INL a Argonne.

V dubnu 2018 vybrala DOE 13 projektů, které získají 60 milionů dolarů ze sdíleného financování výzkumu a vývoje pro pokročilé jaderné technologie, včetně prvních ocenění v rámci iniciativy US Industry Opportunities for Advance Nuclear Technology Development.

V září 2018 prošel Kongresem zákon o inovačních schopnostech jaderné energetiky a zákon o ministerstvu energetického výzkumu a inovací. První umožňuje soukromým a veřejným institucím provádět civilní výzkum a vývoj pokročilých technologií jaderné energetiky. Konkrétně zákon zřídil Národní inovační centrum reaktorů, aby usnadnilo umístění soukromě financovaných prototypů pokročilých reaktorů na místech DOE prostřednictvím partnerství mezi DOE a soukromým průmyslem. Druhý zákon spojuje sedm dříve schválených vědeckých zákonů, aby poskytlo politické vedení DOE v oblasti výzkumu a vývoje jaderné energie.

V říjnu 2018 DOE oznámilo, že navrhuje přeměnit kovový vysoce obohacený uran (HALEU) s úrovněmi obohacení mezi 5 % a 20 % U-235 na palivo pro účely výzkumu a vývoje. To by bylo v komplexu materiálů a paliv v Idaho National Laboratory a/nebo v Idaho Nuclear Technology and Engineering Center, aby se podpořil vývoj nových technologií reaktorů s vyšší účinností a delší životností aktivní zóny.

Americká jaderná regulační komise (NRC) vydala návrh bílé knihy o své strategii pro přezkoumání licenčních aplikací pro pokročilé technologie nelehkých vodních reaktorů. NRC uvedlo, že očekává dokončení návrhu dokumentu do listopadu, přičemž první žádost mimo LWR by měla být předložena do prosince 2019. Do poloviny roku 2019 bylo NRC formálně oznámeno šesti konstruktéry reaktorů o jejich záměru požádat o schválení návrhu. Jednalo se o tři MSR,

jeden HTR, jeden FNR a tepelnou trubku Westinghouse eVinci. V prosinci 2019 vybrala Kanadská komise pro jadernou bezpečnost (CNSC) a US NRC Integral Molten Salt Reactor (IMSR) společnosti Terrestrial Energy pro první společnou technickou revizi pokročilého, nelehkého vodního jaderného reaktoru.

V květnu 2020 spustilo DOE Program demonstrace pokročilých reaktorů (ARDP), který nabízí finanční prostředky, zpočátku 160 milionů dolarů, na základě sdílení nákladů na výstavbu dvou pokročilých reaktorů, které by mohly být v provozu do sedmi let. ARDP soustředí zdroje na návrhy, které jsou „cenově dostupné“ pro stavbu a provoz. Program by se také rozšířil na snižování rizik pro budoucí demonstrace a zahrnoval by podporu v rámci cesty Advanced Reactor Concepts 2020 pro inovativní a různorodé návrhy s potenciálem být komerční v polovině 30. let 20. století. Testování a hodnocení pokročilých technologií by se provádělo v Národním centru pro inovace reaktorů (NRIC) Národní laboratoře v Idahu. NRIC začalo v srpnu 2019 jako součást iniciativy DOE Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear (GAIN), jehož cílem je urychlit vývoj a komercializaci pokročilých jaderných technologií. V říjnu 2020 byly společností TerraPower a X-energy poskytnuty granty ve výši 80 milionů USD na výstavbu demonstračních závodů, které mohou být v provozu do sedmi let.

V prosinci 2020 oznámila DOE počáteční financování ve výši 30 milionů USD v rámci ARDP pro pět amerických týmů vyvíjejících dostupné technologie reaktorů, které mají být nasazeny v průběhu 10-14 let: Kairos Power pro Hermes Reduced-Scale Test Reactor, zmenšenou verzi jeho reaktoru, vysokoteplotní reaktor chlazený fluoridovou solí (KP-FHR); Westinghouse pro mikroreaktor eVinci; BWXT Advanced Technologies pro BWXT Advanced Nuclear Reactor (BANR); Holtec pro svůj SMR-160; a Southern Company za svůj Molten Chloride Reactor Experiment, projekt reaktoru o výkonu 300

kWt, který má poskytnout data pro návrh demonstračního rychlého reaktoru s roztaveným chloridem (MCFR) využívajícího technologii TerraPower.

DOE plánuje postavit v Idahu reaktor MARVEL (Microreactor Applications Research Validation and Evaluation), mikroreaktor o výkonu 100 kWt. Je navržen tak, aby prováděl výzkum a vývoj různých provozních funkcí mikroreaktorů za účelem zlepšení jejich integrace s aplikacemi koncových uživatelů a je popsán na informační stránce [Research Reactors](#).

V listopadu 2021 mimo jiné projekty pokročilých reaktorů financovala DOE druhou fází studie o potenciálu malých reaktorů v Portoriku na dvou navrhovaných místech.

NuScale oznámila, že DOE v roce 2022 bude financovat ukrajinské Státní vědecké a technické centrum pro jadernou a radiační bezpečnost, aby provedlo nezávislou revizi zprávy NuScale Power o bezpečnostní analýze její technologie SMR. Recenze bude přístupná všem ukrajinským utilitám, které mají zájem o nasazení SMR.

V srpnu 2022 program DOE Nuclear Energy University poskytl finanční prostředky společností CORE POWER a INL na výzkum ekonomických a ekologických přínosů plovoucí pokročilé výroby jaderné energie.

V lednu 2023 NRC vydalo konečné pravidlo pro poslední fázi procesu certifikace návrhu, certifikující SMR společnosti NuScale Power a umožňující společnosti odkazovat se na návrh při žádosti o kombinovanou licenci na stavbu a provoz jaderné elektrárny kdekoli v USA.

Podpora ve Spojeném království pro SMR

Vláda Spojeného království v roce 2014 zveřejnila zprávu o konceptech SMR, proveditelnosti a potenciálu ve Spojeném království. Vyrobilo ho konsorcium vedené Národní jadernou

laboratoří (NNL). V návaznosti na to má druhá fáze práce poskytnout technickou, finanční a ekonomickou důkazní základnu potřebnou k podpoře politického rozhodnutí o SMR. Pokud by budoucí rozhodnutí mělo pokračovat ve vývoji a zavádění SMR ve Spojeném království, pak by bylo třeba provést další práci na politice a komerčním přístupu k jejich poskytování, což by mohlo vést k procesu výběru technologie pro posouzení generického designu ve Spojeném království (GDA).

V březnu 2016 britské ministerstvo energetiky a změny klimatu (DECC) vyzvalo k vyjádření zájmu v soutěži o určení nejhodnotnějšího SMR pro Spojené království. To souvisí s oznámením vlády z listopadu 2015, že investuje nejméně 250 milionů liber během pěti let do jaderného výzkumu a vývoje včetně SMR. DECC uvedlo, že cílem počáteční fáze bylo „měřit tržní zájem mezi vývojáři technologií, utilitami, potenciálními investory a sponzory o vývoj, komercializaci a financování SMR ve Spojeném království“. Uvedla, že počáteční fází bude „strukturovaný dialog“ mezi vládou a účastníky za použití zveřejněného souboru kritérií, včetně toho, že návrh SMR musí „být navržen pro výrobu a montáž,

V prosinci 2017 oznámilo Department for Business, Energy & Industrial Strategy (BEIS), nástupnické oddělení DECC, že soutěž JMK byla uzavřena. Místo toho byla zahájena soutěž o nový dvoufázový pokročilý modulární reaktor, navržený tak, aby zahrnoval širší škálu typů reaktorů. Celkové financování projektu proveditelnosti a rozvoje pokročilého modulárního reaktoru (AMR) činí až 44 milionů GBP a do původního termínu 7. února 2018 bylo obdrženo 20 nabídek. V září 2018 bylo oznámeno, že následujících osm organizací byly uděleny smlouvy až do výše 300 000 GBP na vypracování studií proveditelnosti pro první fázi projektu AMR F&D: Advanced Reactor Concepts (ARC-100); DBD (zastupující HTR-PM Čínského institutu jaderných a nových energetických technologií); LeadCold (SEALER-UK); Moltex Energy (stabilní solný reaktor);

Tokamak Energy (kompaktní sférický modulární fúzní reaktor); Vývoj U-Baterie (U-Baterie); Ultra Safe Nuclear (mikromodulární reaktor); a Westinghouse (Westinghouse LFR).

V červenci 2020 společnost BEIS v rámci svého programu AMR udělila 10 milionů GBP každému z: Westinghouse za jeho 450 MWe LFR; konsorcium U-Battery pro své 4 MWe HTR; a Tokamak Energy za projekt kompaktního fúzního reaktoru. Dalších 5 milionů liber bude určeno pro britské společnosti a začínající podniky na vývoj nových způsobů výroby pokročilých jaderných dílů pro projekty modulárních reaktorů doma i v zahraničí. Dalších 5 milionů liber má posílit jaderný regulační režim země, protože se zabývá pokročilými jadernými technologiemi, jako jsou tyto.

V březnu 2019 vydala BEIS zprávu o mikroreaktorech za rok 2016 , která je definovala jako s kapacitou až 100 MWt/30 MWe a projektující celosvětový trh pro přibližně 570 jednotek o průměru 5 MWe do roku 2030, celkem 2850 MWe. Poznámává, že obecně nejsou vodou moderované nebo vodou chlazené, ale "používají kompaktní reaktor a uspořádání výměny tepla, často integrované v jediné reaktorové nádobě." Většina jsou HTR.

V roce 2015 Westinghouse představil návrh „modelu sdíleného designu a vývoje“, v jehož rámci by společnost přispěla svým koncepčním návrhem SMR a poté se spojila s vládou a průmyslem Spojeného království na jeho dokončení, licenci a nasazení. Partnerství by bylo strukturováno jako Spojené království - podnik společně vlastněný Westinghouse, vládou Spojeného království a britským průmyslem. V říjnu 2016 společnost uvedla, že bude spolupracovat s britským stavitelem lodí Cammell Laird a také s britským výzkumným střediskem Nuclear Advanced Manufacturing Research Center (NAMRC) na studii prozkoumat potenciální efektivitu designu ke zkrácení dodacích dob svého SMR.

Společnost NuScale uvedla, že má za cíl nasadit svou technologii SMR ve Spojeném království s britskými partnery, aby první z jejich jednotek mohly být v provozu do poloviny roku 2020. V září 2017 společnost vydala svůj pětibodový akční plán Spojeného království SMR. Rolls-Royce předložil vládě podrobný návrh bloku SMR o výkonu 220 MWe.

V listopadu 2021 vláda Spojeného království oznámila, že přispěje 210 milionů GBP v grantovém financování Rolls-Royce SMR, aby odpovídala soukromým investicím do tohoto podniku. Rolls-Royce Group, BNF Resources UK a Exelon Generation do něj během zhruba tří let investují 195 milionů liber. Rolls-Royce uvedl, že divize SMR, která bude i nadále usilovat o další investice, bude nyní „rychle pokračovat v řadě paralelních doručovacích činností, včetně vstupu do britského procesu generic design assessment (GDA) a identifikace míst pro továrny, které budou vyrábět. moduly, které umožňují montáž elektráren na místě." Reaktor je určen pro výrobu vodíku a syntetických paliv a také pro výrobu elektřiny. Konsorcium Rolls-Royce SMR, které zahrnuje mnoho velkých britských strojírenských firem, má za cíl postavit 16 reaktorů,

V listopadu 2022 Rolls-Royce oznámil, že určil čtyři prioritní místa pro výstavbu elektráren na bázi SMR ve Spojeném království, včetně Trawsfynydd, Wylfa a Oldbury. Všechny lokality jsou na pozemcích ve vlastnictví britského úřadu pro vyřazení jaderných zařízení z provozu (NDA). Než se NDA zaváže k vývoji SMR, musí nejprve udělit souhlas Ministerstvo obchodu, energetiky a průmyslové strategie.

Kanadská podpora pro SMR

Zpráva z června 2016 pro ministerstvo energetiky Ontaria se zaměřila na devět návrhů pod 25 MWe pro vzdálené lokality mimo síť. Všechny měly střední úroveň technologické připravenosti a očekávalo se, že budou konkurenceschopné vůči dieselu. Dvě konstrukce byly integrální PWR o výkonu 6,4 a 9 MWe, tři byly HTR

o výkonu 5, 8 a 16 MWe, dva byly sodíkem chlazené rychlé reaktory (SFR) 1,5/2,8 a 10 MWe, jeden byl olovem chlazený rychlý reaktor (LFR) 3-10 MWe a jeden byl MSR 32,5 MWe. Čtyři byly pod 5 MWe (SFR, LFR a dva HTR). Ontario rozlišuje SMR nad 25 MWe v „síťovém měřítku“ od těchto (velmi) malých reaktorů.

Kanadská komise pro jadernou bezpečnost (CNSC) provádí předlicenční přezkoumání návrhu dodavatele – volitelnou službu pro posouzení návrhu jaderné elektrárny založené na technologii reaktoru dodavatele – pro deset* malých reaktorů s kapacitou v rozmezí 3–300 MWe. . Pro HTR StarCore a eVinci od Westinghouse se vyjednávají dvě další dohody o přezkoumání návrhu. V květnu 2021 zahájila formální revizi licence na 15 MWt MMR-5 pro Global First Power (společný podnik Ultra Safe Nuclear Corporation a Ontario Power Generation).

* IMSR společnosti Terrestrial Energy; USNC MMR-5 a MMR-10; LeadCold Nuclear's SEALER; ARC-100 společnosti ARC Nuclear; Stabilní solný reaktor Moltex; SMR's SMR-160; napájecí modul NuScale; U-baterie U-Battery, BWRX-300 GE Hitachi; Xe-100 od X-energy.

V červnu 2017 Canadian Nuclear Laboratories (CNL) vyzvaly k vyjádření zájmu o SMR. To vedlo k mnoha odpovědím, včetně 19 odpovědí za umístění demonstračního nebo prototypového reaktoru na místě spravovaném CNL. CNL si klade za cíl mít do roku 2026 nový SMR na svém místě u Chalk River. Global First Power se svými partnery Ontario Power Generation a Ultra-Safe Nuclear Corporation se jako první dostaly do třetí fáze hodnocení umístění CNL se svým MMR, 5 MWe HTR. V únoru 2019 společnost CNL oznámila, že StarCore Nuclear a Terrestrial Energy se kvalifikovaly pro vstup do due diligence (druhé) fáze hodnocení jejich umístění pro jejich 14 MWe HTR a 195 MWe IMSR.

V listopadu 2019 CNL oznámila, že Kairos Power, Moltex Canada, Terrestrial Energy a Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC) byly vybrány jako první příjemci podpory v rámci své iniciativy Canadian Nuclear Research Initiative (CNRI). To je navrženo tak, aby urychlilo

nasazení SMR tým, že umožní výzkum a vývoj na konkrétních projektech a propojí globální dodavatele technologie SMR se zařízeními a odbornými znalostmi v rámci kanadských národních jaderných laboratoří. Očekává se, že příjemci budou odpovídat hodnotě, kterou vložila CNL v peněžních nebo naturálních příspěvcích.

V listopadu 2018 vydala kanadská vláda svůj SMR Roadmap, 10měsíční celostátní studii technologie SMR. Zpráva dochází k závěru, že vývoj SMR generace IV je reakcí na tržní síly pro „menší, jednodušší a levnější“ jadernou energii a velký globální trh s touto technologií bude „poháněn nejen změnou klimatu a politikou čisté energie, ale také imperativy energetické bezpečnosti a přístupu.“ V říjnu 2020 oznámil ministr pro inovace, vědu a průmysl investici 20 milionů kanadských dolarů do pozemské energie s cílem urychlit vývoj jejího Integrovaného reaktoru na roztavenou sůl (IMSR), prvního grantu z kanadského strategického inovačního fondu.

V prosinci 2019 se Saskatchewan a New Brunswick dohodly na spolupráci s Ontariem při podpoře regionů SMR s cílem „odemknout ekonomický potenciál v celé Kanadě, včetně venkovských a odlehlých regionů“ v souladu s národním plánem SMR. V srpnu 2020 se připojila Alberta a upozornila na potenciál využití SMR pro průmysl severních ropných písků v provincii. Dohoda má také řešit klíčové otázky pro zavádění SMR, včetně technologické připravenosti, regulačních rámců, ekonomiky a financování, nakládání s jaderným odpadem a zapojení veřejnosti a domorodých obyvatel. V roce 2021 největší producenti ropných písků v Albertě vytvořili alianci, aby zvážili způsoby, jak do roku 2050 dosáhnout čistých nulových emisí skleníkových plynů, přičemž součástí prostředků jsou SMR.

V říjnu 2020 Ontario Power Generation (OPG) oznámila, že bude pokračovat v inženýrské a projektové práci se třemi vývojáři síťových SMR – GE Hitachi (GEH), Terrestrial Energy a X-energy – na podporu energetických potřeb vzdálených oblastí. Důraz je kladen na 300 MWe BWRX-300 společnosti GEH, integrovaný reaktor na

roztavenou sůl společnosti Terrestrial o výkonu 192 MWe a vysokoteplotní SMR Xe-100 společnosti X-energy o výkonu 80 MWe. Všechny tři jsou ve fázi 2 procesu přezkoumání návrhu dodavatele CNSC. GEH zakládá kanadský dodavatelský řetězec pro svůj BWRX-300.

V listopadu 2020 se k New Brunswick Power a Moltex Energy připojil ARC Canada při zřizování clusteru prodejců SMR v Point Lepreau a v březnu 2021 kanadská vláda oznámila podporu ve výši 56 milionů kanadských dolarů, většinou pro Moltex Stable Salt Reactor – Wasteburner (projekt SSR-W).

Čínská podpora pro SMR

Nejpokročilejší projekt malého modulárního reaktoru je v Číně, kde Chinergy začíná stavět 210 MWe HTR-PM, který se skládá ze dvou 250 MWt vysokoteplotních plynem chlazených reaktorů (HTR), které staví na zkušenostech několika inovativních reaktorů v 60. až 80. léta 20. století.

CNNC New Energy Corporation, společný podnik CNNC (51 %) a China Guodian Corp, propaguje reaktor ACP100. V dubnu 2020 byla schválena předběžná zpráva o bezpečnostní analýze pro jednoblokovou demonstrační elektrárnu v Changjiang.

Čína však také vyvíjí malé reaktory dálkového vytápění s kapacitou 100 až 200 MWt, které mohou mít silný potenciál odhadovaný na přibližně 400 jednotek. Trh s teplem je v severní Číně velmi velký, nyní je téměř výhradně zásobován uhlím, což způsobuje vážné znečištění, zejména prachem, částicemi, sírou a oxidy dusíku.

Celkově je výzkum a vývoj SMR v Číně velmi aktivní, se silnou konkurencí mezi společnostmi podporujícími inovace.

Ostatní země

Společnost Urenco vyzvala k evropskému vývoji velmi malých – 4 MWe – „plug and play“ inherentně bezpečných reaktorů založených na konceptech HTR moderovaných grafitem. Uchází se o vládní podporu pro prototyp „U-Battery“, který by běžel 5–10 let, než bude vyžadovat doplnění paliva nebo servis.

V odlehlém koutě Sibíře již fungují čtyři malé jednotky v kogenerační elektrárně Bilibino. Tyto čtyři 62 MWt (tepelné) jednotky jsou neobvyklým grafitem moderovaným designem vařící vody s vodními/párovými kanály přes moderátor. Vyrábí páru pro dálkové vytápění a 11 MWe (netto) elektřinu každý, vzdáleně od jakékoli sítě. Jsou nejmenšími komerčními energetickými reaktory na světě a fungují dobře od roku 1976, mnohem levněji než alternativy fosilních paliv v drsném klimatu této arktické oblasti, ale do roku 2023 mají být vyřazeny.

Při pohledu do budoucna a kromě těch namontovaných na člunech není Rosatom k malým reaktorům obecně pozitivní.

V kategorii malých reaktorů jsou také indické 220 MWe tlakové těžkovodní reaktory (PHWR) založené na kanadské technologii a čínské 300-325 MWe PWR, které byly postaveny ve fázi I Qinshan a v Chashma v Pákistánu a nyní nazývané CNP-300. . Společnost Nuclear Power Corporation of India (NPCIL) se nyní zaměřuje na verze PHWR s výkonem 540 MWe a 700 MWe a mezinárodně nabízí verze 220 a 540 MWe. Tyto malé zavedené návrhy jsou relevantní pro situace vyžadující malé až střední jednotky, i když se nejedná o nejmodernější technologii.

Další významnou linií vývoje jsou velmi malé rychlé reaktory pod 50 MWe. Některé jsou koncipovány pro oblasti mimo přenosové sítě a s malým zatížením; jiné jsou navrženy tak, aby fungovaly v klastrech, které konkurují velkým jednotkám.

Další, většinou větší nové konstrukce jsou popsány na informační stránce [Advanced Nuclear Power Reactors](#) .

V prosinci 2019 ČEZ v České republice uvedl, že se zaměřuje na 11 návrhů SMR včetně těchto sedmi: Rosatom RITM-200, GE Hitachi Nuclear Energy BWRX-300, NuScale Power SMR, ACP100 od China National Nuclear Corporation, argentinský CAREM, jihokorejský a SMR-160 společnosti Holtec International.

Malé reaktory v provozu

název	Kapacita	Typ	Vývojář
CNP-300	300 MW	PWR	SNERDI/CNNC, Pákistán a Čína
PHWR-220	220 MW	POW	NPCIL, Indie
EGP-6	11 MWe	KORUPCE	v Bilibino na Sibiři (cogen, brzy do důchodu)
KLT-40S	35 MWe	PWR	OKBM, Rusko
RITM-200	50 MW	Integrální PWR, civilní námořní	OKBM, Rusko

Návrhy malých reaktorů ve výstavbě

název	Kapacita	Typ	Vývojář
CAREM25	27 MWe	Integrální PWR	CNEA & INVAP, Argentina
HTR-PM	210 MW	Twin HTR	INET, CNEC a Huaneng, Čína
ACP100/Linglong One	125 MW	Integrální PWR	CNNC, Čína
BREST	300 MW	Olovo FNR	RDIPE, Rusko

Malé reaktory pro krátkodobé nasazení – vývoj velmi pokročil

název	Kapacita	Typ	Vývojář
VBER-300	300 MW	PWR	OKBM, Rusko
Napájecí modul NuScale	77 milionů lidí	Integrální PWR	NuScale Power + Fluor, USA

název	Kapacita	Typ	Vývojář
SMR-160	160 MW	PWR	Holtec, USA + SNC-Lavalin, Kanada
CHYTRÝ	100 MW	Integrální PWR	KAERI, Jižní Korea
BWRX-300	300 MW	BWR	GE Hitachi, USA
HRANOL	311 MWe	FNR sodíku	GE Hitachi, USA
Sodík	345 milionů lidí	FNR sodíku	TerraPower + GE Hitachi, USA
ARC-100	100 MW	FNR sodíku	ARC s GE Hitachi, USA
Integrální MSR	192 milionů lidí	MSR	Terrestrial Energy, Kanada
Seaborg CMSR	100 MW	MSR	Seaborg, Dánsko
Prototyp Hermes	35 MW	MSR-Triso	Kairos, USA
RITM-200M	50 MW	Integrální PWR	OKBM, Rusko
RITM-200N	55 MWe	Integrální PWR	OKBM, Rusko
BANDI-60S	60 MWe	PWR	Kepeco, Jižní Korea
Vozidlo-100	80 MWe	HTR	X-energie, USA
ACPR50S	60 MWe	PWR	CGN, Čína
Moltex SSR-W	300 MW	MSR	Moltex, Spojené království

Návrhy malých reaktorů v dřívějších fázích (nebo odložené)

název	Kapacita	Typ	Vývojář
EM2	240 MW	HTR, FNR	General Atomics (USA)
FMR	50 MW	HTR, FNR	General Atomics + Framatome
VK-300	300 MW	BWR	NIKIET, Rusko
AHWR-300 LEU	300 MW	POW	BARC, Indie
CAP200 LandStar-V	220 MW	PWR	SNERDI/SPIC, Čína
SNP 350	350 MW	PWR	SNERDI, Čína

název	Kapacita	Typ	Vývojář
ACPR100	140 MW	Integrální PWR	CGN, Čína
IMR	350 MW	Integrální PWR	Mitsubishi Heavy Ind, Japonsko*
Westinghouse SMR	225 MW	Integrální PWR	Westinghouse, USA*
mPower	195 milionů lidí	Integrální PWR	BWXT, USA*
Spojené království SMR	470 MW	PWR	Rolls-Royce SMR, Velká Británie
PBMR	165 MWe	HTR	PBMR, Jižní Afrika*
HTMR-100	35 MWe	HTR	HTMR Ltd, Jižní Afrika
MCFR	velký?	MSR/FNR	Southern Co, TerraPower, USA
SVBR-100	100 MW	Olovo-Bi FNR	AKME-Engineering, Rusko*
Westinghouse LFR	300 MW	Olovo FNR	Westinghouse, USA
TMSR-SF	100 MW	MSR	Čína
PB-FHR	100 MW	MSR	UC Berkeley, USA
Moltex SSR-U	150 MW	MSR/FNR	Moltex, Spojené království
Thorcon TMSR	250 MW	MSR	Martingale, USA
Leadir-PS100	36 MWe	Chlazený olovem	Northern Nuclear, Kanada

Vyvíjejí se návrhy velmi malých reaktorů (až 25 MWe)

název	Kapacita	Typ	Vývojář
U-baterie	4 MWe	HTR	Konsorcium vedené společností Urenco, Spojené království
hvězdné jádro	10-20 MW	HTR	Starcore, Quebec
MMR-5/-10	5 nebo 10 MWe	HTR	UltraSafe Nuclear, USA
Holos Quad	3-13 MWe	HTR	HolosGen, USA

název	Kapacita	Typ	Vývojář
Modul Gen4	25 MWe	Olovo-bismut FNR	Gen4 (Hyperion), USA
Vozidlo-mobilní	1-5 MWe	HTR	X-energie, USA
BANR	50 MW	HTR	BWXT, USA
Sealer	3-10 MW	Olovo FNR	LeadCold, Švédsko
eVinci	0,2-5 MWe	Heatpipe FNR	Westinghouse, USA
Aurora	1,5 MWe	Heatpipe FNR	Oklahoma, USA
NuScale micro	1-10 MW	Heatpipe	NuScale, USA

Viz také [pokroky IAEA ve vývoji technologie malých modulárních reaktorů](#), [Dodatek k: IAEA Advanced Reactors Information System \(ARIS\)](#), vydání 2020 .

** Dobře pokročilé návrhy, které jsou považovány za pozastavené nebo opuštěné.*

Vojenský vývoj malých energetických reaktorů od 50. let 20. století

Americké zkušenosti a plány

Zhruba před pěti desetiletími postavila americká armáda osm reaktorů, pět z nich přenosných nebo mobilních. PM1 úspěšně napájel vzdálenou radarovou stanicí protivzdušné/raketové obrany na vrcholu hory poblíž Sundance ve Wyomingu po dobu šesti let do roku 1968 a poskytoval výkon 1 MWe. V Camp Century v severním Grónsku byl PM-2A o výkonu 10 MWt, 1,56 MWe plus 1,05 GJ/h sestaven z prefabrikovaných komponentů a běžel v letech 1960-64 na vysoce obohacené uranové palivo. Dalším byl reaktor PM-3A o výkonu 9 MWt, 1,5 MWe (netto), který fungoval v McMurdo Sound v Antarktidě v letech 1962-72, generoval celkem 78 milionů kWh a poskytoval teplo. Používala vysoce obohacené uranové palivo a bylo do ní tankováno jednou, v roce 1970. MH-1A byla první plovoucí

jaderná elektrárna provozovaná v zóně Panamského průplavu v letech 1968-77 na přestavěné lodi Liberty. Měl 45 MWt/10 MWe (netto) jednosmyčkovou PWR, která používala nízko obohacený uran (4-7 %). Během deseti let spotřeboval 541 kg U-235 a poskytoval energii po dobu devíti let při kapacitním faktoru 54 %.

ML-1 byla menší a inovativnější 0,3 MWe mobilní elektrárna s vodou moderovanou HTR využívající stlačený dusík při 650 °C k pohonu Braytonovy plynové turbíny s uzavřeným cyklem. Používal HEU ve shluku 19 kolíků, jádro bylo 56 cm vysoké a 56 cm průměr. Byl testován v letech 1962-66 v Idahu. Byl velký asi jako standardní přepravní kontejner a byl pojízdný nákladním automobilem a přepravitelný vzduchem, s 12hodinovou přípravou. Řídicí jednotka byla samostatná, měla být umístěna 150 m daleko.

To vše byly výsledky Armádního jaderného energetického programu (ANPP) pro vývoj malých reaktorů – 0,1 až 40 MWe – který probíhal v letech 1954-77. ANPP se stal Army Reactor Office (ARO) v roce 1992. Nedávno (2010) byl DEER (Deployable Electric Energy Reactor) komercializován Radix Power & Energy pro předsunuté vojenské základny nebo vzdálené těžební lokality. Viz další pododdíl .

Zpráva americké armády z roku 2018 analyzovala potenciální přínosy a výzvy mobilních jaderných elektráren (MNPP) s technologií velmi malých modulárních reaktorů (vSMR). Stalo se tak po zprávě z roku 2016 o energetických systémech pro dopředné/vzdálené operační základny . Účelem je snížit zranitelnost nabídky a provozní náklady a zároveň poskytnout udržitelnou možnost snížení poptávky po ropě a následné zranitelnosti. MNPP by byly přenosné kamiony nebo velkými letadly a pokud by byly v zahraničí, vrátily by se do USA k doplnění paliva po 10–20 letech. Byly by nakládány a běžely by na nízko obohacený uran (<20 %), pravděpodobně jako TRISO (tristructural-isotropic) palivo ve vysokoteplotních plynem chlazených reaktorech (HTR).

V lednu 2019 si Úřad pro strategické schopnosti ministerstva obrany (DOD) vyžádal návrhy na návrh „malého mobilního reaktoru“, který by mohl řešit potřeby elektrické energie ve scénářích rychlé reakce – projekt Pele. Ty by učinily domácí infrastrukturu odolnější vůči útoku na elektrickou síť a změnily logistiku předsunutých operačních základen, a to jak zpřístupněním více energie, tak zjednodušením logistiky paliva potřebné k podpoře stávajících, většinou diesellových generátorů. Umožnily by také rychlejší reakci během humanitární pomoci a operací na pomoc při katastrofách. "Malé mobilní jaderné reaktory mají potenciál stát se všeobecným změnou strategické hry pro DOD tím, že zachraňují životy, šetří peníze a dávají vojákům v poli prvotřídní zdroj energie se zvýšenou flexibilitou a funkčností."

Každý reaktor by měl být HTR s vysoce kvalitním nízkoobohaceným uranem (HALEU) TRISO palivem a produkovat prahový výkon 1-10 MWe po dobu nejméně tří let bez doplňování paliva. Musí vážit méně než 40 tun a být dimenzován pro přepravu kamionem, lodí a letadlem C-17. Návrhy musí být „inherentně bezpečné“, zajišťující, že roztavení je „fyzicky nemožné“ v různých scénářích úplného selhání, jako je ztráta napájení nebo chlazení, a musí používat okolní vzduch jako konečný chladič a musí být také schopné pasivního chlazení. Reaktor musí být schopen instalace do bodu „přidání tepla“ do 72 hodin a dokončení plánované odstávky, ochlazení, odpojení a odstranění transportu za méně než sedm dní. DOD oznámilo, že připravuje prohlášení o dopadu reaktoru na životní prostředí v březnu 2020 a udělilo třem společnostem kontrakty v hodnotě 12–14 milionů dolarů na počáteční projektové práce. Poté byly v březnu 2021 vybrány společnosti BWXT Advanced Technologies a X-energy, aby do března 2022 vyvinuly konečný technický návrh. Společnost Westinghouse odstoupila a jedna ze dvou společností může být v roce 2022 pověřena výstavbou prototypu reaktoru.

Ministerstvo obrany v březnu 2021 uvedlo, že projekt Pele je na cestě k testování plného výkonu mobilního reaktoru v roce 2023 s venkovním mobilním testováním prototypu mikroreaktoru

postaveného v Idaho National Laboratory nebo Oak Ridge National Laboratory v roce 2024. Program je také určen k podpoře komerčního rozvoje HTR. V září 2021 vydal DOD návrh prohlášení o vlivu na životní prostředí pro stavbu a demonstrační provoz prototypu mobilního mikroreaktoru.

V říjnu americké letectvo oznámilo, že jeho první mikroreaktor bude na letecké základně Eielson na Aljašce poblíž Fairbanks a bude uveden do provozu v roce 2027. Nezdá se, že by to bylo součástí projektu Pele. Základna má již vlastní uhelnou elektrárnu o výkonu 15 MWe s železnicí pro zásobování palivem.

ruské zkušenosti

Společný ústav pro energetiku a jaderný výzkum (Sosny) v Bělorusku postavil dva malé vzduchem chlazené jaderné reaktory Pamir-630D namontované na nákladním vozidle v roce 1976, během sovětské éry. Celý závod si vyžádal několik nákladních aut. Jednalo se o 5 MWt/0,6 MWe HTR reaktor využívající 45% obohacené palivo s moderátorem hydridu zirkonia a pohánějící plynovou turbínu s oxidem dusným během Braytonova cyklu. Po určitých provozních zkušenostech byl projekt Pamir v letech 1985-86 vyřazen. Předcházela mu 1,5 MWe TES-3, PWR namontovaný na čtyřech těžkých podvozcích tanků, každý s vlastním pohonem, s moduly (reaktor, parogenerátor, turbína, řízení) spojenými na místě. Prototyp byl spuštěn v roce 1961 v Obninsku, provozován do roku 1965 a byl opuštěn v roce 1969.

Od roku 2010 Sosny spolupracuje s Luch Scientific Production Association (SRI SIA Luch) a ruským NA Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering (NIKIET nebo RDIPE) na návrhu malého přenosného jaderného reaktoru. Nový design bude HTR koncept podobný Pamíru, ale asi 2,5 MWe.

Malý ruský HTR, který byl vyvinut společností NIKIET, je Modulární přenosný malý energetický jaderný reaktor (MTSPNR) pro zásobování teplem a elektřinou odlehlých regionů. Je popsán jako

jednookruhový vzduchem chlazený HTR s uzavřeným cyklem plynové turbíny. Používá palivo obohacené o 20 % a je navrženo tak, aby fungovalo 25 let bez doplňování paliva. Dvoubloková elektrárna dodává 2 MWe a/nebo 8 GJ/h. Je také známý jako GREM. Nejsou k dispozici žádné aktuální informace, ale předchůdcem je Pamír z Běloruska. Nedávno NIKIET popsal ATGOR – přenosný HTR s až šesti paralelními komerčními motory s plynovou turbínou se dvěma nezávislými zdroji tepla (jaderný reaktor a spouštěcí spalovací komora na naftový pohon).

Dalším projektem společnosti NIKIET je modulární integrální lehkovodní reaktor Vityaz o výkonu 6 MWt a 1 MWe se dvěma turbínovými generátory, který lze přepravovat jako čtyři moduly o hmotnosti až 60 tun.

V roce 2015 bylo oznámeno, že ruské ministerstvo obrany zadalo vývoj malých mobilních jaderných elektráren pro vojenská zařízení v Arktidě. Pilotním projektem společnosti Innovation Projects Engineering Company (IPEC) je mobilní nízkoenergetický jaderný blok určený k montáži na velké nákladní vozidlo, pásové vozidlo nebo sáňkovanou plošinu. Výrobní modely budou muset být schopny přepravy vojenskými nákladními tryskami a těžkými nákladními vrtulníky, jako je Mil Mi-26. Musí být plně autonomní a navržené pro letitý provoz bez doplňování paliva, s malým počtem personálu a vzdáleným řídicím centrem. Předpokládá se, ale není potvrzeno, že tyto reaktory budou MTSPNR.

Teploty malých reaktorů

Mnoho malých reaktorů je navrženo pro průmyslové tepelné aplikace i pro výrobu elektřiny. Takže zatímco lehkovodní reaktory jsou omezeny tlakovými omezeními, a proto pracují v rozmezí 300-400 °C, jiné mají vyšší teplotu. Rychlé reaktory na kapalné kovy jsou v rozmezí 400-600 °C, reaktory s roztavenou solí mají teplotu kolem 600-700 °C a vysokoteplotní reaktory mají teplotu 600-900 °C.

Lehkovodní reaktory

Ty jsou moderovány a chlazeny obyčejnou vodou a mají nejnižší technologické riziko, jsou podobné většině provozovaných energetických a námořních reaktorů současnosti. Většinou používají palivo obohacené na méně než 5 % U-235 s ne delším než šestiletým intervalem doplňování paliva a regulační překážky jsou pravděpodobně nejmenší ze všech malých reaktorů.

Americké zkušenosti s malými lehkovodními reaktory (LWR) byly z malých vojenských elektráren, většinou PWR – viz výše.

Některé úspěšné malé reaktory z hlavního národního programu byly spuštěny v 50. letech 20. století. Jedním z nich byl Big Rock Point BWR o výkonu 67 MWe, který fungoval 35 let do roku 1997.

Americká jaderná regulační komise se začíná zaměřovat na malé lehkovodní reaktory využívající konvenční palivo, jako jsou konstrukce B&W, Westinghouse, NuScale a Holtec včetně integrálních typů (B&W, Westinghouse, NuScale). Kromě toho, co se týče času a rozsahu, „NRC má v úmyslu plně využít zkušeností a odborných znalostí“ jiných zemí, které se posunuly vpřed s nelehkými návrhy, a předpokládá „klíčovou roli v budoucích mezinárodních regulačních iniciativách“.

Z následujících provedení mají KLT, VBER a Holtec SMR konvenční tlakové nádoby plus externí vyvíječe páry (provedení PV/smyčka). Ostatní mají většinou systém přívodu páry uvnitř tlakové nádoby reaktoru ("integrální" provedení PWR). Všechny mají oproti současným LWR vylepšené bezpečnostní prvky. Všechny vyžadují konvenční chlazení parního kondenzátoru.

V USA se velké strojírenské a stavební společnosti aktivně podílely na dvou projektech: Fluor v NuScale a Bechtel v B&W mPower.

Tři nové koncepce jsou alternativami ke konvenčním pozemním jaderným elektrárnám. Ruská plovoucí jaderná elektrárna (FNPP) s dvojicí PWR odvozených z ledoborců je na dobré cestě ke

zprovoznění, s níže popsanými reaktory KLT-40S a na informační stránce Nuclear Power in Russia . Očekává se, že příští generace bude používat reaktory RITM-200M. Čína má podobný projekt pro svůj ACP100 SMR jako FNPP, zatímco MIT vyvíjí plovoucí elektrárnu kotvící na moři s reaktorem o výkonu asi 200 MWe ve spodní části válcové plošiny. Francouzská ponořená elektrárna Flexblue využívající reaktor o výkonu 50–250 MWe byla raným konceptem, ale nyní je zrušena.

KLT-40S

Ruský KLT-40S od OKBM Afrikantov je odvozen od reaktoru KLT-40, který se dobře osvědčil v ledoborcích a nyní – s nízkým obohaceným palivem – na člunu pro napájení vzdálených oblastí. Zde jednotka o výkonu 150 MWt vyrobí 35 MWe (brutto) a také až 35 MW tepla pro odsolování nebo dálkové vytápění (nebo 38,5 MWe brutto, pokud jde pouze o energii). Vyhoření je 45 GWd/t. Jednotky jsou navrženy tak, aby běžely 3–4 roky mezi doplňováním paliva s možností doplňování paliva na palubě a skladováním použitého paliva. Při každém takovém tankování jsou vyměněny všechny palivové soubory. Na konci 12letého provozního cyklu je celá elektrárna převezena do centrálního zařízení pro generální opravu a skladování použitého paliva. Provozní životnost zařízení je 40 let. Dvě jednotky jsou namontovány na člunu o nosnosti 21 500 tun.

Ačkoli je aktivní zóna reaktoru běžně chlazena nuceným oběhem (čtyřsmýčková), konstrukce spoléhá na konvekci pro nouzové chlazení. Palivem je silicid uranu a hliníku s úrovněmi obohacení 18,6 %, což umožňuje tříleté intervaly doplňování paliva. Variantou tohoto je KLT-20, speciálně navržený pro plovoucí jaderné elektrárny. Jde o dvousmýčkovou verzi se stejným obohacením, ale s desetiletým intervalem doplňování paliva.

První plovoucí jaderná elektrárna, *Akademik Lomonosov*, se začala stavět v roce 2007 a v prosinci 2019 byla připojena k síti v Peveku. (Viz také část *Plovoucí jaderné elektrárny* na informační stránce o

jaderné energetice v Rusku .)

RITM-200M, RITM-200N

Řada RITM je „vlajkovou lodí“ designu SMR Ruska. Kompaktní RITM-200M nahradí reaktory KLT pro provoz v plovoucích jaderných elektrárnách nebo optimalizovaných plovoucích energetických jednotkách (OFPU), jak je nyní OKBM nazývá. Je odvozen od reaktorových bloků RITM-200 OKBM Afrikantov v ledoborcích LK-60 a je integrální 175 MWt/50 MWe PWR s 12 kazetami parogenerátoru uvnitř tlakové nádoby a čtyřmi chladicími smyčkami s externími hlavními oběhovými čerpadly. Má vlastní bezpečnostní prvky, používá nízko obohacené (<20 %) palivo ve 241 palivových souborech (ve srovnání se 199 ve verzi pro ledoborec). OFPU budou vráceny na základnu k opravě každých 10 nebo 12 let a není vyžadováno žádné skladování použitého paliva na palubě. Provozní životnost je 60 let. Každý reaktor může dodat tepelný výkon 730 GJ/h. Dva reaktorové bloky v kontejnmentu mají hmotnost 2600 tun a zaujímají výšku 6,8 m × 14,6 m × 16,0 m, vyžadují pouze 12 000 tunový člun – mnohem menší než jednotky KLT-40S. Velkou výzvou je spolehlivost parogenerátorů a souvisejících zařízení, která jsou mnohem hůře dostupná, když jsou uvnitř tlakové nádoby reaktoru.

Rosatom plánuje tři OFPU, každý se dvěma reaktory RITM-200M na mysu Nagloynyn, které budou dodávat 330 MWe do projektu těžby mědi Baimskaja jižně od Bilibino a Pevek.

Počítá se také s instalací podobného RITM-200N na pevnině s jedním nebo více moduly 190 MWt/55 MWe, palivem obohaceným na téměř 20 % a palivovým cyklem 5-6 let. Rozměry kontejnmentu reaktoru jsou 6 m × 6 m × 15,5 m. První závod má být v Ust-Kuyga v Jakutsku. Rostechnadzor na to udělil licenci v srpnu 2021, stavba začne v roce 2024 a provoz se očekává v roce 2028. Půjde o referenční závod pro exportní prodej.

RITM-200B je verze 209 MWt a RITM-400 je verze 315 MWt, obě pro použití v ledborcích.

CNP-300

To je založeno na raném reaktoru Qinshan 1 v Číně jako dvousmyčkový PWR, se čtyřmi provozovanými v Pákistánu. Jedná se o 1000 MWt, 325 MWe s projektovanou provozní životností 40 let. Obohacení paliva je 2,4-3,0 %, s doplňováním paliva ve 12měsíčních intervalech. Byl navržen Shanghai Nuclear Energy Research & Design Institute (SNERDI).

SNP 350

SNP350 je SNERDI vývojem CNP-300, který byl v mnoha ohledech vylepšen, aby splňoval nejnovější požadavky na výkon, hospodárnost a bezpečnost. Jedná se o 1035 MWt, 350 MWe brutto, s projektovanou provozní životností 60 let a digitálními systémy kontroly a řízení.

NuScale

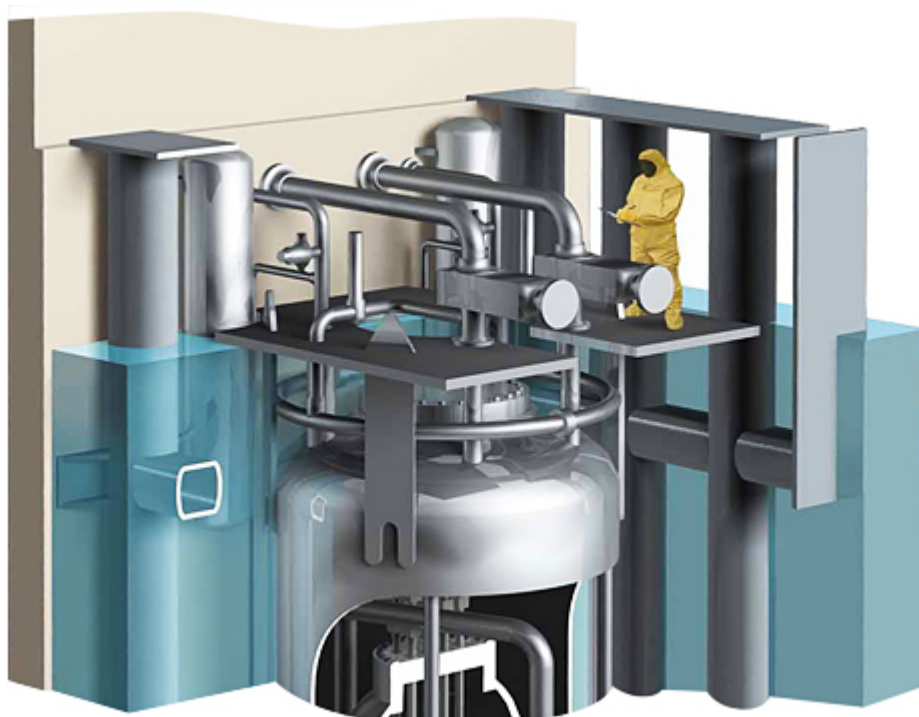
NuScale Power Module je 250 MWt, hrubý integrální PWR 77 MWe s přirozenou cirkulací.* V prosinci 2013 Ministerstvo energetiky USA (DOE) oznámilo, že podpoří urychlený vývoj návrhu pro včasné nasazení s podílem 50-50 na nákladech. základ. Dohodu na 217 milionů dolarů na pět let podepsala v květnu 2014 společnost NuScale Power. V září 2017, po přijetí žádosti společnosti o certifikaci designu (DCA) americkou komisí pro jadernou regulaci (NRC) na začátku roku, požádala NuScale o druhou část své úvěrové záruky u US DOE.

* V listopadu 2020 bylo oznámeno, že „inženýrské úsilí o další hodnotu“ vedlo k tomu, že kapacita napájecího modulu NuScale byla o 25 % vyšší než jeho předchozí hodnota 200 MWt, 60 MWe brutto.

Továrně se bude vyrábět s tlakovou nádobou o průměru tři metry a konvekčním chlazením, přičemž jedinými pohyblivými částmi budou pohony regulačních tyčí. Používá standardní palivo PWR obohacené

na 4,95 % v normálních palivových souborech PWR (ale jen 2 m dlouhé) s 24měsíčním cyklem doplňování paliva. Modul válcové kontejnmentové nádoby o průměru 4,6 m a výšce 23 m váží 640 tun a obsahuje reaktor s parogenerátorem nad ním. Standardní elektrárna by měla 12 modulů dohromady dávajících asi 924 MWe, i když se nyní počítá i se čtyřmodulovými a šestimodulovými elektrárnami. Vícejednotkové závody se nazývají VOYGR. Mostový jeřáb by zvedl každý modul z jeho bazénu do samostatné části závodu pro doplnění paliva. Konstrukční životnost je 60 let. Má plné pasivní chlazení v provozu i po vypnutí na dobu neurčitou, dokonce bez potřeby stejnosměrné baterie. NRC v lednu 2018 dospělo k závěru, že design NuScale eliminoval potřebu záložního napájení třídy 1E – aktuální požadavek pro všechny americké jaderné elektrárny. Prohlašuje dobrou schopnost sledování zátěže v souladu s požadavky EPRI a také schopnost černého startu.

Britská Národní jaderná laboratoř (NNL) potvrdila, že reaktor může běžet na palivo MOX. Uvedla také, že elektrárna VOYGR-12 s plnými jádery MOX by mohla spotřebovat 100 tun reaktorového plutonia za přibližně 40 let a vygenerovat z něj 200 TWh. To by bylo v souladu s návrhem Arevy na využití britských zásob plutonia, zejména proto, že Areva již má smlouvu na výrobu paliva pro reaktor NuScale.



NuScale Power Module (NuScale)

Společnost v roce 2010 odhadovala, že noční kapitálové náklady na 12modulovou elektrárnu o výkonu 540 MWe budou asi 4 000 USD za kilowatt, v roce 2014 vzrostly na 5 078 USD/kWe netto, s očekávanými vyrovnanými náklady na elektrinu (LCOE) ve výši 100 USD. /MWh za první jednotku (nebo 90 USD za „*n*-tého druhu“). V červnu 2018 společnost oznámila, že její reaktor může generovat o 20 % více energie, než se původně plánovalo. S výhradou schválení NRC by to snížilo noční kapitálové náklady na přibližně 4200 USD za kilowatt a snížilo by LCOE o 18 %. S dalším zvýšením výkonu koncem roku 2020 společnost uvedla kapitálové náklady 2850 \$/kWe (pro 12modulovou elektrárnu o výkonu 924 MWe).

Společnost NuScale Power byla vyčleněna z Oregonské státní univerzity v roce 2007, ačkoli původní vývoj financovalo americké ministerstvo energetiky. Poté, co společnost NuScale zaznamenala problémy s financováním svého vývoje, Fluor Corporation zaplatila v říjnu 2011 více než 30 milionů dolarů za 55 % NuScale. V květnu 2022 NuScale Power oznámila, že se sloučila s Spring Valley Acquisition Corp. Sloučená společnost NuScale Power Corporation je uvedena na burze na NYSE. Fluor nadále drží většinový podíl ve společnosti a poskytuje jí inženýrské služby, projektové řízení a administrativu a podporu dodavatelského řetězce.

V dubnu 2012 ARES Corporation souhlasila s pomocí při návrhu a licencování. Březen 2014 Enercon Services se stal partnerem, který pomáhá s certifikací designu a žádostmi o licence. V říjnu 2015 společnost Ultra Electronics souhlasila, že přispěje technickými znalostmi. V červenci 2019 společnost Doosan Heavy Industries vnesla do projektu svou schopnost vyrábět tlakové nádoby a následovala s vlastním kapitálem 104 milionů dolarů. Také v červenci 2019 Sargent & Lundy souhlasila s podporou návrhu elektrárny. V dubnu 2021 japonská společnost JGC Holdings souhlasila s investicí 40 milionů USD a jako smluvní partner EPC se spojila s Fluor při nasazení NuScale SMR. V květnu 2021 japonská IHI investovala 20

milionů dolarů v hotovosti a stala se strategickým partnerem. V červnu 2021 se k nim připojil GS Energy North America, stejně jako Samsung v červenci. Všechny tyto přispěly vlastním kapitálem společnosti NuScale,

Společnost NuScale podala žádost o certifikaci designu v USA v lednu 2017 a v červenci 2017 NRC potvrdilo, že byla schválena architektura vysoce integrovaného ochranného systému (HIPS). Společnost NuScale spolupracuje s NRC od roku 2008 a do listopadu 2013 utratila přibližně 130 milionů dolarů na licencování. V září 2020 vydala NRC standardní schválení návrhu pro dřívější verzi s výkonem 50 MWe.* NuScale uvedla, že o stejné schválení požádá v roce 2022 pro verzi 60 MWe, i když později, v listopadu 2020, společnost oznámila, že každý modul bude nyní 77 MWe. Je to první SMR, který získal schválení návrhu NRC. V říjnu 2022 NRC uvedlo, že souhlasí s metodikou NuScale pro výpočet zóny havarijního plánování (EPZ) přijatelné pro použití s návrhem NuScale.

* Standardní schválení návrhu (SDA) umožňuje odkazovat na standardní design NuScale v žádosti o stavební povolení nebo provozní licenci nebo v žádosti o kombinovanou stavební a provozní licenci (COL) podle předpisů NRC. Před zahájením jakékoli stavby musí být také dokončeno licenční řízení pro konkrétní místo.

V září 2018 NuScale vybrala společnost BWX Technologies jako prvního výrobce svého SMR po 18měsíčním výběrovém řízení. Demonstrační jednotka v Idahu bude mít suché chlazení pro okruh kondenzátoru s 90% úsporou vody, přičemž obětuje asi 5 % svého výkonu na pohon chlazení. V polovině roku 2021 Doosan uvedl, že se připravuje na zahájení výroby kování pro reaktorové moduly UAMPS v roce 2022, a Samsung uvedl, že společnosti NuScale, Fluor a Samsung C&T Corporation budou spolupracovat na dodávkách závodů NuScale po celém světě.

V prosinci 2019 společnost NuScale předložila svůj návrh SMR s výkonem 60 MWe (nyní 77 MWe) Kanadské komisi pro jadernou bezpečnost (CNSC) k posouzení návrhu dodavatele před udělením licence. Fáze 2 tohoto začala v lednu 2020.

Dříve v březnu 2012 DOE podepsalo dohodu s NuScale o výstavbě demonstrační jednotky v její lokalitě Savannah River v Jižní Karolíně.

V polovině roku 2013 společnost NuScale zahájila Western Initiative for Nuclear (WIN) – širokou, multi-západní státní spolupráci* – ke studiu demonstrace a nasazení vícemodulové elektrárny NuScale SMR v západních USA. Toto se stalo **Carbon-Free Power Project** vedený Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS) v DOE's Idaho National Laboratory (INL). Se zvýšením výkonu jednotky na 77 MWe by noční kapitálové náklady šestimodulové elektrárny byly asi 3 miliardy USD, tedy 6500 USD/kW. UAMPS má 27 veřejných služeb, které se účastní projektu. UAMPS se zaměřuje na 58 USD/MWh výrobní náklady (LCOE) pro šestimodulovou elektrárnu. Očekává se, že první jednotka bude online v roce 2029.

WIN zahrnuje Energy Northwest (ENW) ve Washingtonu a Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS). Předpokládá se, že ukázkový NuScale SMR postavený jako součást projektu WIN bude uveden do provozu v roce 2029 v národní laboratoři DOE v Idaho National Laboratory (INL), s UAMPS jako vlastníkem a ENW provozovatelem. Následovala by továrna v plném rozsahu (původně plánovaná jako 12-, ale nyní šestimodulová) továrna vlastněná UAMPS a provozovaná společností Energy Northwest. Se zvýšením výkonu jednotky na 77 MWe by náklady na 12modulovou elektrárnu činily přibližně 2850 USD/kW přes noc. **Energy Northwest zahrnuje 27 veřejných služeb a předtím, než si vybrala NuScale a stala se součástí projektu UAMPS Carbon-Free Power Project, prověřila možnosti malých reaktorů** . UAMPS se zaměřuje na 55 USD/MWh výrobní náklady (LCOE).

* Washington, Oregon, Idaho, Wyoming, Utah a Arizona.

V Polsku společnost NuScale spolu s Unimot a KGHM zkoumá možnosti svých reaktorů, které by nahradily uhelné elektrárny.

NuScale zkoumá možnosti kogenerace včetně odsolování (s Aquatech), získávání ropy z dehtových písků a rafinérské energie (s Fluorem), výroby vodíku vysokoteplotní parní elektrolýzou (s INL) a flexibilního zálohování pro větrnou farmu (s UAMPS a Energie Severozápad). Doosan spolupracuje na výrobě a odsolování vodíku.

NuScale a Prodigy Clean Energy vyvíjejí plovoucí verzi NuScale SMR, která by mohla být nasazena na moři blízko pobřeží.

V prosinci 2022 společnost NuScale oznámila, že dokončila standardní generický návrh závodu pro závod VOYGR, který bude sloužit jako výchozí bod pro nasazení návrhů specifických pro dané místo.

Holtec SMR-160

Holtec International a její dceřiná společnost SMR Inventec vyvíjejí 160 MWe (525 MWt) továrně postavený reaktor s názvem SMR-160. SMR-160, integrální design tlakovodního lehkovodního reaktoru s jedním parním generátorem s přímou trubkou, obsahuje 57 palivových souborů s oxidem uraničitým s regulačními tyčemi a borovou vložkou. SMR-160 je za provozu a po odstavení na dobu neurčitou pasivně chlazen se záporným teplotním koeficientem. Celý reaktorový systém by byl instalován pod úroveň terénu se skladem použitého paliva. Pro každou jednotku ve výši 600 milionů USD (3750 USD/kWe) se předpokládá 24měsíční období výstavby. Provozní životnost je minimálně 80 let.

Návrh prošel v srpnu 2020 první fází třífázového předlicenčního přezkoumání návrhu dodavatele Kanadské komise pro jadernou bezpečnost (CNSC). Probíhají předlicenční činnosti s Komisí pro jaderný dozor USA (NRC).

Holtec již dříve vyvinul koncept nazvaný Holtec Inherently Safe Modular Underground Reactor (HI-SMUR). Koncem roku 2010 proběhly předaplikační diskuse o provedení 145 MWe (469 MWt) s NRC. Projekt měl dva externí horizontální parogenerátory. 32

palivových souborů PWR v plné délce bylo v palivové kazetě, která se nakládala a vykládala jako jeden celek z 31metrové vysokotlaké nádoby.

Velké revize do roku 2012 vedly k původnímu návrhu SMR-160. Fáze podrobného návrhu byla ze srpna 2012 a v březnu 2012 podepsala americká DOE se společností Holtec dohodu o výstavbě demonstrační jednotky SMR-160 v její lokalitě Savannah River v Jižní Karolíně. V roce 2013 NuHub, projekt ekonomického rozvoje v Jižní Karolíně, a samotný stát podpořily nabídku Holtecu na financování DOE pro SMR-160, stejně jako partneři PSEG a SCE&G – kteří by provozovali demonstrační závod – ale financování DOE bylo nakonec zamítnuto. V prosinci 2020 však DOE vybrala společnost Holtec pro program vývoje SMR-160 v hodnotě 147,5 milionu USD (společnost DOE má podíl 85,3 milionu USD v rámci programu Advanced Reactor Demonstration Program).

V srpnu 2015 se Mitsubishi Electric Power Products a její japonská mateřská společnost staly partnerem v projektu, aby se ujali návrhu digitální instrumentace a řízení (I&C)* a pomohli s licencováním. V lednu 2016 Holtec uvedl, že vývoj pokračoval s podporou Mitsubishi a PSEG Power a v červenci 2017 byla formalizována partnerská smlouva se společností SNC-Lavalin se sídlem v Ontariu, zahrnující technickou podporu a licencování.

* Všechny japonské PWR a 14 čínských PWR využívají technologii I&C společnosti Mitsubishi Electric.

V roce 2017 Holtec zahájil provoz továrny na svářečky o rozloze 500 000 čtverečních stop (4,6 ha) v Camdenu, NJ, určené k výrobě komponentů a zařízení SMR. Zařízení v současné době vyrábí tlakové nádoby ASME a kontejnery pro skladování a přepravu vyhořelého paliva a je schopno vyrábět jak SMR-160, tak další konstrukce SMR.

V dubnu 2020 si Holtec vybral Framatome, aby dodala své palivové soubory GAIA pro reaktor.

V listopadu 2021 Holtec dokončil dohodu s Hyundai Engineering & Construction z Jižní Koreje na dodávku továrny SMR-160 na klíč po celém světě. Holtec bude sloužit jako celkový architekt inženýr pro elektrárnu a bude poskytovat hlavní jaderné komponenty prostřednictvím svých amerických výrobních závodů a mezinárodního dodavatelského řetězce a bude poskytovat přístrojové a řídicí systémy prostřednictvím partnerství s Mitsubishi. Hyundai přispěje k EPC a schopnostem řízení výstavby pro velké projekty.

V únoru 2019 Holtec oznámil nové smlouvy se společností Exelon – připojit se k podpůrnému týmu s Mitsubishi a SNC-Lavalin – a ukrajinským Energoatomem, se kterým v roce 2018 podepsal dohodu o výstavbě SMR-160 na Ukrajině. V červnu 2019 Holtec podepsal dohodu o partnerství se společností Energoatom a ukrajinským národním jaderným konzultantem, Státním vědeckým a technickým centrem pro jadernou a radiační bezpečnost (SSTC-NRS), za účelem vytvoření konsorcia, které bude zkoumat environmentální a technickou proveditelnost kvalifikace „generického“ SMR. -160 systém, který lze postavit a provozovat na jakémkoli kandidátském místě v zemi. Tím by se na Ukrajině vytvořila kapacita pro projektování reaktorů s cílem stát se regionálním centrem pro prodej takových reaktorů v Evropě, Asii a Africe.

V listopadu 2021 Holtec uvedl, že si klade za cíl získat americkou stavební licenci v roce 2025 a „aktivně zkoumá možnost“ nasazení SMR-160 v Oyster Creek – místě vyřazování z provozu, které získal od společnosti Exelon v roce 2019 po uzavření elektrárny – a ve dvě další místa na jihu USA.

mPower

V polovině roku 2009 společnost Babcock & Wilcox (B&W) oznámila svůj mPower reaktor, 500 MWt, 180 MWe integrální PWR navržený tak, aby byl vyroben v továrně a namontován na místo¹. Jednalo se o záměrně konzervativní design, aby se snadněji získalo přijetí a licencování. V listopadu 2012 americké ministerstvo energetiky

(DOE) oznámilo, že podpoří zrychlený vývoj návrhu pro brzké nasazení až do výše 226 milionů dolarů, a z toho zaplatilo 111 milionů dolarů.

Tlaková nádoba reaktoru s aktivní zónou 2x2 metry a parogenerátorem má tedy průměr pouhých 3,6 m a výšku 22 m a celý blok má průměr 4,5 m a výšku 23 m. Byl by instalován pod úroveň terénu, měl vzduchem chlazený kondenzátor s 31% tepelnou účinností^P a pasivní bezpečnostní systémy. Výkon byl původně 125 MWe, ale asi v roce 2014 se uvádělo 195 MWe při vodním chlazení. V plánu byla i vzduchem chlazená verze o výkonu 155 MWe. Integrovaný parní generátor je odvozen od námořních konstrukcí, stejně jako nastavení regulační tyče. Konvekci by napomáhalo osm malých čerpadel chladicí kapaliny s uzavřeným motorem. Má „konvenční jádro a standardní palivo“ (69 palivových souborů, každá standardní 17x17, < 20 t)^J obohacené téměř na 5 % o hořlavé jedy, aby byl zajištěn čtyřletý provozní cyklus mezi tankováním, který bude zahrnovat výměnu celého jádra jako jediné kazety. Hustota výkonu jádra je nižší než u velkého PWR a vyhoření je asi 35 GWd/t. (B&W čerpá z více než 50 let zkušeností s výrobou jaderných pohonných systémů pro americké námořnictvo, včetně kompaktních reaktorů s dlouhou životností aktivní zóny.) Předpokládá se 60letá životnost, protože na místě by bylo vybudováno dostatečné úložiště použitého paliva.

Reaktor mPower je modulární v tom smyslu, že každý blok je modul vyrobený v továrně a několik bloků by bylo spojeno do elektrárny libovolné velikosti, ale s největší pravděpodobností jde o dvoublokovou elektrárnu o výkonu 380 MWe a využívající přibližně 200 MWe turbínové generátory (také dodávány jako kompletní moduly), postavené za tři roky. Současná výrobní kapacita BWXT Nuclear Energy v Severní Americe by mohla tyto jednotky vyrábět.

Společnost B&W Nuclear Energy Inc založila společnost B&W Modular Nuclear Energy LLC (nyní BWXT mPower Inc), aby tento design uvedla na trh ve spolupráci se společností Bechtel, která se k

projektu připojila jako 10% akciový partner, který jej navrhl, licencoval a nasadil. Společnost očekává certifikaci návrhu a stavební povolení v roce 2018 a komerční provoz prvních dvou bloků v roce 2022. Noční náklady na dvoublokovou elektrárnu vyčíslila B&W na zhruba 5000 USD/kW.

V listopadu 2013 B&W uvedla, že se do poloviny roku 2014 pokusí získat další kapitálové partnery, aby pokročila v licencování a výstavbě počátečního závodu.* B&W uvedla, že investovala 360 milionů USD do Generation mPower s Bechtem a chtěla prodat až 70 % svého podílu ve společném podniku, zbývá mu asi 20 % a Bechtel 10 %. V dubnu 2014 B&W oznámila, že omezuje financování projektu na zhruba 15 milionů \$ ročně, protože se jí nepodařilo najít zákazníky ani investory. DOE poté další financování ukončila. B&W plánovala zachovat si práva na výrobu reaktorového modulu a jaderného paliva pro elektrárnu mPower. V prosinci 2014 B&W dokončila propouštění zaměstnanců pracujících na projektu a začátkem roku 2016 dále snížila financování.

S více než 375 miliony dolarů, které byly vynaloženy na program mPower, v březnu 2016 BWXT a Bechtel dosáhly dohody o „urychleném vývoji“ projektu mPower, takže Bechtel převzal vedení projektu a pokusil se na rok zajistit financování Vývoj SMR od třetích stran, včetně DOE. Pokud by to Bechtel uspěl, pak by BWXT a Bechtel vyjednaly a uzavřely novou smlouvu, přičemž Bechtel převezme správu programu mPower od BWXT. Pokud by se Bechtel rozhodl projekt ukončit, BWXT by mu zaplatilo 30 milionů dolarů, což se stalo v březnu 2017. Projekt byl poté odložen, takže BWXT i Bechtel se mohly volně zapojit do dodavatelského řetězce nebo řízení jiných projektů SMR .

* Když společnost B&W v roce 2009 spustila projekt mPower, uvedla, že úřad Tennessee Valley Authority (TVA) zahájí proces hodnocení Clinch River v Oak Ridge jako potenciálního hlavního místa pro reaktor mPower a že bylo podepsáno memorandum o porozumění. B&W, TVA a konsorcium regionálních městských a družstevních utilit prozkoumají výstavbu malé flotily mPower reaktorů. Později bylo oznámeno, že dalšími signatáři dohody byly FirstEnergy a Oglethorpe Power ³. V

únoru 2013 B&W podepsala dohodu s TVA o výstavbě až čtyř bloků v Clinch River, přičemž certifikace projektu a žádost o stavební povolení budou předloženy NRC v roce 2015. V srpnu 2014 TVA uvedla, že podá předběžné povolení k umístění (ESP) místo žádosti o stavební povolení pro jeden nebo více malých modulárních reaktorů v Clinch River, možná do konce roku 2015. V únoru 2016 TVA uvedla, že stále vyvíjí místo v Oak Ridge pro SMR a bude žádat o včasné povolení (ESP, bez identifikované technologie) v květnu s cílem vybudovat zde kapacitu až 800 MWe.

BWRX-300

GE Hitachi Nuclear Energy má 300 MWe malý BWR design, zamýšlený jako jednotlivé bloky. Společnost GEH to oznámila jako BWRX-300 „což dále zjednodušuje ESBWR s licencí NRC“, ze kterého je odvozen. BWRX 300 obsahuje řadu funkcí pro úsporu nákladů, včetně systémů přirozené cirkulace, menších suchých kontejnmentů a pasivnějších provozních řídicích systémů.

Odhadované kapitálové náklady jsou 2250 \$/kWe pro sériovou výrobu po postavení prvních jednotek. Cílem návrhu je omezit počet provozních zaměstnanců na místě na 75 zaměstnanců, aby bylo dosaženo odhadovaných nákladů na provoz a údržbu ve výši 16 USD/MWh. V květnu 2018 americká společnost Dominion Energy souhlasila s financováním projektu.

V červenci 2018 společnost GEH oznámila financování ve výši 1,9 milionu USD od amerického ministerstva energetiky na vedení týmu zahrnujícího Bechtel, Exelon, Hitachi-GE Nuclear Energy a Massachusetts Institute of Technology, aby prozkoumal způsoby, jak zjednodušit konstrukci reaktoru, snížit náklady na výstavbu elektrárny a nižší náklady na provoz a údržbu BWRX-300. Cílem týmu je zejména identifikovat způsoby, jak snížit náklady na dokončení elektrárny o 40–60 % ve srovnání s jinými návrhy SMR ve vývoji a být konkurenceschopnými s plynem. "Jako desátý vývoj varného reaktoru představuje BWRX-300 nejjednodušší, ale nejinovativnější konstrukci BWR od doby, kdy GE začala vyvíjet jaderné reaktory v roce 1955." V květnu 2021 GEH uvedl, že pokud bude design vybrán společností Ontario Power Generation, plánuje uvést BWRX-300 do komerční připravenosti ve spolupráci s OPG, a

že se bude vyrábět a konstruovat v Ontariu, přičemž první jednotka bude postavena v Darlingtonu. V říjnu 2021 společnost GEH zadala BWXT Canada pro podrobné inženýrství a návrh.

V květnu 2019 byl BWRX-300 předložen kanadské CNSC k předlicenčnímu přezkoumání návrhu dodavatele. Fáze 2 tohoto začala v lednu 2020. Po zahájení diskuse s americkou jadernou regulační komisí na začátku roku 2019 společnost GE Hitachi v lednu 2020 oznámila, že předložila NRC první aktuální licenční zprávu pro BWRX-300 SMR s použitím části 50 dvoustupňový přístup a využití certifikace designu ESBWR. GEH očekává, že první jednotka bude fungovat v USA nebo Kanadě kolem roku 2028.

V říjnu 2019 GEH podepsala dohodu s estonskou Fermi Energia a další dohodu se Synthos SA v Polsku, aby prověřila ekonomickou proveditelnost výstavby jediného reaktoru BWRX-300 v každé zemi. V prosinci 2020 Exelon v USA dokončil studii proveditelnosti pro Synthos ohledně nasazení BWRX-300. V červnu 2021 se k Synthos připojila petrochemická společnost PKN Orlen při posuzování možností.

DUHOVKA

IRIS (International Reactor Innovative & Secure) společnosti Westinghouse je design reaktoru, který byl vyvíjen více než dvě desetiletí. Byla navržena kapacita 1000 MWt, 335 MWe, i když by mohla být zmenšena na 100 MWe. IRIS je modulární tlakovodní reaktor s integrovaným primárním chladicím systémem a cirkulací konvekcí. Palivo je podobné současným LWR a (alespoň pro verzi 335 MWe) by byly palivové soubory shodné s těmi v AP1000. Obohacení je 5 % se spalitelným jedem a intervalem doplňování paliva až čtyři roky (nebo delší s vyšším obohacením a palivem MOX). Americká certifikace designu byla ve fázi před aplikací, ale nyní je uvedena jako „neaktivní“ a koncept se vyvinul do Westinghouse SMR.

Westinghouse SMR

Malý modulární reaktor Westinghouse je integrální PWR třídy 800 MWt/225 MWe s pasivními bezpečnostními systémy a vnitřními částmi reaktoru, včetně palivových souborů, které jsou blízké těm v AP1000 (89 souborů 2,44 m aktivní délky, <5% obohacení). Parogenerátor je nad aktivní zónou napájen osmi horizontálně uloženými axiálními čerpadly chladiwa. Nádoba reaktoru bude vyrobena v továrně a odeslána na místo po železnici, poté bude instalována pod úroveň země v kontejnmentové nádobě o průměru 9,8 m a výšce 27 m. Modul nádoby reaktoru je 25 metrů vysoký a má průměr 3,5 metru. Má 24měsíční cyklus tankování a 60letou životnost. Pasivní bezpečnost znamená, že v případě nehody není po dobu sedmi dnů vyžadován žádný zásah obsluhy. Sledování denní zátěže lze provádět od 100 % do 20 % výkonu při rychlosti 5 % změny za minutu; v nepřetržitém zatížení,

V květnu 2012 se Westinghouse spojil s General Dynamics Electric Boat, aby pomohl při návrhu, a Burns & McDonnell, aby poskytl architektonickou a technickou podporu. NRC očekávalo žádost o certifikaci designu v září 2013, ale společnost ustoupila od podání žádosti, zatímco přehodnocuje trh s malými reaktory. Společnost začala vyrábět prototypy palivových souborů.

DOE to dříve vidělo jako „blízkodobý design LWR“. V březnu 2015 Westinghouse oznámil, že NRC schválilo svou zprávu o hodnocení bezpečnosti pro design SMR, což je podle něj významný krok směrem k certifikaci designu. Přestože se společnost nadále snaží získat zájem zákazníků, s NRC zatím nepokračuje.

V dubnu 2012 Westinghouse vytvořil projekt s Ameren Missouri s cílem získat finanční prostředky DOE na vývoj návrhu s cílem získat certifikaci návrhu a kombinovanou stavební a provozní licenci (COL) od Nuclear Regulatory Commission (NRC) až pro pět SMR. na místě Ameren's Callaway, namísto dříve navrhovaného velkého EPR tam. Iniciativa – NexStart SMR Alliance – měla podporu dalších státních utilit a guvernéra státu, stejně jako Savannah River, Exelon a

Dominion. Tato dohoda však vypršela ke konci roku 2013 a obě společnosti od projektu odstoupily, protože prostředky DOE šly na jiné projekty JMK.

V květnu 2013 Westinghouse oznámil, že bude spolupracovat s čínskou State Nuclear Power Technology Corporation (SNPTC) na urychlení vývoje designu a udělování licencí pro její SMR v USA a Číně. SNPTC by zajistilo, že design Westinghouse SMR splňuje standardy pro udělování licencí v Číně a povede v této zemi úsilí o udělování licencí. Stav této spolupráce je nejistý.

V říjnu 2015 Westinghouse představil návrh „modelu sdíleného designu a vývoje“, v jehož rámci by společnost přispěla svým koncepčním návrhem SMR a poté se spojila s britskou vládou a průmyslem na jeho dokončení, licenci a nasazení. To by zapojilo britské společnosti, jako je Sheffield. Forgemasters v dodavatelském řetězci reaktoru.

VVER-300 (V-478)

Jedná se o dvousmyčkovou konstrukci PWR o výkonu 850 MWt a 300 MWe od společnosti Hidropress, která vychází z konstrukce VVER-640 (V-407). Je to málo hlášené.

VBER-150, VBER-300

Větší ruská továrně postavená a na člunu namontovaná jednotka (vyžadující 12 000 tunové plavidlo) je VBER-150, 350 MWt, 110 MWe. Je modulární a je odvozen OKBM z námořních konstrukcí, se dvěma parogenerátory. Palivo s oxidem uranu obohaceným na 4,7 % má hořlavý jed; má nízkou spotřebu (průměr 31 GWd/t, maximum 41,6 GWd/t) a osmiletý interval doplňování paliva.

Větší VBER-300 PWR OKBM Afrikantov je blok 917 MWt, 325 MWe, z nichž první se plánuje postavit v Kazachstánu. Původně se počítalo s dvojicí jako plovoucí jaderná elektrárna s výtlakem 49 000 tun. Jako kogenerační zařízení je dimenzováno na 200 MWe a 1900 GJ/h. Reaktor je dimenzován na 60letou životnost a 90% kapacitní

faktor. Má čtyři externí parogenerátory a kazetové jádro s 85 standardními palivovými soubory VVER obohacenými na 4,95 % a vyhořením 50 GWd/tU se 72měsíčním palivovým cyklem. Počítá se také s verzemi se třemi a dvěma parogenerátory o výkonu 230 a 150 MWe. Také se sofistikovanejším a více obohacným (18 %) palivem v aktivní zóně může být interval doplňování paliva posunut ze dvou let na pět let (6 až 15 let palivového cyklu) se spalováním až 125 GWd/tU.^e . Předpokládá se také využití v Rusku, především jako kogenerační jednotka. Je považováno za pravděpodobné pro krátkodobé nasazení.

Společnost také nabízí 200-600 MWe konstrukce založené na standardním 100 MWe modulu a výslovně založené na námořních jednotkách.

VK-300

Dalším větším ruským reaktorem s dokončeným detailním projektem je integrální varný reaktor NIKIET VK-300 o výkonu 750 MWt, 250 MWe, vyvinutý speciálně pro kogeneraci elektřiny a dálkového vytápění nebo tepla pro odsolování (150 MWe plus 1675 GJ/h). NA Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering (RDIPE nebo NIKIET) spolu s několika významnými výzkumnými a inženýrskými ústavy. Vyvinul se z 50 MWe (netto) VK-50 BWR v Dimitrovgrad^f, ale používá standardní komponenty všude, kde je to možné, a má 313 palivových článků podobných VVER. Chlazení je pasivní, konvekcí a všechny bezpečnostní systémy jsou pasivní. Obohacení paliva je 4 % a vyhoření je 41 GWd/tU s intervalem doplňování paliva 72 měsíců. Je schopen vyrobit 250 MWe, pokud je pouze elektrický. Životnost konstrukce je 60 let.

V září 2007 bylo oznámeno, že šest bude postaveno v Kole nebo Archangelsku a v Primorské na Dálném východě, aby byl zahájen provoz v letech 2017-20,⁴ , ale o tomto plánu nebylo více slyšet. Byla zpracována studie proveditelnosti pro jadernou kogenerační elektrárnu Archangelsk se čtyřmi bloky. Jako kogenerační zařízení

bylo zamýšleno pro Mining & Chemical Combine v Zheleznogorsku, ale MCC údajně preferuje VBER-300. Návrh byl dokončen v roce 2013.

VKT-12

Menší ruský design BWR je přenosný VKT-12 o výkonu 12 MWe, popisovaný jako podobný prototypu VK-50 BWR v Dimitrovgradu, s jednou smyčkou. Má keramicko-kovové jádro s uranem obohaceným na 2,4-4,8 % a 10letým intervalem doplňování paliva. Nádoba reaktoru má vnitřní průměr 2,4 m a výšku 4,9 m. Toto je hlášeno jako odložené.

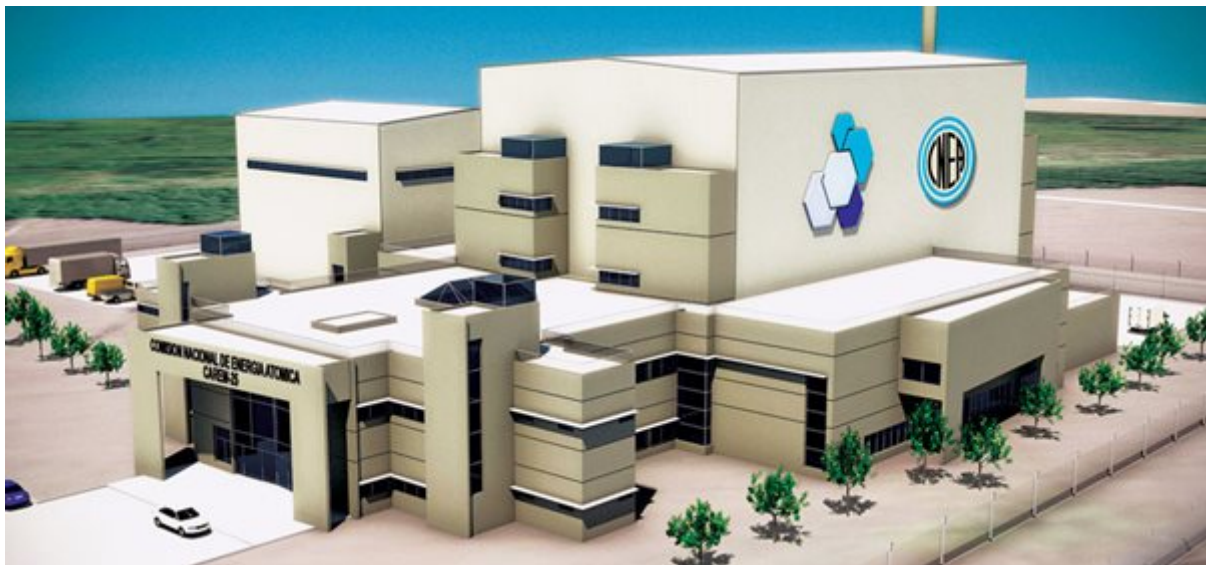
ABV, ABV-6M

Menší ruský blok PWR vyvíjený OKBM Afrikantov je víceúčelový zdroj energie ABV. Snadno se přepraví na místo s rychlou montáží a provozem po dobu 10–12 let mezi natankováním paliva, které se provádí mimo pracoviště ve speciálních zařízeních. K dispozici je řada velikostí od 45 MWt (ABV-6M) až po 18 MWt (ABV-3), což dává výkon 4-18 MWe. (Zápis IAEA 2011 o ABV-6M uvádí 14 MWt nebo 6 MWe v kogeneračním režimu.) Jednotky jsou kompaktní, s integrovaným parogenerátorem a přirozenou cirkulací v primárním okruhu. Budou továrně vyráběny a navrženy jako univerzální zdroj energie pro plovoucí jaderné elektrárny – ABV-6M by vyžadoval 3500 tunový člun; ABV-3, 1600 tun pro dvojité jednotky. FNPP Volnolom se skládá z dvojice reaktorů (celkem 12 MWe) namontovaných na 97metrovém,³ /den pitné vody).

Nejmenší pozemní verze má reaktorový modul o délce 13 m a průměru 8,5 m o hmotnosti 600 t. Pozemní modul ABV-6M je 44 m dlouhý, má průměr 10 m a hmotnost 3000 t. Jádro je podobné jádru KLT-40 kromě toho, že obohacení je 16,5 % nebo 19,7 % a průměrné spálení 95 GWd/t. Zpočátku by to bylo palivo v továrně. Životnost je cca 40 let.

CÍSAŘ

Prototyp reaktoru CAREM25, staví Argentinská národní komise pro atomovou energii (CNEA) se značným přispěním od INVAP⁸, je modulární 100 MWt (brutto 27 MWe) integrální tlakovodní reaktor starší konstrukce, poprvé představený v roce 1984. Má 12 parogenerátorů v tlakové nádobě a je navržen pro použití pro výrobu elektřiny nebo jako výzkumný reaktor nebo pro odsolování vody (s 8 MWe v kogenerační konfiguraci). CAREM má celý svůj primární chladicí systém v tlakové nádobě reaktoru (výška 11 m, průměr 3,5 m), samotlaký a zcela závislý na konvekci (pro moduly menší než 150 MWe). Finální exportní verze v plné velikosti bude 100 MWe nebo více, s axiálními čerpadly chladicí kapaliny poháněnými elektricky. Palivo je standardní palivo PWR obohacené na 3,1 nebo 3,4 % v šestihraných palivových souborech s hořlavým jodem a doplňuje se ročně.



Jak by vypadala rostlina CAREM (CNEA)

Prototypová jednotka o výkonu 25 MWe se staví vedle Atucha na řece Parana v Limě, 110 km severozápadně od Buenos Aires, a první větší verze (pravděpodobně 100 MWe) je plánována v severní provincii Formosa, 500 km severně od Buenos Aires. , jakmile se design prokáže. Přibližně 70 % komponentů CAREM25 bude místní výroby. Tlakovou nádobu vyrábí společnost Industrias Metalurgicas Pescarmona SA (IMPSA).

MAAE jej uvádí jako výzkumný reaktor ve výstavbě od dubna 2013, ačkoli první beton byl nalit v únoru 2014. Postupuje pomalu a původně měl být online v roce 2019.

V březnu 2015 argentinská společnost INVAP a státní saúdská společnost pro inovace v oblasti technologií Taqnia založily společný podnik Invania, který má vyvinout jadernou technologii pro program jaderné energetiky Saúdské Arábie, zjevně zaměřený na CAREM pro odsolování.

SMART od KAERI, korejské SMR

Ve větším měřítku je jihokorejský SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor) tlakovodní reaktor o výkonu 330 MWt s integrovanými parními generátory a pokročilými bezpečnostními prvky. Je navržen Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) pro výrobu elektřiny (až 100 MWe) a/nebo tepelné aplikace, jako je odsolování mořské vody. Projektovaná provozní životnost je 60 let, obohacení paliva 4,8 %, s tříletým cyklem doplňování paliva. Má 57 palivových souborů velmi podobných normálním PWR, ale kratších, a pracuje s 36měsíčním palivovým cyklem. Všechny prvky aktivní bezpečnosti původního návrhu byly začátkem roku 2016 nahrazeny pasivními verzemi. Odvod zbytkového tepla je pasivní. V polovině roku 2012 obdržel standardní schválení návrhu (SDA) od korejského regulátora. Jeden blok může vyrobit 90 MWe plus 40 000 m³ /den odsolené vody.

V březnu 2015 KAERI podepsalo se saúdskoarabským králem Abdulláhem City pro atomovou a obnovitelnou energii (KA-CARE) o posouzení potenciálu pro výstavbu SMART reaktorů v této zemi a v září 2015 byly za tímto účelem podepsány další smlouvy. Náklady na vybudování první jednotky SMART v Saúdské Arábii byly odhadnuty na 1 miliardu dolarů. Do listopadu 2018 mělo být společně prováděno předprojektové inženýrství včetně inženýrského návrhu FOAK a příprav na výstavbu dvou bloků.

V dubnu 2021 Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP) oznámila, že spolupracuje s KAERI na zlepšení ekonomiky SMART designu s cílem získat do roku 2028 licenci na nový korejský SMR o výkonu 170 MWe s dobrou schopností sledovat zatížení. , s ohledem na export.

BANDI-60S

BANDI-60S je dvousmyčkové PWR vyvíjené od roku 2016 jihokorejskou společností Kepco Engineering & Construction. Jedná se o 200 MWt/60 MWe reaktor navržený pro specializované trhy, zejména plovoucí jaderné elektrárny. Je popsán jako „blokový typ“ s externími parními generátory připojenými přímo k trysce. Zpočátku jsou parní generátory konvenční U-trubice, ale Kepco pracuje na designu desky a pláště, který výrazně sníží jejich velikost. Kromě parogenerátorů je většina hlavních součástí včetně pohonů regulačních tyčí uvnitř tlakové nádoby. Primární čerpadla jsou zapouzdřený motor a odvod odpadního tepla je pasivní. K dispozici je 52 konvenčních palivových souborů, které poskytují spalování 35 GWd/t při 48-60měsíčním palivovém cyklu. Místo rozpustného bóru se používají spalitelné absorbéry. Životnost konstrukce je 60 let. Tlaková nádoba je 11,2 m vysoká a 2,8 m průměr. V září 2020 Kepco podepsalo dohodu s Daewoo Shipbuilding & Engineering o vývoji pobřežních jaderných elektráren využívajících reaktor.

MRX

Japonský institut pro výzkum atomové energie (JAERI) navrhl MRX, malý (50-300 MWt) integrovaný PWR reaktor pro lodní pohon nebo místní zásobování energií (30 MWe). Celý závod by byl postaven v továrně. Má konvenční palivo s oxidem uranu obohacené na 4,3 % s 3,5letým intervalem doplňování paliva a pro zvýšení bezpečnosti má kontejnment naplněný vodou. Od začátku tisíciletí se o ní málo slyšelo.

Nuward NP-300

TechnicAtome s Naval Group a CEA ve Francii vyvinuly design NP-300 PWR z námořních elektráren a zaměřily jej na exportní trhy pro elektřinu, teplo a odsolování. Jedná se o PWR se systémy pasivní bezpečnosti a mohl by být postaven pro aplikace 100 až 300 MWe nebo více s až 500 000 m³ /den odsolování. Od poloviny roku 2018 byla navržena verze 570 MWt/170 MWe v kovovém kompaktním kontejneru ponořeném do vody. V září 2019 byly navrženy dva bloky o výkonu 170 MWe, které budou zahrnovat elektrárnu o výkonu 340 MWe se dvěma reaktory sdílejícími bazén. Uvažovalo se o partnerství s Westinghouse. EDF plánuje vstoupit do základní předlicenční fáze s ASN v roce 2022. Na projekt je přislíbena státní podpora ve výši přibližně 1 miliardy EUR.

EDF se „zaměřuje na nahrazení stárnoucích uhelných elektráren o výkonu 300 až 400 MW“ dvoublokovými elektrárnami Nuward a také na zásobování vzdálených obcí a energeticky náročných průmyslových oblastí a napájení malých sítí.

TechnicAtome vyrábí námořní reaktor K15 o výkonu 150 MWt, který běží na nízko obohacené palivo. Pozemní ekvivalent – *Réacteur d'essais à terre* (RES) – byl postaven v Cadarache od roku 2003 s několika zpožděními a dosáhl kritického stavu v říjnu 2018. Jde v podstatě o testovací reaktor PWR pro námořnictvo.

Dříve se zdálo, že některá verze tohoto reaktoru by mohla být použita v ponořené jaderné elektrárně Flexblue, kterou navrhuje DCNS ve Francii, ale nyní je zrušena. Koncepte eliminovala potřebu stavebního inženýrství a doplnění paliva nebo větší servis bylo možné provést jeho vytažením a návratem do loděnice.

NHR-200

Čínský reaktor NHR-200 (Nuclear Heating Reactor), vyvinutý Institutem technologie jaderné energie univerzity Tsingua (nyní Institute of Nuclear and New Energy Technology), je jednoduchý 200

MWt integrální PWR design pro dálkové vytápění nebo odsolování. Je založen na NHR-5, který byl uveden do provozu v roce 1989 a vytápěl areál INET po tři zimy^h.

Má konvekční cirkulaci při 2,5 MPa v tlaku primárního okruhu pro výrobu páry o teplotě 127°C. Použité palivo je skladováno kolem aktivní zóny v tlakové nádobě. První elektrárny NHR-200 jsou navrženy pro město Daqing v provincii Heilongjiang a Shenyang v provincii Liaoning.

NHR200-II s konstrukčními a ověřovacími zkouškami uzavřenými v roce 2016 pracuje při tlaku primárního okruhu 8 MPa pro výrobu páry o teplotě přes 200 °C a lze jej také použít pro výrobu elektřiny, odsolování mořské vody nebo teplo pro zpracování nerostů.

ACP100/Linglong One

Nuclear Power Institute of China (NPIC), spadající pod China National Nuclear Corporation (CNNC), navrhl víceúčelový malý modulární reaktor, ACP100 nebo Linglong One. Má pasivní bezpečnostní prvky, zejména odvod rozpadového tepla, a bude instalován pod zemí. Seismická tolerance je 300 Gal. Má 57 palivových souborů o výšce 2,15 m a integrované parogenerátory (320 °C), takže celý systém zásobování párou je vyroben a expedován jediným reaktorovým modulem. Jeho 385 MWt produkuje asi 125 MWe a počítá se s elektrárnami se dvěma až šesti z nich, s projektovanou životností 60 let a 24měsíčním doplňováním paliva. Nebo každý modul může dodávat 1000 GJ/h, což dává 12 000 m³/den odsolování (s MED). Předpokládá se také průmyslové a dálkové využití tepla a také aplikace plovoucích jaderných elektráren (FNPP). Počítá se s výkonem až 150 MWe. V dubnu 2016 MAAE předložila CNNC svou zprávu z procesu Generic Reactor Safety Review.

V říjnu 2015 podepsal Nuclear Power Institute of China (NPIC) dohodu s britským Lloyd's Register na podporu vývoje plovoucí jaderné elektrárny (FNPP) využívající reaktor ACP100S, námořní

verzi ACP100. Po schválení jako součást 13. pětiletého plánu pro inovativní energetické technologie podepsala CNNC v červenci 2016 dohodu s China Shipbuilding Industry Corporation (CSIC) o přípravě výstavby své demonstrační plovoucí jaderné elektrárny ACP100S.

Linglong One Demonstration Project* v Changjiang na ostrově Hainan zahrnuje společný podnik tří hlavních společností: CNNC jako vlastník a provozovatel; Nuclear Power Institute of China (NPIC) jako projektant reaktoru; a China Nuclear Power Engineering Group (CNPE), která je zodpovědná za výstavbu elektrárny. V dubnu 2020 byla schválena předběžná zpráva o bezpečnostní analýze pro jednoblokovou demonstrační elektrárnu. V květnu 2022 bylo dokončeno betonování základové desky reaktoru. Předpokládaná doba výstavby je 58 měsíců.

* Projekt technické demonstrace víceúčelového malého modulárního reaktoru Hainan Changjiang je celý název.

Společnost CNNC podepsala v červenci 2013 druhou dohodu ACP100 s krajem Hengfeng, městem Shangrao v provincii Jiangxi, a třetí s krajem Ningdu, městem Ganzhou v provincii Jiangxi na další projekt ACP100, který stojí 16 miliard CNY. Další vnitrozemské jednotky jsou plánovány v provinciích Hunan a možná Jilin. Exportní potenciál je považován za vysoký s plnými právy k duševnímu vlastnictví. V roce 2016 CNPE předložilo vyjádření zájmu vládě Spojeného království na základě svého návrhu ACP100+.

CAP200/LandStar-V, CAP150, CAP50, LandStar-I

CAP200 nebo LandStar-V s více aplikacemi SMR je PWR s původem SNPTC, vyvíjený z CAP1000 souběžně s CAP1400 společností SNERDI, s použitím osvědčené konstrukce paliva a aktivní zóny. Je 660 MWt/220 MWe a má dva externí parogenerátory (301°C). Má nahradit uhelné elektrárny a dodávat procesní teplo a dálkové vytápění s projektovanou provozní životností 60 let. Při 24měsíčním doplňování paliva se očekává spálení 42 GWd/t, přičemž 89 palivových souborů je stejných jako u CAP1400, ale kratších. Má

aktivní i pasivní chlazení a přirozená cirkulace je účinná až do 20 % výkonu. V případě nehody není po dobu sedmi dnů vyžadován žádný zásah operátora. Bude instalován pod úrovní terénu v kesonové konstrukci o hloubce 32 m, se seismickou návrhovou základnou 600 Gal, a to i v měkkém terénu.

Verze OceanStar-V by byla na člunu jako plovoucí jaderná elektrárna.

CAP150 je starší verze, 450 MWt/150 MWe, s osmi integrovanými parogenerátory. Tvrdí se, že má „zjednodušenější systém a větší bezpečnost než současné reaktory třetí generace“. Seismický návrhový základ je 300 Gal. V polovině roku 2013 společnost SNPTC uváděla kapitálové náklady přibližně 5 000 USD/kW a 9 c/kWh, tedy výrazně více než CAP1400.

Souvisejícím projektem SNERDI je reaktor CAP50 pro plovoucí jaderné elektrárny. To má být 200 MWt a relativně nízkoteplotní (250°C), takže jen asi 40 MWe se dvěma externími parogenerátory a pětiletým doplňováním paliva.

LandStar-I společnosti SPIC je integrální tlakový reaktor o výkonu 200 MWt s konvekční cirkulací při 9 MPa produkující horkou vodu pro dálkové vytápění. V demonstračním projektu Jiamusi společnosti SPIC v provincii Heilongjiang se staví dva reaktory LS-I o výkonu 200 MW.

ACPR100, ACPR50S

China General Nuclear Group (CGN) má dvě malé konstrukce ACPR: ACPR100 a ACPR50S, obě s pasivním chlazením pro rozpadové teplo a 60letou provozní životností. Oba mají palivové soubory standardního typu a palivo obohacené na <5 % hořlavým jedem, což umožňuje 30měsíční doplňování paliva. ACPR100 je integrální PWR, 450 MWt, 140 MWe, s 69 palivovými soubory. Tlaková nádoba

reaktoru je 17 m vysoká a 4,4 m vnitřní průměr, pracuje při 310 °C. Je navržen jako modul ve větším závodě a bude instalován pod zemí. Tyto aplikace jsou podobné aplikacím pro ACP100.



Koncept plovoucího reaktoru CGN

Pobřežní ACPR50S je 200 MWt, 60 MWe s 37 palivovými soubory a čtyřmi externími parogenerátory. Tlaková nádoba reaktoru je 7,4 m vysoká a 2,5 m vnitřní průměr, pracuje při 310 °C. Je určena pro montáž na člun jako plovoucí jaderná elektrárna (FNPP). Po schválení jako součást 13. pětiletého plánu pro inovativní energetické technologie CGN oznámila zahájení výstavby prvního FNPP v loděnici Bohai v Huludao, jihozápadní provincie Liaoning, v listopadu 2016. Od té doby nebyla učiněna žádná další oznámení o projektu.

HHP25

China Shipbuilding Industry Corporation (CSIC) vyvíjí FNPP poháněné 100 MWt (25 MWe) reaktory HHP25, odvozenými z podmořského reaktoru výzkumného institutu č. 719 CSIC. Na námořní výstavě v Dalianu v říjnu 2018 CSIC uvedl, že „příbřežní

jaderná elektrárna“ bude 163 m dlouhá, 29 m široká s výtlakem 29 800 t. Je poháněn dvěma reaktory HHP25 a dokáže dodat až 200 t/d odsolené vody.

Flexblue

Jednalo se o koncepční návrh od DCNS (nyní Naval Group, státní), Areva, EDF a CEA z Francie. Je navržen tak, aby byl ponořen, 60-100 metrů hluboko na mořském dně až 15 km od pobřeží, a vrácen do suchého doku pro servis. Reaktor, parogenerátory a turbína-generátor by byly umístěny v ponořeném válcovém trupu o hmotnosti 12 000 tun, dlouhém asi 100 metrů a průměru 12-15 metrů. Každý trup a elektrárna by bylo možné přepravovat pomocí účelově postaveného plavidla. Kapacita reaktoru se pohybovala v rozmezí 50-250 MWe, odvozeno od nejnovějších námořních návrhů DCNS, ale podrobnosti nebyly oznámeny. V roce 2011 DCNS uvedla, že by mohla začít stavět prototyp jednotky Flexblue v roce 2013 ve své loděnici v Cherbourgu pro start a nasazení v roce 2016, možná u Flamanville, ale projekt byl zrušen.

UNITHERM

Jedná se o integrální koncepční návrh PWR o výkonu 30 MWt a 6,6 MWe od ruského Výzkumného a vývojového institutu energetiky (RDIPE nebo NIKIET). Má tři chladicí smyčky s přirozenou cirkulací a požaduje samoregulaci s hořlavými jedy v neobvyklém metalokeramickém palivovém designu, takže nepotřebuje více než roční kampaň údržby a žádné doplňování paliva během 25leté životnosti. Hmotnost jedné jednotky se stíněním je 180 tun, takže ji lze odeslat kompletní z továrny na místo.

POLICE

Jedná se o ruský 6 nebo 10 MWe, 28 MWt integrální PWR koncept s turbogenerátorem ve válcovém pouzdru o délce asi 15 m a průměru 8 m, sedící na mořském dně jako Flexblue. Modul SHELF využívá integrální reaktor s nucenou a přirozenou cirkulací v primárním okruhu, ve kterém je aktivní zóna, parogenerátor, motoricky

poháněné oběhové čerpadlo a pohon řídicího a ochranného systému umístěny ve válcové tlakové nádobě. Používá nízko obohacené palivo UO_2 v matrici z hliníkové slitiny. Palivový cyklus je 56 měsíců. Reaktor je založen na provozních prototypch a byl by servisován zřídka. Je zamýšlen jako zdroj energie pro rozvoj ropy a zemního plynu v arktických mořích, přičemž se počítalo s pozemními verzemi. Společnost NIKIET se nachází ve fázi návrhu koncepce, která odhaduje, že dokončení návrhu, udělení licencí, konstrukce a uvedení do provozu bude vyžadovat dalších pět let. Dokončení technického návrhu se předpokládá v roce 2024.

KARAT-45

Jedná se o 45 MWe tankového typu BWR jako samostatné kogenerační zařízení. Konstrukce zahrnuje přirozenou cirkulaci v systému chlazení aktivní zóny pro odvod tepla ve všech provozních režimech a zahrnuje pasivní bezpečnostní systémy. Větší verze je 100 MWe.

IMR

Mitsubishi Heavy Industries má koncepční návrh Integrovaného modulárního reaktoru (IMR), PWR 1000 MWt, 350 MWe. Má projektovanou provozní životnost 60 let, 4,8% obohacení paliva a palivový cyklus 26 měsíců. Má přirozenou cirkulaci pro primární chlazení. Na projektu se podílela Kjótská univerzita, Centrální výzkumný ústav elektrického energetického průmyslu (CRIEPI) a Japonská společnost pro atomovou energii (JAPC), s finanční podporou METI. Cílovým rokem pro zahájení licencování byl nejdříve rok 2020, ale zdá se, že se od návrhu upustilo.

Rolls-Royce SMR

Rolls-Royce pracuje od roku 2015 na konstrukci, která byla původně 220 MWe, ale zaměření se změnilo na středně velký reaktor o výkonu 400-440 MWe (1200-1350 MWt) a od roku 2021 byl označován jako „min. 470 MW“. Jedná se o třísmýčkový PWR s těsně spojenými externími parogenerátory. Má být postaven v továrně, s hlavními

součástmi dopravitelnými na místo (RPV: 11,3 m vysoký, 4,5 m průměr, SG: 4,95 m průměr, asi 25 m vysoký) a smontován za 500 dní. Má konstrukční životnost 60 let. Použilo by palivo obohacené o 4,95 % se spálením 55-60 GWd/t ve 121 standardních palivových souborech PWR s délkou aktivního paliva 2,8 m as použitím spalitelného jedu ve 40 z 264 palivových tyčí v každém. Cyklus tankování by byl 18-24 měsíců. Jeden takový blok by zahrnoval samostatnou elektrárnu.

Počátkem roku 2016 Rolls-Royce předložil vládě Spojeného království podrobný návrh jednotky SMR o výkonu 220 MWe a také dokument ministerstvu obchodu, energetiky a průmyslové strategie, ve kterém nastínil svůj plán na vývoj flotily SMR o výkonu 7 GWe ve Spojeném království. s novým konsorciem plus 9 GWe vyvezených jednotek. V roce 2020 byli partnery Rolls-Royce: Assystem, Atkins, BAM Nuttall, Laing O'Rourke, National Nuclear Laboratory, Nuclear AMRC, Jacobs a The Welding Institute; a v listopadu 2020 přidala americkou utilitu Exelon s cílem provozovat Rolls-Royce SMR ve Spojeném království a v zahraničí. Zaměřuje se na stávající licencovaná jaderná zařízení ve Spojeném království, zejména Trawsfynydd v severním Walesu, místo bývalé jaderné elektrárny Magnox. Doufá, že první jednotka bude v provozu v roce 2030.

V květnu 2021 byly náklady na jednotku o výkonu 470 MWe stanoveny na přibližně 1,8 miliardy GBP, tedy 5100 USD/kW, a vyrovnané náklady na elektřinu (LCOE) na 35–50 GBP/MWh. Společnost předložila návrh pro britský proces generic design assessment (GDA) v listopadu 2021 a v březnu 2022 ONR zahájil GDA.

V listopadu 2017 podepsal Rolls-Royce memorandum o porozumění (MoU) s Jordánskou komisí pro atomovou energii za účelem provedení studie technické proveditelnosti pro stavbu Rolls-Royce SMR v zemi Blízkého východu. V březnu 2020 podepsal turecký státem vlastněný EUAS International ICC memorandum o porozumění s Rolls-Royce s cílem vyhodnotit technickou,

ekonomickou a právní použitelnost SMR. Společnosti navíc zváží možnost společné výroby takových reaktorů. V listopadu 2020 Rolls-Royce oznámil dohodu s českou energetickou společností ČEZ, aby posoudila možné nasazení tam.

Rolls-Royce navrhl od 50. let tři generace námořních reaktorů a provozuje také malý testovací reaktor. Ta vedla koncem 80. let 20. století návrh malého integrálního reaktoru (SIR) o výkonu 330 MWe.

TRVÁ TO

TRIGA Power System je koncept PWR založený na osvědčené konstrukci výzkumného reaktoru společnosti General Atomics. Je koncipován jako bazénový systém o výkonu 64 MWt a 16,4 MWe pracující při relativně nízké teplotě. Sekundární chladicí kapalina je perfluorokarbon. Palivem je uran-zirkoniumhydrid obohacený na 20 % s trochou hořlavého jedu a vyžadující doplňování paliva každých 18 měsíců. Použité palivo je skladováno uvnitř nádoby reaktoru.

FBNR

Nukleární reaktor s pevným ložem (FBNR) je raný koncepční návrh Federální univerzity v Rio Grande do Sul v Brazílii. Jedná se o integrální PWR o výkonu 218 MWt, 70 MWe, s 15 mm oblázkovým palivem.

Reaktor se skládá z aktivní zóny (průměr 1,7 m, výška 2 m) a integrálního horního vyvíječe páry v 6 m vysoké nádobě a palivové komory umístěné pod aktivní zónou. Palivo je vynášeno z palivové komory do aktivní zóny chladičem, které absorbuje teplo aktivní zóny a pokračuje do parogenerátoru. Chladivo se poté vrací do palivové komory přes čerpadlo chladicí kapaliny a tvoří uzavřenou smyčku. Přerušením napájení čerpadla se reaktor vypne, protože palivové obložky padají z aktivní zóny do palivové komory.

Částice paliva Triso se skládají z 5 % obohacených palivových jader UO_2 o průměru 0,5 mm v jediném uhlíkovém obalu o tloušťce 0,1 mm. Každý 15 mm obložek paliva se skládá z palivových částic v

matrici karbidu křemíku (60 % paliva a 40 % SiC) uzavřené ve vnější vrstvě z nerezové oceli o tloušťce 0,5 mm.

SMART od Dunedinu

SMART (Small Modular Adaptable Reactor Technology) od Dunedin Energy Systems v Kanadě je jednotka bateriového typu o výkonu 30 MWt, 6 MWe, instalovaná pod úrovní terénu. Při vrácení do zpracovatelského zařízení k doplnění paliva je nahrazeno novým; při 83% kapacitním faktoru by to bylo každých 20 let. Pohání parní turbínu. Nouzové chlazení je konvekcí. Cena je podle Dunedinu asi 29 c/kWh.

JELLEN z Radixu

DEER (Deployable Electric Energy Reactor) byl vyvinut společností Radix Power & Energy Corporation v USA ve spolupráci s Brookhaven Technology Group, Brookhaven National Laboratory, Parsons Corporation, Dunedin Energy Systems a University of California, Berkeley. DEER je PWR a byl by přenosný a utěsněný, schopný pracovat v rozsahu 10-50 MWe. DEER-1 měl používat palivo založené na tom ve výzkumných reaktorech Triga s desetiletým cyklem a DEER-2 měl používat palivo TRISO pro předsunuté vojenské základny nebo vzdálená těžební místa. Nejsou k dispozici žádné aktuální informace.

Čínské dálkové tepelné reaktory

Tři čínské návrhy jsou určeny pouze pro dálkové teplo 90-110 °C pro severní provincie, zejména Heilongjiang. Snížení zimního znečištění ovzduší je hlavním motorem jejich rozvoje. CGN NHR-200 prošel regulačním přezkumem v 90. letech; CNNC DHR-400 nebo 'Yanlong' je 400 MWt bazénový reaktor; a LandStar-I od SPIC je podobný Yanlongu, ale má 200 MWt.

Těžkovodní reaktory

PHWR-220

Jedná se o nejstarší a nejmenší z řady indických tlakovodních těžkovodních reaktorů (PHWR), celkem 16 je nyní online, 800 MWt, 220 MWe hrubý typicky. Rajasthan 1 byl postaven jako společný podnik mezi Atomic Energy of Canada Ltd (AECL) a Nuclear Power Corporation of India (NPCIL), který byl zahájen v roce 1972. Následný vývoj domácích PHWR byl založen na těchto jednotkách, ačkoli několik fází vývoje může být identifikovány: PHWR s protipožárním a jednoduchým kontejnmentem v Rádžasthánu 1 a 2, PHWR s potlačovacím bazénem a částečným dvojitým kontejnmentem v Madrasu a později standardizované PHWR od Narory dále s dvojitým kontejnmentem, potlačovacím bazénem a kalandrií naplněnou těžkou vodou, umístěné ve vodním zaplněná klenba kalandrie. Jsou moderovány a chlazeny těžkou vodou, a přírodní palivo s oxidem uranu je v horizontálních tlakových trubkách, což umožňuje doplňování paliva online (odstávky údržby jsou naplánovány po 24 měsících). Vyhoření je asi 15 GWd/t.

AHWR-300 LEU

Advanced Heavy Water Reactor vyvinutý Bhaba Atomic Research Center (BARC) je navržen tak, aby široce využíval hojné thorium v Indii jako palivo, ale verze s nízkým obsahem obohaceného uranu je určena pro export. To bude využívat nízko obohacený uran a thorium jako palivo, přičemž se do značné míry obejde bez plutonia u verze pro domácí použití. Přibližně 39 % energie bude pocházet z thoria (přes konverzi in situ na U-233, srovnej dvě třetiny v domácím AHWR) a spalování bude 64 GWd/t. Úroveň obohacení uranu bude 19,75 %, což dává 4,21 % průměrného štěpného obsahu paliva U-Th. Bude mít vertikální tlakové trubky, ve kterých se bude vařit lehká vodní chladicí kapalina pod vysokým tlakem, cirkulace je konvekcí. Nominální 300 MWe, 284 MWe netto. Je ve fázi základního návrhu.

Vysokoteplotní plynem chlazené reaktory

Ty využívají jako moderátor grafit (pokud není typu rychlých neutronů) a jako primární chladivo buď helium, oxid uhličitý nebo dusík. Byly analyzovány zkušenosti několika inovativních reaktorů postavených v 60. a 70. letech 20. století, zejména těch v Německu, zejména ve světle plánů USA na jadernou elektrárnu nové generace (NGNP) a čínského zahájení projektu HTR-PM v roce 2011.

Poznatky získané a zdokumentované pro NGNP zahrnují použití paliva TRISO, použití tlakové nádoby reaktoru a použití chlazení heliem (UK AGR jsou jediné HTR, které používají CO₂ jako primární chladivo). Financování NGNP vládou USA však nyní prakticky přestalo a technologické vedení přešlo na Čínu.

Vyvíjejí se nové vysokoteplotní plynem chlazené reaktory (HTR), které budou schopny dodávat vysokoteplotní (700-950 °C a případně až asi 1000 °C) helium buď pro průmyslové aplikace prostřednictvím výměníku tepla, nebo pro výrobu páry konvenčně. v sekundárním okruhu pomocí parogenerátoru nebo přímo k pohonu plynové turbíny Braytonova cyklu* na elektřinu s téměř 50% možnou tepelnou účinností (účinnost se zvyšuje přibližně o 1,5 % s každým zvýšením o 50 °C). Jedna konstrukce využívá helium k pohonu vzduchového kompresoru pro přeplňování jednotky CCGT. Díky vylepšené metalurgii a technologii vyvinuté v posledním desetiletí jsou HTR praktičtější než v minulosti, ačkoli přímý cyklus znamená, že musí existovat vysoká integrita paliva a součástí reaktoru. Všechny kromě jednoho z níže popsaných mají neutronové moderování grafitem,

* V současné době je malý zájem o provádění přímého Braytonova cyklu pro helium kvůli vyššímu technologickému riziku. Otěr paliva má tendenci vést ke vzniku grafitového prachu s radioaktivitou v okruhu chladicí kapaliny. Také helium musí být velmi čisté, aby se zabránilo korozi.

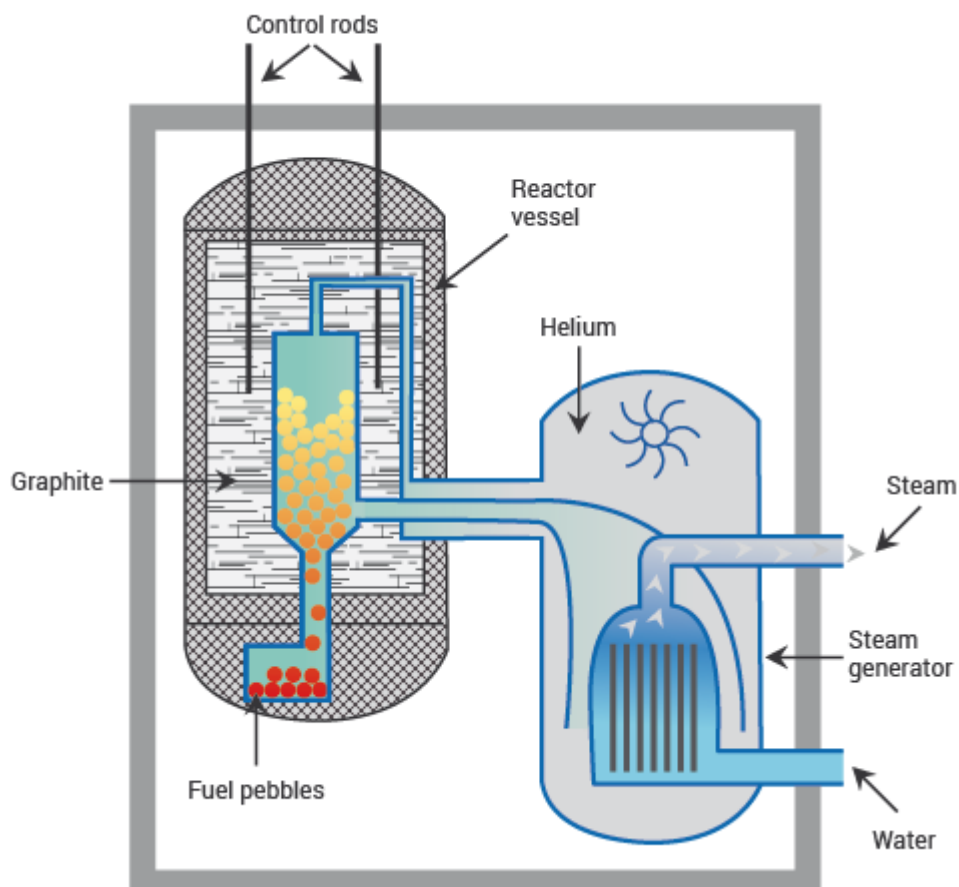
Palivo pro tyto reaktory je ve formě TRISO (tristructural-isotropic) částic o průměru menším než milimetr. Každý z nich má jádro (cca 0,5 mm) oxykarbidu uranu (neboli oxidu uraničitého), přičemž uran

je obohacen až na 20 % U-235, i když normálně méně. Ta je obklopena vrstvami uhlíku a karbidu křemíku, což poskytuje ochranu pro štěpné produkty, která je stabilní až do 1600 °C.

Existují dva způsoby, jak jsou tyto částice uspořádány: v blocích – šestihranných „hranolech“ z grafitu nebo v oblázcích grafitu o velikosti kulečnickové koule, každý s asi 15 000 částicemi paliva a 9 g uranu. Spotřebovaného paliva je větší (20x) než ze stejné kapacity v lehkovodním reaktoru, a to díky tomu, že palivové oblázky jsou převážně grafit – méně než jedno procento tvoří uran. Použité palivo je však celkově méně radiotoxické a díky vyššímu vyhoření produkuje méně rozpadového tepla. Moderátor HTR je grafit.

Existuje několik návrhů plynem chlazených rychlých reaktorů, většinou velkých. Jedna malá konstrukce je General Atomics EM² s heliovým chlazením. Další – superkritický plynový rychlý reaktor s přímým cyklem – je založen na britském AGR, chlazeném oxidem uhličitým. Oba jsou popsány níže.

A High-Temperature Reactor (HTR)



HTR mohou potenciálně využívat paliva na bázi thoria, jako je vysoce obohacený nebo málo obohacený uran s Th, U-233 s Th a Pu s Th. Většina zkušeností s thoriovými palivy je v HTR (viz informační článek o thoriu).

Díky zápornému teplotnímu koeficientu reaktivity (štěpná reakce se zpomaluje s rostoucí teplotou) a pasivnímu odvodu rozpadového tepla jsou reaktory ze své podstaty bezpečné. HTR jsou proto navrženy tak, že nevyžadují žádnou bezpečnostní budovu. Jsou dostatečně malé, aby umožnily tovární výrobu, a obvykle se instalují pod úroveň terénu.

Konkrétně tři návrhy HTR – PBMR, GT-MHR a Areva's SC-HTGR – se ucházely o projekt jaderné elektrárny nové generace (NGNP) v USA (viz sekce *Nukleární elektrárna nové generace* na informační stránce US Nuclear Power Policy). V roce 2012 byla vybrána společnost Areva HTR. Jediným aktuálně probíhajícím projektem HTR v komerčním měřítku je však čínský HTR-PM.

Hybrid Power Technologies má hybridní jaderný malý modulární reaktor (SMR) spojený s plynovou turbínou na fosilní paliva.

HTTR, GTHTTR-300C, HTR50S

Vysokoteplotní testovací reaktor (HTTR) o výkonu 30 MWt od japonské agentury pro atomovou energii (dříve Japan Atomic Energy Research Institute) byl spuštěn na konci roku 1998 a poprvé dosáhl plného výkonu s výstupní teplotou chladicí kapaliny reaktoru 850 °C v prosinci 2001. V roce 2004 dosáhl výstupní teploty 950 °C a v roce 2009 běžel při 950 °C po dobu 50 dnů. Jeho palivem jsou částice TRISO s nízko obohaceným (průměrně 6 %) uranem v hranolech a jeho hlavním účelem je vyvinout termochemický způsob výroby vodíku z vody.

Na základě HTTR vyvíjí JAERI vysokoteplotní reaktor 300 s plynovou turbínou pro kogeneraci (GTHTTR-300C) až do 600 MWt na modul. Využívá vylepšené palivové články HTTR s uranem

obohaceným o 14 % dosahující vysokého vyhoření (120 GWd/t). Helium o teplotě 850-950 °C pohání horizontální turbínu s účinností 47 % k výrobě až 300 MWe. Jádrem tvoří 90 šestihranných palivových sloupů o výšce 8 metrů uspořádaných do prstence, s reflektory. Každý sloupek se skládá z osmi metr vysokých prvků o průměru 0,4 m a držících 57 palivových kolíků vyrobených z palivových částic s jádrem o průměru 0,55 mm a tlumicí vrstvou 0,14 mm. Při každém dvouletém doplňování paliva se vyměňují střídavé vrstvy prvků tak, aby každá zůstala po dobu čtyř let. Vyvíjí se ve spolupráci s Mitsubishi Heavy Industries (MHI), Toshiba/IHI a Fuji a cíl pro komercializaci je kolem roku 2030.

Malý reaktor HTR50S společnosti JAEA založený na HTTR je koncepční návrh pro průmyslový proces a výrobu tepla a/nebo elektřiny. Jedná se o 50 MWt s výstupními teplotami duálního reaktoru 750 °C a 900 °C s maximálním využitím konvenčních technologií za účelem jejich nasazení v rozvojových zemích ve 2020. Zpočátku by to využívalo parní cyklus pro výrobu energie, pak by se zlepšilo palivo a pak by se výstupní teplota reaktoru zvýšila na 900 °C a nainstaloval by se mezilehlý výměník tepla (IHX) pro demonstraci výroby hélia GT a vodíku pomocí procesu IS.

Počátkem roku 2019 vytvořila Japonská agentura pro atomovou energii (JAEA) společný podnik s Penultimate Power UK, aby tam postavil 10 MWe SMR na základě HTTR – označovaného jako EH HTGR – pro energii a procesní teplo v průmyslových klastrech. Plány zahrnují zvýšení návrhu na 100 MWe a vybudování továrny ve Spojeném království pro několik závodů. Společnost Penultimate Power tvrdí, že první reaktor bude stát asi 100 milionů liber (140 milionů dolarů) se snížením pro budoucí bloky. Očekává, že první reaktor bude v provozu do roku 2029.

HTR-10

Čínský HTR-10, 10 MWt vysokoteplotní plynem chlazený experimentální reaktor v Institutu jaderných a nových energetických technologií (INET) na Tsinghua University severně od Pekingu, byl spuštěn v roce 2000 a plného výkonu dosáhl v roce 2003. Jeho palivo má jako „oblázkové lože“ (27 000 prvků) oxidového paliva s průměrným spalováním 80 GWden/tU. Každý oblázkový palivový článek má 5 g uranu obohaceného na 17 % na přibližně 8300 částic potažených TRISO. Reaktor pracuje při 700 °C (potenciálně 900 °C) a má široké výzkumné účely. Nakonec bude spřažen s plynovou turbínou, ale zatím pohání parní turbínu.

V roce 2004 byl malý reaktor HTR-10 podroben extrémní zkoušce své bezpečnosti, když bylo cirkulační čerpadlo s heliem záměrně odstaveno, aniž by byl odstaven reaktor. Teplota se neustále zvyšovala, ale fyzika paliva znamenala, že reakce se postupně snižovala a nakonec po třech hodinách odezněla. V této fázi bylo dosaženo rovnováhy mezi rozpadovým teplem v aktivní zóně a odvodem tepla ocelovou stěnou reaktoru, teplota nikdy nepřekročila bezpečných 1600 °C a nedošlo k žádné poruše paliva. Jednalo se o jeden ze šesti tehdy provedených demonstračních testů bezpečnosti. Velká plocha povrchu vzhledem k objemu a nízká hustota výkonu v jádru budou také rysy plnohodnotných jednotek (které jsou však mnohem menší než většina typů lehké vody.)

HTR-PM

Stavba větší verze HTR-10, čínské HTR-PM, byla v zásadě schválena v listopadu 2005, s přípravou na první beton v polovině roku 2011 a úplným zahájením stavby se počítá v prosinci 2012. Vychází rovněž z německého HTR - Konstrukce modulu 200 MWt. Původně se počítalo s jedním blokem o výkonu 200 MWe (450 MWt), nyní bude mít dva reaktory, každý o výkonu 250 MWt pohánějící jednu parní turbínu o výkonu 210 MWe.*

* Velikost byla snížena na 250 MWt z dřívějších 458 MWt modulů, aby byla zachována stejná konfigurace jádra jako u prototypu HTR-10 a zabránilo se přechodu na prstencový design, jako je jihoafrický PBMR (viz část o PMBR níže)

Každý reaktor má jeden parogenerátor s 19 prvky (665 trubek). Palivo ve formě oblázků o průměru 60 mm je obohaceno o 8,5 % (520 000 prvků ve dvou reaktorech), což vede k vyhoření na výtlaku 90 GWd/t. Výstupní teplota jádra je 750 °C pro helium, teplota páry je 566 °C a teplota na vstupu jádra je 250 °C. Má tepelnou účinnost 40%. Výška aktivní zóny je 11 metrů, průměr 3 m v 25 m vysoké reaktorové nádobě o průměru 5,7 m. Existují dva nezávislé systémy řízení reaktivity: primární se skládá z 24 regulačních tyčí v bočním grafitovém reflektoru, sekundární ze šesti kanálů pro malé kuličky absorberu padající gravitací, rovněž v bočním reflektoru. Při provozu reaktoru se do horní části aktivní zóny uvolňují oblázky jeden po druhém. Odpovídajícím způsobem se odstraní ze dna, rozbité se oddělí, změní se vyhoření, a vyhořelé palivové články jsou tříděny a přepravovány do skladu. Očekává se 40letá provozní životnost.

China Huaneng Group, jeden z hlavních čínských generátorů, je vedoucí organizací zapojenou do demonstrační jednotky s podílem 47,5 %; China Nuclear Engineering & Construction (CNEC) má 32,5% podíl a INET univerzity Tsinghua 20% – je hlavním přispěvatelem do výzkumu a vývoje. Předpokládané náklady jsou 430 milionů USD (ale později jednotky klesnou na 1500 USD/kW s výrobními náklady asi 5 ¢/kWh). Důvodem HTR-PM je jak eventuálně nahradit konvenční reaktorovou technologii pro energii, tak také zajistit budoucí výrobu vodíku. INET má na starosti výzkum a vývoj a jeho cílem bylo zvýšit velikost modulu 250 MWt a také využít thorium v palivu.

Demonstrační elektrárna Shidaowan HTR-PM o výkonu 210 MWe v Rongcheng v provincii Shandong by měla být spuštěna koncem roku 2021, stavba byla zahájena na konci roku 2012. Má připravit cestu pro komerční reaktorové bloky o výkonu 600 MWe (6x250 MWt, celkem 655 MWe) s jediným výměníkem tepla a turbínou, rovněž využívající parní cyklus s tepelnou účinností 43,7 %. Provozní životnost elektrárny je plánována na 40 let s 85% faktorem zatížení. Očekává se, že kapitálové náklady na kW budou činit 75 % malých

HTR-PM au následujících jednotek 50 %. Mezitím CNEC propaguje technologii pro elektrárny HTR-PM 600 využívající šest modulů o výkonu 250 MWt . Nakonec by byla v továrně vyrobena a široce instalována po celé Číně řada HTR, možná s Braytonovým cyklem přímo poháněným plynové turbíny.

Výkon tohoto i jihoafrického designu PBMR zahrnuje velkou flexibilitu v zátěži (40-100 %) bez ztráty tepelné účinnosti a s rychlou změnou nastavení výkonu. Hustota výkonu v aktivní zóně je asi desetina hustoty výkonu v lehkovodním reaktoru, a pokud se zastaví cirkulace chladicí kapaliny, palivo přežije počáteční vysoké teploty, zatímco se reaktor sám odstaví, což poskytuje vlastní bezpečnost. Řízení výkonu se provádí změnou tlaku chladicí kapaliny a tím i průtoku. (Viz také část o Shidaowan HTR-PM na informační stránce o jaderné energii v Číně a část Výzkum a vývoj na informační stránce o čínském jaderném palivovém cyklu).

Urenco U-baterie

Urenco spolu s dalšími zadalo studii TU-Delft a Manchester University, na jejímž základě vyzvalo k evropskému vývoji velmi malého „plug and play“ inherentně bezpečného reaktoru s názvem U-Battery. To je založeno na grafitem moderovaných, heliem chlazených HTR konceptech, jako je britský reaktor Dragon (do roku 1975). Konstrukce palivového bloku vychází z reaktoru Fort St Vrain v USA. Používalo by palivo TRISO s 17-20% obohaceným uranem a případně thoriem s reflektorem na bázi oxidu berylia. Konstrukce o výkonu 10 MWt může produkovat procesní teplo o teplotě 750 °C nebo až 4 MWe záložní a mimosíťový výkon. Konsorcium počítá s až šesti U-bateriemi na jednom místě.

Tato mikro-SMR U-baterie by běžela pět let před tankováním a servisem, větší 20 MWt by běžela 10 let. Provedení 10 MWt/4 MWe, průměr 1,8 m, může být možné vrátit do továrny k doplnění paliva. Konsorcium U-Battery, vedené společnostmi Urenco, získalo podporu

vlády Spojeného království pro prototyp s cílovým provozem v roce 2028. Zapojeny jsou Wood, Laing O'Rourke, Cammell Laird a Kinectrics.

V polovině roku 2018 bylo konsorcium jednou z osmi organizací, kterým byla udělena zakázka na vypracování studie proveditelnosti v rámci britského vládního projektu proveditelnosti a vývoje pokročilého modulárního reaktoru, a v červenci 2020 bylo vybráno pro fázi 2 tohoto projektu. Od roku 2017 byl přijat k předlicenčnímu přezkoumání návrhu dodavatele u Kanadské komise pro jadernou bezpečnost (CNSC). V červenci 2019 se stal prvním návrhem, který dokončil první ze čtyř fází procesu přezkoumání kanadských jaderných laboratoří pro umístění SMR v Chalk River Laboratories v Ontariu.

Ruský HTR pro Indonésii

V roce 2015 získalo konsorcium ruských a indonéských společností pod vedením Nukem Technologies kontrakt na předběžný návrh víceúčelového 10 MWe HTR v Indonésii, který by byl „vlajkovým projektem budoucnosti indonéského jaderného programu“. Bude to oblázková HTR v Serpongu. Atomproekt je generálním architektem a OKBM Afrikantov projektantem. SRI Luch se také zabývá designem paliva. Konceptní návrh byl dokončen v prosinci 2015. V březnu 2018 Batan uvedl, že má za cíl dokončit detailní inženýrský projekt do konce roku a poté vypsát nabídky na výstavbu reaktoru, a to jak na elektřinu, tak na technologické teplo.

X-energie Xe-100

Společnost X-energy založená v roce 2009 v USA navrhuje Xe-100 HTR s oblázkovým ložem o výkonu 200 MWt, 80 MWe a jedná s energetickými společnostmi, přičemž zdůrazňuje, že závod se vejde na pozemek o rozloze 4 ha, pod úrovní pro elektřinu. a/nebo procesní teplo. Počáteční palivo TRISO v polovině roku 2020 bude využívat oxykarbid uranu (UCO) vyrobený z vysoce obohaceného uranu s nízkým obsahem uranu (HALEU), ale jako primární palivo je

zamýšleno dlouhodobé thorium. Na rozdíl od jiných HTR s oblázkovým ložem palivo projde pouze jednou, s vysokým spalováním 160 GWd/t. Poměrně rychlé sledování zátěže od 25 % do 100 % je znakem konstrukce chlazené héliem při 750 °C. Továrně vyrobené jednotky s životností 60 let by byly na místo dopraveny po silnici a instalovány.

Společnost jednala s několika energetickými společnostmi, včetně South Carolina Electricity & Gas (SCEG), o nahrazení uhelné kapacity zařízeními se čtyřmi baleními. Pravděpodobnou aplikací je také průmyslové procesní teplo. X-energy na návrhu spolupracuje s BWX Technology, Oregon State University, Teledyne-Brown Engineering, SGL Group, Idaho National Laboratory (INL) a Oak Ridge National Laboratory (ORNL). V lednu 2016 udělila US DOE projektu grant Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear (GAIN) v hodnotě 53 milionů \$. V září 2016 se Burns & McDonnell Engineering připojil k projektu jako architektonický a inženýrský partner souběžně s pětiletým oceněním DOE. Xe-100 je kandidátem na americký program ARDP (Advanced Reactor Demonstration Program).

V dubnu 2021 X-energy podepsala dohodu s Energy Northwest a veřejnou službou o založení Tri Energy Partnership s cílem vybudovat elektrárnu Xe-100 poblíž jaderné elektrárny Columbia ve státě Washington. Projekt v hodnotě 2,4 miliardy dolarů by byl z poloviny financován ARDP a trval sedm let.

V listopadu 2017 společnost podepsala dohodu s Jordan Atomic Energy Commission o zvažování výstavby Xe-100 v Jordánsku. V srpnu 2020 společnost zahájila přezkoumání návrhu dodavatele u Kanadské komise pro jadernou bezpečnost. Kinetics vede kanadské regulační záležitosti a licenční snahy společnosti X-energy. Společnost doufá, že první jednotky nasadí do roku 2027.

V srpnu 2016 X-energy podepsala dohodu o spolupráci se společností Southern Nuclear Operating Company na spolupráci na vývoji a komercializaci jejich příslušných návrhů malých reaktorů. Southern vyvíjí MSR, rychlý reaktor s roztaveným chloridem (MCFR). V září 2018 společnost X-energy uvedla, že její návrh je dokončen z asi 50 % a že doufá, že úplný návrh bude dokončen do roku 2022 nebo 2023.

X-energy má zařízení na výrobu pilotního paliva TRISO v Oak Ridge National Laboratory, Tennessee a v listopadu 2019 se dohodla s Global Nuclear Fuel (GNF) na zřízení komerční výroby HALEU TRISO v závodě GNF ve Wilmingtonu. X-energy má také dohody s Centrus Energy v USA o vývoji technologie výroby TRISO pro palivo z karbidu uranu a s NFI v Tokai v Japonsku, kde má NFI kapacitu paliva 400 kgU/rok HTR.

X-energie Xe-Mobile

V březnu 2020 udělilo americké ministerstvo obrany kontrakt v hodnotě 14,3 milionů dolarů na další vývoj designu mikroreaktoru pod 5 MWe – Xe-Mobile, se všemi součástmi umístěnými ve standardním přepravním kontejneru. Má být schopen provozu na plný výkon – minimálně 1 MWe – po dobu minimálně tří let. V březnu 2021 ministerstvo obrany vybralo toto jako jednoho ze dvou kandidátů, aby v roce 2022 přistoupili ke konečnému inženýrskému návrhu v rámci druhé fáze projektu Pele ve výši 30 milionů dolarů (viz část Vojenský vývoj výše).

Pokročilý jaderný reaktor BWXT

Společnost BWXT Technologies byla v prosinci 2020 pověřena americkým ministerstvem energetiky vedením projektu mikroreaktoru v hodnotě 106,6 milionů dolarů v rámci programu Advanced Reactor Demonstration Program (ARDP) po dobu sedmi let. Bylo to již v rámci kontraktu s ministerstvem obrany ve výši 13,5 milionu dolarů na vývoj návrhu přenosného mikroreaktoru HTR s palivem TRISO. Toto je 50 MWt BANR (BWXT Advanced Nuclear

Reactor), o kterém bylo zveřejněno několik podrobností. V březnu 2021 DOD vybral toto jako jednoho ze dvou kandidátů, kteří budou pokračovat v konečném inženýrském návrhu v roce 2022 v rámci druhé fáze programu Project Pele. BWXT za to získal 28 milionů \$ (viz sekce Vojenský vývoj výše).

StarCore HTR

Jedná se o malý (20 MWe) koncepční návrh heliem chlazeného reaktoru od StarCore Nuclear v Quebecu, určený pro vzdálené lokality (vytlačující naftu a propan) a se systémem dálkového ovládání přes satelit. Je rozšiřitelný na 100 MWe. Jednotky by byly instalovány pod terénem a ve dvojicích. Jsou přepravitelné kamiony, s reaktorovými nádobami o průměru 2,5 m a výšce 6 m. Palivem je TRISO v uhlíkové prizmatické matici. Každý reaktor má pětiletý plán výměny paliva. Sekundární chladicí okruh je dusíkový do parogenerátoru pohánějícího turbínu. Společnost nabízí koncept postavený-vlastní-provozovat-vyřazení z provozu se smlouvou o nákupu energie po dobu životnosti reaktoru, přičemž uvádí 0,18 kanadských dolarů za kWh. Jednotky jsou navrženy pro dodávku elektřiny a pitné vody.

Společnost požádala CNSC o zahájení procesu přezkoumání návrhu dodavatele před udělením licence.

V dubnu 2018 zahájila společnost Canadian Nuclear Laboratories (CNL) svou revizi SMR – samostatný proces pro udělování licencí – s cílem nechat do roku 2026 postavit SMR na svém místě u Chalk River. V únoru 2019 CNL oznámila, že StarCore dokončila fázi předběžné kvalifikace a byli vyzváni, aby vstoupili do fáze due diligence.

Mikromodulární reaktor USNC

Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC), americká společnost s pobočkami v Kanadě a jinde, má Micro Modular Reactor (MMR) HTR s palivem TRISO v peletách v prizmatických grafitových blocích v utěsněném přenosném jádru. Dvě verze pracují s výkonem 15

MWt/5 MWe nebo 30 MWt/10 MWe s flexibilním výkonem a nevyžadují žádné doplňování paliva při provozní životnosti 20 let, poté se modul stává odpadem. Teplo je přenášeno z jádra heliem do systému roztavené soli. Předpokládá se větší verze.

Fáze 1 předlicenčního přezkoumání návrhu dodavatele ze strany Kanadské komise pro jadernou bezpečnost (CNSC) byla dokončena v únoru 2019 a společnost Global First Power (GFP, společně vlastněná USNC a Ontario Power Generation, OPG) poté podala žádost o licenci na přípravu lokality. pro Chalk River.

Environmentální hodnocení CNSC začalo v červenci 2019. GFP se sídlem v Ottawě se popisuje jako poskytovatel energie specializující se na vývoj projektů, udělování licencí, vlastnictví a provoz malých jaderných elektráren pro dodávky čisté energie a tepla do vzdálených průmyslových provozů a obytných sídel. Formální přezkoumání licencí ze strany CNSC pro 15 MWt MMR začalo v květnu 2021.

V červnu 2020 byl vytvořen společný podnik mezi USNC a OPG s cílem vybudovat, vlastnit a provozovat navrhovaný projekt MMR v Chalk River, Ontario. Společný podnik – Global First Power Limited Partnership – vlastní rovným dílem OPG a USNC-Power, kanadská pobočka USNC. GFP uvedla, že bude pro projekt „poskytovat služby vývoje projektu, licencování, výstavbu a provoz“. MMR by poskytovalo 15 MWt procesního tepla prostřednictvím roztavené soli a mělo by provozní životnost 20 let.

V srpnu 2020 USNC podepsalo dohodu s Hyundai Engineering a Korea Atomic Energy Research Institute o vývoji a nasazení technologie HTR pro dodávku energie i procesního tepla.

V listopadu 2020 USNC podepsala dohodu s polským Synthos a požádala polskou vládu o financování průmyslových vodíkových projektů.

V červnu 2021 University of Illinois oznámila plány na instalaci USNC MMR jako zdroje energie i výzkumného reaktoru ve svém kampusu Urbana-Champaign.

V dubnu 2018 zahájila společnost Canadian Nuclear Laboratories (CNL) svou revizi SMR – proces oddělený od udělování licencí – s cílem postavit SMR na svém místě u Chalk River do roku 2026. GFP/OPG/USNC dokončily první a druhou fázi CNL procesu a byl pozván k účasti ve třetí a předposlední fázi. Očekává se, že výstavba prvního demonstračního reaktoru o výkonu 5 MWe v Chalk River bude zahájena v roce 2023 a v roce 2025 bude uveden do provozu. Poté bude následovat jeden v Idaho National Laboratory a jeden na University of Illinois.

V roce 2020 USNC navrhlo integrovanou solární, větrnou a jadernou elektrárnu poskytující 120 MWe výroby a 1 TWh ročně pro vzdálenou obrannou základnu využívající deset 10 MWe MMR jednotek. Projektované náklady na energii jsou 10 ¢/kWh.

(USNC také vyvíjí systém vypínání odolný proti nehodám pro NASA v jaderných tepelných pohonných systémech.)

Holos Quad HTR

HolosGen navrhuje ve spolupráci s americkou armádou mikromodulární HTR o výkonu 22 MWt, aby se vešel do přepravního kontejneru podle normy ISO 40 stop (12,2 m). Jedná se v podstatě o proudový motor s uzavřenou smyčkou (Braytonův cyklus) se spalovací komorou nahrazenou jaderným tepelným zdrojem obsahujícím čtyři podkritické výkonové moduly (SPM), které jsou aktivně umístěny ve vzájemném vztahu, eliminují mechanismy regulačních tyčí a umožňují rychlé zatížení následující od 3 MWe až 13 MWe. Umístění SPM blízko u sebe umožňuje dostatečný přenos neutronů k dosažení kritičnosti.

Používá palivo TRISO obohacené o 15 % v grafitových šestiúhelníkových blocích s 6 mm heliovými kanály a výstupní teplotou jádra 650-850 °C. Hořlavý jed je v grafitových blocích, ne v palivu. Výměníky tepla jsou zabudovány do komponent kompresoru pro rekuperaci odpadního tepla pro nezávislý organický Rankinův cyklus. Turbo-stroj je magneticky levitován, aby se eliminovaly mechanické spojky a ložiska v jádru. Při instalaci je závod stíněn prefabrikovanou konstrukcí.

Životnost jádra se vztahuje k hmotnosti a 15tunové jádro může fungovat asi 3,5 roku, zatímco 27t jádro může běžet přes osm let.

V červnu 2018 byl projekt přepravitelného reaktoru HolosGen oceněn 2,3 milionu USD agenturou Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E) Ministerstva energetiky USA (DOE), aby prokázal životaschopnost tohoto konceptu. Studie z října 2018 zadaná americkou armádou stanovila odhadované náklady na první jednotku svého druhu o výkonu 13 MWe na 140 milionů dolarů, u pozdějších jednotek se snížila na 75 milionů dolarů.

HolosGen spolupracuje s Argonne National Laboratory.

Hybridní koncept SMR

Hybridní jaderný malý modulární reaktor (SMR) od společnosti Hybrid Power Technologies LLC produkuje obrovské množství stlačeného vzduchu, zatímco plynová turbína, schopná spalovat řadu fosilních paliv, vyrábí elektrickou energii. Helium z 600 MWt grafitem moderovaného reaktoru pohání primární turbínu spojenou se vzduchovým kompresorem. Vzduch o velmi vysokém tlaku pak přeplňuje plynovou turbínu s kombinovaným cyklem (CCGT), která pohání generátor o výkonu 850 MWe s účinností 85 %. Reaktor a kompresor jsou v úplné kontejnmentové konstrukci. (Skutečný HTR je ekvivalentní výkonu méně než 300 MWe, takže tato složka je stále „malá“) Společnost požádala o druhé kolo financování DOE v roce 2013.

Superkritický koncept rychlého reaktoru s přímým cyklem CO₂

Jedná se o konstrukci IV. generace částečně založenou na osvědčených britských pokročilých plynem chlazených reaktorech (AGR). Rychlý superkritický plynový reaktor s přímým cyklem (SC-GFR) využívá superkritické chladivo CO₂ při 20 MPa a 650 °C z rychlého reaktoru s tepelným výkonem 200 až 400 MW v Braytonově cyklu. Malé jádro reaktoru s dlouhou životností by mohlo udržet odvod rozpadového tepla přirozenou cirkulací. Popisuje to dokument z roku 2011 od Sandia Laboratories. (S-CO₂ je použitelný pro mnoho různých zdrojů tepla, včetně koncentrovaného solárního systému. Vyznačuje se vysokou účinností u menších a jednodušších elektráren. S héliem chlazeným HTR nebo sodíkem chlazeným rychlým reaktorem by to byl sekundární okruh.)

Antares – SC-HTGR

Další design HTR v plné velikosti předkládá Framatome (dříve Areva). Vychází z GT-MHR a zapojila se do něj i Fuji. Referenční návrh je 625 MWt s prizmatickým blokovým palivem jako GT-MHR. Výstupní teplota aktivní zóny je 750 °C pro verzi HTR s parním cyklem (SC-HTGR), i když se počítá s případnou verzí reaktoru s velmi vysokou teplotou (VHTR) s 1000 °C a přímým cyklem. Současná koncepce využívá nepřímý cyklus s párou v sekundárním systému nebo případně směsí hélia a dusíku pro VHTR, čímž se odstraňuje možnost kontaminace výrobní, chemické nebo vodíkové výrobní radionuklidy z aktivní zóny reaktoru. Byl vybrán v roce 2012 pro americkou jadernou elektrárnu nové generace se dvěma smyčkami sekundárního parního cyklu, 625 MWt pravděpodobně dává 285 MWe na jednotku, ale primárním cílem je výstupní teplota hélia 750 °C pro průmyslové aplikace. Zůstává ve fázi koncepčního návrhu.

Adamsův motor

Malým konceptem HTR je 10 MWe přímé přímé zařízení s Braytonovým cyklem společnosti Adams Atomic Engines s nízkotlakým dusíkem jako chladivem reaktoru a pracovní kapalinou

a grafitovým moderováním. Jádro reaktoru je pevné, prstencové lože s asi 80 000 palivovými články, každý o průměru 6 cm a obsahujícím přibližně 9 gramů těžkého kovu ve formě částic TRISO, s očekávaným průměrným spalováním 80 GWd/t. Počáteční bloky by zajistily výstupní teplotu aktivní zóny reaktoru 800 °C a tepelnou účinnost blízkou 25 %. Výkon je řízen omezením průtoku chladicí kapaliny. Demonstrační závod byl navržen k dokončení po roce 2018, ale návrh je odložen. Adams Engine je navržen tak, aby byl konkurenceschopný se spalovacími plynovými turbínami.

Předchůdcem byl dusíkem chlazený reaktor ML-1 s plynovou turbínou s uzavřeným cyklem, navržený jako přenosný vzduchem a součástí programu jaderné energetiky americké armády (ANPP). Byl moderován vodou, s vysoce obohaceným palivem a od roku 1961 pracoval několik stovek hodin až na dvě třetiny svého projektovaného výkonu 300 kW, ale různé problémy způsobily, že byl projekt v roce 1965 odstaven. Vysokotlaký plynový cyklus s dusíkem při 910 kPa byl jeden problém.

PBMR a deriváty

Jihoafrický modulární reaktor s oblázkovým ložem (PBMR) byl vyvíjen konsorciem PBMR (Pty) Ltd vedeným společností Eskom, později se zapojením Mitsubishi Heavy Industries, a čerpal z německých odborných znalostí, zejména z návrhu HTR-Modul. Jeho cílem byla skoková změna v oblasti bezpečnosti, ekonomiky a odolnosti proti šíření. Plné výrobní jednotky byly plánovány na 400 MWt (165 MWe), ale novější plány byly 200 MWt (80 MWe)⁷. Finanční omezení vedla ke zpoždění⁸ a v září 2010 jihoafrická vláda potvrdila, že zastaví financování projektu⁹ a uzavřela jej.

Dřívější plány pro 400 MWt PBMR po revizi v roce 2002 předpokládaly generátor plynové turbíny s přímým cyklem (Braytonův cyklus) a tepelnou účinností asi 41 %, přičemž chladivo helia opouští dno aktivní zóny při teplotě asi 900 °C a pohání turbínu. Výkon by se nastavil změnou tlaku v systému. Hélium

prochází vodou chlazeným předchladičem a mezichladičem, než se vrátí do nádoby reaktoru. Očekávalo se, že demonstrační elektrárna PBMR (DPP) bude zahájena v Koebergu v roce 2009 a v roce 2013 dosáhne kritičnosti, ale poté, co bylo toto zpoždění odloženo, bylo rozhodnuto zaměřit se na návrh 200 MWt⁶.

Později oznámený design o výkonu 200 MWt (80 MWe) ohlášený v roce 2009 měl používat konvenční Rankinův cyklus, který umožnil PBMR dodávat přehřátou páru prostřednictvím parního generátoru a také vyrábět elektřinu. Tento návrh „je zaměřen na aplikace tepelného zpracování páry pracující při 720 °C, což poskytuje základ pro pronikání na trh s jaderným teplem jako životaschopná alternativa pro zdroje tepla spalující uhlík s vysokými emisemi.“¹⁰ V únoru 2010 byla podepsána dohoda s Mitsubishi Heavy Industries o pokračování výzkumu a vývoje tohoto návrhu. MHI se na projektu podílela od roku 2001, když provedla základní návrh a výzkum a vývoj systému turbogenerátoru poháněného héliem a montáže hlavní komory, hlavní součásti konstrukce s přímým cyklem 400 MWt.

PBMR má vertikální ocelovou tlakovou nádobu reaktoru, která obsahuje a podpírá kovový barel jádra, který zase nese válcové oblázkové palivové jádro. Toto jádro je ze strany obklopeno vnějším grafitovým reflektorem a nahoře a dole grafitovými strukturami, které poskytují podobné funkce odrazu horních a dolních neutronů. Svislé otvory v bočním reflektoru jsou určeny pro prvky řízení reaktivity. Asi 360 000 palivových oblázků (částice oxidu uraničitého obohaceného o 9,6 % potažené karbidem křemíku uzavřené v grafitových kuličkách o průměru 60 mm) cirkuluje reaktorem nepřetržitě (každý asi šestkrát), dokud se asi po třech letech nespotřebují. To znamená, že reaktor by během své projektované životnosti vyžadoval celkem 12 dávek paliva.

Byla plánována továrna na oblázkové palivo v Pelindabě. Mezitím společnost vyrobila nějaké palivo, které bylo úspěšně testováno v Rusku.

PBMR byl navržen pro americký projekt jaderné elektrárny nové generace a předložení žádosti o certifikaci návrhu dosáhlo fáze posouzení před podáním žádosti, ale nyní je NRC uvedeno jako „neaktivní“. Společnost byla součástí konsorcia National Project Management Corporation (NPMC), které požádalo o druhé kolo financování DOE v roce 2013. Zdálo se, že tato žádost o federální fondy z roku 2013 oživila dřívější design PBMR s přímým cyklem a zdůraznila jeho atributy „hlubokého spalování“. při ničení aktinidů a dosahování vysokého vyhoření při vysokých teplotách.

V roce 2016 Eskom oživil úvahy o reaktoru založeném na PBMR s cílem vyvinout design, který je jednodušší a účinnější než původní, a také se podívat na aplikace pro procesní teplo, které nebyly plně prozkoumány původním programem výzkumu a vývoje. Většina vědeckých a technických pracovníků však emigrovala, mnoho z nich do USA a mnoho se připojilo k podobnému projektu X-energy.

Novou koncepcí bylo nasazení pokročilého vysokoteplotního reaktoru o výkonu 150 MWe ve třicátých letech 20. století a pilotní zařízení o výkonu 50 MWe postavené v polovině roku 2020. Bylo by to zařízení s kombinovaným cyklem s prouděním plynu nyní zdola nahoru a teplota bude mnohem vyšší. Tlaková nádoba by byla betonová a měla by jádro reaktoru s oblázkovým ložem. Helium by vycházelo z reaktoru do plynové turbíny při 1200 °C a výfukové plyny z ní při 600 °C by poháněly parní cyklus využívající okruh roztavené soli s celkovou tepelnou účinností 60 %. Plynová turbína by vyrobila 40 % energie, parní cyklus 60 %.

Dalším koncepčním návrhem je HTMR-100, 35 MWe (100 MWt) oblázkové lože HTR pro elektřinu nebo procesní teplo. Koncepční návrh, zahájený v roce 2012, od Steenkampskraal Thorium Limited (STL) v Jižní Africe, byl dokončen v roce 2018. Také známý jako Th-100 je odvozen z návrhů Jülich a PBMR. Pokud jde o elektřinu, jednotlivé bloky mají schopnost sledovat zatížení nebo čtyři mohou tvořit elektrárnu o výkonu 140 MWe. Existuje řada palivových možností zahrnujících LEU, thorium a plutonium pro reaktory, se

spálením 80-90 GWd/t obléků paliva TRISO. Má grafitový moderátor a heliové chladivo při 750 °C a palivový cyklus s jedním průchodem. Nádoba reaktoru je 15 m vysoká, má průměr 5,9 m a tlak primární smyčky je relativně nízký, 4 MPa.

GT-MHR

V 70. letech 20. století General Atomics vyvinula HTR s hranolovými palivovými bloky na základě bloků v 842 MWt reaktoru Fort St Vrain, který běžel v letech 1976-89 v USA. Licenční přezkum NRC probíhal až do zrušení projektů koncem 70. let.

Z toho se v 80. letech vyvinula plynová turbína General Atomics – modulární heliový reaktor (GT-MHR), která by byla postavena jako moduly o výkonu až 600 MWt, ale typicky 350 MWt, 150 MWe. Ve své elektrické aplikaci by každý přímo poháněl plynovou turbínu s tepelnou účinností 47 %. Mohl by být také použit pro výrobu vodíku (100 000 t/rok nárokováno) a další vysokoteplotní procesní tepelné aplikace. Prstencové jádro, umožňující pasivní odvod rozpadového tepla, se skládá ze 102 šestihranných sloupců palivových článků z grafitových bloků s kanály pro chladivo helia a regulačními tyčemi. Grafitové reflektorové bloky jsou uvnitř i kolem jádra. Polovina jádra se vyměňuje každých 18 měsíců. Obohacení je asi 15,5 %, vyhoření je až 220 GWd/t a výstupní teplota chladicí kapaliny je 750 °C s cílem 1000 °C.

GT-MHR byl vyvinut General Atomics ve spolupráci s ruskou OKBM Afrikantov, podporovaný Fuji (Japonsko). Areva se na tom dříve podílela, ale pak sama vyvinula základní design jako Antares. Zpočátku měl být GT-MHR použit ke spalování čistého plutonia z bývalých zbraní v Seversku (Tomsk) v Rusku. Pro toto palivo je potřeba hořlavý jed jako je Er-167. Fáze předběžného návrhu byla dokončena v roce 2001, ale program na stavbu prototypu v Rusku se poté zastavil.

General Atomics uvedl, že neutronové spektrum GT-MHR je takové a palivo TRISO je tak stabilní, že reaktor by mohl být plně poháněn separovaným transuranovým odpadem (neptunium, plutonium, americium a curium) z paliva použitého v lehkovodním reaktoru. Plodné aktinidy by umožnily kontrolu reaktivity a bylo by s nimi možné dosáhnout velmi vysokého vyhoření – přes 500 GWd/t – koncept „Deep Burn“. Více než 95 % Pu-239 a 60 % ostatních aktinidů by bylo zničeno jediným průchodem.

Menší verze GT-MHR, Remote-Site Modular Helium Reactor (RS-MHR) o výkonu 10-25 MWe, byla navržena společností General Atomics. Palivo by bylo obohaceno o 20 % a interval tankování by byl 6-8 let.

EM²

V únoru 2010 společnost General Atomics oznámila svůj rychlý neutronový modul Energy Multiplier Module (EM²), který nahrazuje jeho GT-MHR. EM² je 500 MWt, 265 MWe heliem chlazený rychlý neutronový HTR pracující při 850 °C pro dosažení 53% čisté tepelné účinnosti s různými palivy a využívající Braytonův cyklus. Má několik pasivních bezpečnostních prvků a zejména plášť palivové tyče je vyroben z patentovaného kompozitu SiGA karbidu křemíku společnosti GA, vysoce technologického kompozitu s keramickou maticí, který vydrží více než dvojnásobek teplot než kovové komponenty používané ve většině reaktorů. Odvod odpadního tepla je zcela pasivní.

EM² může být poháněno 20 tunami použitého paliva PWR nebo ochuzeného uranu plus 22 tun nízko obohaceného uranu (~12 % U-235, HALEU) jako startér. Použité palivo z něj je zpracováno k odstranění štěpných produktů (asi 4 tuny) a zbytek je recyklován jako palivo pro další kola, pokaždé doplněno o 4 tuny dalšího použitého paliva PWR. Každý cyklus doplňování paliva může trvat až 30 let. Při opakované recyklaci se množství použitého původního přírodního uranu (před použitím v PWR) zvýší z 0,5 % na 50 %

přibližně v cyklu 12. Vysoce aktivní odpad tvoří asi 4 % odpadu z PWR v otevřeném palivovém cyklu. EM² by bylo také vhodné pro aplikace procesního tepla. Hlavní tlaková nádoba může být na místo přepravena nákladním automobilem nebo zábradlím a instalována pod úroveň terénu a vysokorychlostní (plynový) turbínový generátor je také přepravitelný kamionem. Společnost očekává, že čtyřblokový závod EM² bude postaven za 42 měsíců. Způsoby přepracování k odstranění štěpných produktů nejsou specifikovány, kromě toho, že se nejedná o mokrý proces. Společnost požádala o druhé kolo financování DOE v roce 2013.

Společnost počítá s 12letým vývojovým a licenčním obdobím, což je v souladu s 80 MWt experimentální technologie demonstračního plynem chlazeného rychlého reaktoru (GFR) v programu IV. generace¹. GA se spojila s Chicago Bridge & Iron, Mitsubishi Heavy Industries a Idaho National Laboratory na vývoji EM².

Rychlý modulární reaktor GA-Framatome

General Atomics Electromagnetic Systems Group (GA-EMS) v USA spolupracuje s Framatome Inc. (americká pobočka Framatome) na vývoji nového designu 50 MWe chlazeného heliem, rychlého modulárního reaktoru (FMR), primárně pro elektřinu využívající Braytonův cyklus při 45% tepelné účinnosti. Cyklus doplňování paliva by měl trvat devět let, zřejmě s použitím patentovaného kompozitního palivového pláště SiGA SiGA, ačkoli nebyly oznámeny žádné informace o palivu. Bude chlazený nasucho z hlediska odpadního tepla, s pasivní bezpečností. Bude mít schopnost rychlé odezvy sledování zátěže přibližně 20 % za minutu, při současném udržování teploty reaktoru, aby se zmírnila únava součástí tepelného cyklu. Bude továrně postaveno a smontováno na místě. Americký inženýrský tým Framatome bude zodpovědný za návrh několika kritických struktur, systémy a komponenty pro FMR. Očekává se, že demonstrační jednotka bude uvedena do provozu začátkem 30. let 20. století. Očekává se, že provozní teplota bude přes 700 °C (srov. 850 °C pro EM² při vyšší tepelné účinnosti)

GA-EMS je oddělená od General Atomics' Energy Group, která vyvíjí Energy Multiplier Module (EM²). GE-EMS je nejlépe známá pro elektromagnetické startovací a záchranné systémy letadel namontované na nejnovějších amerických letadlových lodích, stejně jako železniční děla a hyperrychlostní projektily.

Rychlé neutronové reaktory

Reaktory s rychlými neutrony (FNR) jsou menší a jednodušší než lehkovodní typy, mají lepší palivové vlastnosti a mohou mít delší interval doplňování paliva (až 20 let), ale je třeba pro ně vytvořit nové bezpečnostní pouzdro, alespoň v Západ. Jsou navrženy tak, aby využívaly celý energetický potenciál uranu, spíše než jeho jedno procento, které využívají konvenční energetické reaktory. Nemají moderátor, mají vyšší tok neutronů a jsou normálně chlazeny tekutým kovem, jako je sodík, olovo nebo olovo-bismut, s vysokou vodivostí a bodem varu. Pracují při atmosférickém tlaku nebo v jeho blízkosti a mají pasivní bezpečnostní prvky (většina má konvekci cirkulující primární chladivo). Automatická regulace výkonu je dosažena díky zpětné vazbě reaktivity – ztráta průtoku chladicí kapaliny vede k vyšší teplotě jádra, což zpomaluje reakci.

Paliva jsou většinou obohacena na 15-20% a může jít o nitrid uranu – UN, (U,Pu)N, (U,transuranic)N, nebo (U,Pu)Zr. V USA není žádná obohacovací elektrárna navržena pro více než 10% obohacení, ale vláda má nepřidělených 26 tun HEU, což by mohlo být smícháno pro rychlé reaktory.

Většina chladicích kapalin jsou tekuté kovy, buď sodík, který je hořlavý a prudce reaguje s vodou, nebo olovo/olovo-bismut, který je korozivní, ale nereaguje se vzduchem nebo vodou. Eliminuje potřebu a související náklady na dodatečné komponenty a redundantní bezpečnostní systémy vyžadované jinými technologiemi pro ochranu před úniky chladicí kapaliny. Obě chladicí kapaliny lze používat při

atmosférickém tlaku nebo blízkém tlaku, což zjednodušuje konstrukci a snižuje náklady. Jejich vysokoteplotní provoz prospívá termodynamické účinnosti.

Existují dvě výjimky z chlazení tekutým kovem: plyn a sůl.

Dva koncepty plynem chlazeného rychlého reaktoru (GFR) – Energy Multiplier Module (EM²) a Fast Modular Reactor (FMR) – byly oznámeny společností General Atomics a jsou popsány v sekci HTR výše. Koncepte je také sledována v programu Generace IV, přičemž Allegro (50-100 MWt) je vyvíjeno střediskem V4G4 ve východní Evropě s francouzskou podporou. V květnu 2021 český jaderný výzkumný ústav UJV Řez oznámil svůj projekt Hefasto založený na Allegru, jehož cílem je vyvinout reaktor o výkonu 200 MWt pracujícím při teplotách až 900 °C. Tři verze budou určeny pro vytápění, kogeneraci a chemický průmysl.

Chlazení solí je v konceptu rychlého reaktoru s roztaveným chloridem (MCFR), který vyvíjí společnost Southern Company Services v USA s TerraPower, Oak Ridge National Laboratory (ORNL) a EPRI. Pilotní verze tohoto bude postavena v Idaho National Laboratory. Také olověná verze stabilního solného reaktoru Moltex je rychlá. Ty jsou popsány v části Reaktory roztavené soli níže.

Malé FNR jsou navrženy tak, aby byly vyrobeny v továrně a odeslány na místo na nákladním automobilu, vlaku nebo člunu a poté odeslány zpět nebo do regionálního centra palivového cyklu na konci životnosti. Většinou by byly instalovány pod úrovní terénu a s vysokým poměrem plochy k objemu mají dobrý pasivní chladič potenciál. Likvidace je uvažována jako celé jednotky, bez samostatného skladování vyhořelého paliva, nebo po odstranění paliva k přepracování.

Viz také článek Fast Neutron Reactors.

Sodíkem chlazené rychlé reaktory

Několik amerických společností vyvíjí návrhy rychlých reaktorů chlazených sodíkem na základě 62,5 MWt experimentálního šlechtitelského reaktoru II (EBR-II). EBR-II byl významný prototyp rychlého reaktoru, reaktor pro recyklaci paliva v Idaho National Laboratory (dříve Argonne National Laboratory - Západ), který během asi 30 let produkoval 19 MWe. Jako palivo používala pyrometalurgicky rafinované použité palivo z lehkovodních reaktorů, včetně široké škály aktinidů. Po provozu v letech 1963 až 1994 je nyní vyřazen z provozu. EBR-II byl základem amerického programu Integral Fast Reactor (IFR) (původně program Advanced Liquid Metal Reactor) a tento termín IFR se opět používá. EBR-III o výkonu 200-300 MWe byl navržen, ale nebyl vyvinut (viz také informační stránka o rychlých neutronových reaktorech).

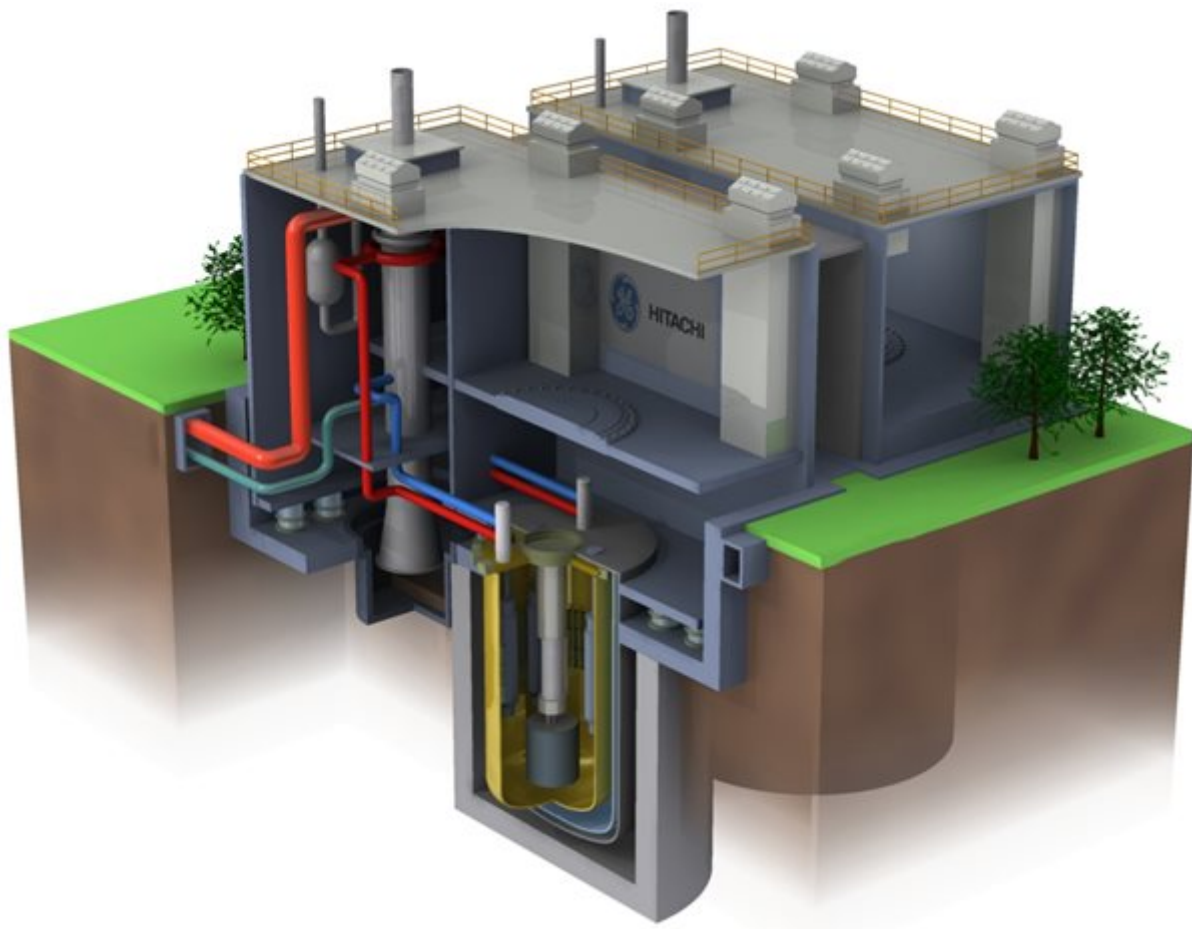
PRISM, Natrium

GE ve spolupráci s americkými národními laboratoři vyvíjela modulární inherentně bezpečný reaktor chlazený kapalným kovem – PRISM (Power Reactor Innovative Small Module) – v rámci programu Advanced Liquid Metal Reactor/Integral Fast Reactor (ALMR/IFR) financovaného ministerstvem USA. energie.

Konstrukce vychází z EBR-II a původního IFR. Dalším předchůdcem byla elektrárna s rychlým reaktorem GE pro USS Seawolf 1957-58. Program ALMR/IFR byl zrušen v roce 1994 a žádný americký reaktor s rychlými neutrony dosud nebyl větší než 66 MWe a žádný komerčně nedodával elektřinu. Zpráva o hodnocení bezpečnosti před aplikací z roku 1994 ¹³ pro původní návrh PRISM však dospěla k závěru, že „nebyly identifikovány žádné zjevné překážky pro licencování návrhu PRISM“.

Dnešní PRISM je design GE Hitachi (GEH) pro kompaktní modulární reaktory bazénového typu s pasivním chlazením pro odvod rozpadového tepla. Po 30 letech vývoje představuje řešení GEH IV. generace pro uzavření palivového cyklu v USA. Každý energetický blok PRISM se skládá ze dvou modulů po 311 MWe (840 MWt) (nebo dříve ze tří modulů 155 MWe, 471 MWt), každý s jedním

parogenerátorem, které společně pohání jeden turbínový generátor. Moduly bazénového typu pod úrovní terénu obsahují kompletní primární systém se sodíkovým chladičem o teplotě cca 500°C. Mezilehlá sodíková smyčka odebírá teplo do parogenerátorů. Kovové palivo Pu & DU se získává z použitého paliva pro lehkovodní reaktory. Všechny transuranové prvky jsou při elektrometalurgickém přepracování odstraněny společně, takže čerstvé palivo má spolu s plutoniem a uranem minoritní aktinidy.



Výřez z designu PRISM (GE Hitachi)

Reaktor je navržen tak, aby používal jádro z heterogenní kovové slitiny se 192 palivovými soubory ve dvou palivových zónách. Ve verzi určené pro recyklaci použitého paliva LWR se jedná o palivo, které poskytuje špičkové vyhoření 122 GWd/t. V jiných verzích pro chov nebo spotřebu plutonia ve zbraních je 42 z nich vnitřní a 42 radiálních, se 108 jako pohonné palivo a maximální spotřebou 144 GWd/t. U verze s recyklací paliva LWR zůstává palivo v reaktoru čtyři roky, přičemž jedna čtvrtina je ročně odstraněna a je

spotřebováno 72 kg/rok čistého štěpného plutonia. V množivé verzi palivo zůstává v reaktoru asi šest let, přičemž každé dva roky se odstraní jedna třetina a čistá produkce štěpného plutonia je 57 kg/rok. Chovný poměr závisí na účelu a tedy konfiguraci, takže se pohybuje od 0,72 pro použitý recyklovaný LWR do 1,23 pro chovatele.

Koncept elektrárny v komerčním měřítku, který je součástí „Advanced Recycling Center“, by využíval tři energetické bloky (šest reaktorových modulů) k poskytnutí 1866 MWe. V roce 2011 GE Hitachi oznámila, že mění svou marketingovou strategii, aby reaktor nabídla přímo energetickým společnostem jako způsob recyklace přebytečného plutonia při výrobě elektřiny pro rozvodnou síť. GEH to účtuje jako zjednodušený design s prvky pasivní bezpečnosti a využívající modulární konstrukční techniky. Její referenční harmonogram výstavby je 36 měsíců. V říjnu 2016 GEH podepsala dohodu se Southern Nuclear Development, dceřinou společností Southern Nuclear Operating Company, o spolupráci na licencování rychlých reaktorů včetně PRISM. V červnu 2017 se GEH připojil k týmu vedeném společností High Bridge Energy Development Co. včetně společností Exelon Generation, High Bridge Associates a URS Nuclear, aby získali licenci na PRISM.

GEH propaguje vládním agenturám Spojeného království potenciální využití technologie PRISM k likvidaci zásob plutonia ve Spojeném království. Dvě jednotky PRISM by ozařovaly palivo vyrobené z tohoto plutonia (20 % Pu, s DU a zirkoniem) po dobu 45-90 dní, čímž by se dostalo na úroveň radioaktivity „vyhořelého paliva“, načež by se skladovalo ve vzduchem chlazených silech. Celá zásoba by tak mohla být ozářena za pět let s určitým vedlejším produktem elektřiny (ale častými přerušeními kvůli výměně paliva) a elektrárna by ji pak znovu využila po dobu asi 55 let pouze pro výrobu elektřiny 600 MWe, s jednou -třetina paliva se mění každé dva roky. Pro tuto verzi

pro Spojené království je chovný poměr 0,8. Zpočátku se nepočítá s provozem na přepracování („Advanced Recycling Center“), ale mohl by být přidán později.

V březnu 2017 GEH a Advanced Reactor Concepts (viz níže) podepsaly dohodu o spolupráci na licencování návrhu SMR založeného na ARC-100, ale čerpající z rozsáhlých zkušeností s duševním vlastnictvím a licenčními podmínkami programu GEH PRISM. Počáteční nasazení se předpokládá v Kanadě, v Point Lepreau v New Brunswick. ARC bude usilovat o předběžnou regulační kontrolu u CNSC prostřednictvím procesu Vendor Design Review.

V únoru 2019 spustilo US DOE svůj program Versatile Test Reactor (VTR), zřízený podle zákona o inovačních schopnostech jaderné energie z roku 2017 a provozovaný Idaho National Laboratory. Cílem programu je poskytnout schopnost pro testování pokročilých jaderných paliv, materiálů, přístrojového vybavení a senzorů. VTR, který má být v provozu v INL do konce roku 2025, by byl upraveným reaktorem PRISM, který by poskytoval zrychlené poškození neutrony 20krát vyšší než současné vodou chlazené testovací reaktory. (Jediný další rychlý výzkumný reaktor v provozu je BN-60 v Rusku, který bude po roce 2020 nahrazen MBIR tam.) V lednu 2020 GEH a TerraPower oznámila spolupráci na realizaci partnerství veřejného a soukromého sektoru při navrhování a konstrukci VTR pro DOE. Podporovalo by je energetické konsorcium Energy Northwest.

Další spoluprací mezi GE Hitachi a Terrapower je koncept Natrium. To je založeno na reaktoru PRISM o výkonu 345 MWe a využívá roztavenou sůl k akumulaci tepla, takže výkon mohl být zvýšen na přibližně 500 MWe po dobu až pěti hodin pro sledování zátěže. Primárním chladivem je sodík, sekundárním chladivem je roztavená sůl, která může akumulovat teplo nebo ji použít k výrobě páry v tepelném výměníku, přičemž se mezi nimi podle potřeby přepíná, takže výkon elektrárny se může pohybovat mezi 30 % a 150 % výkonu reaktoru. Zákazníkům by to „pomohlo vytěžit maximum z příležitostí

tažených kolísáním energie z obnovitelných zdrojů“. Natrium je součástí DOE Advanced Reactor Demonstration Program (ARDP), který nabízí finanční prostředky na bázi sdílení nákladů a v říjnu 2020 získal počáteční grant ve výši 80 milionů \$. V říjnu 2020 se Bechtel připojil ke konsorciu, aby poskytoval design, licencování,

V červnu 2021 TerraPower oznámila plány na vybudování demonstrační jednotky Natrium ve Wyomingu v areálu vysloužilé uhelné elektrárny. Plánuje podat žádost o stavební povolení v roce 2023 a žádost o provozní licenci v roce 2026. Očekává se, že elektrárna bude stát méně než 1 miliardu USD kromě financování.

Viz také část *Elektrometalurgické „pyrozpracování“* na informační stránce o zpracování použitého jaderného paliva .

Integrální rychlý reaktor, ARC-100

Advanced Reactor Concepts LLC (ARC) založená v roce 2006 vyvinula 260 MWt/100 MWe sodíkem chlazený rychlý reaktor založený na 62,5 MWt experimentálním Breeder Reactor II (EBR-II). Bude vyráběn v továrně, s komponenty snadno smontovatelnými na místě a s pasivní bezpečností typu „walk-away“. Instalace by byla pod úrovní terénu.

System ARC-100 obsahuje patronu s kovovým jádrem z uranové slitiny ponořenou v sodíku při okolním tlaku v nádrži z nerezové oceli. Kapalný sodík je čerpán přes jádro, kde je zahřátý na 510°C, poté prochází integrovaným výměníkem tepla (uvnitř bazénu), kde ohřívá sodík v mezismyčce, která zase ohřívá pracovní kapalinu pro výrobu elektřiny. Měl by mít interval doplňování paliva 20 let pro výměnu kazety s 20,7 tuny paliva. Počáteční palivo bude nízko obohacený uran (10,1 % vnitřní zóna, 12,1 % střední zóna, 17,2 % vnější zóna mezi 92 palivovými soubory nad 1,5 m palivové výšky), ale bude schopno spalovat odpady z lehkovodních reaktorů nebo plutonium. Přepřacování použitého paliva neoddělí plutonium. ARC-100 má schopnost sledovat zatížení. Tepelná účinnost je asi 40 % a

mohla by být spárována se superkritickým terciárním okruhem oxidu uhličitého pro pohon turbíny s vysokou účinností. Provozní náklady se odhadují na 50 USD/MWh.

V březnu 2017 GEH a ARC podepsaly dohodu o spolupráci na licencování návrhu SMR založeného na ARC-100, která využije rozsáhlé zkušenosti s duševním vlastnictvím a licencováním programu GEH PRISM. Další dohoda ze srpna 2017 poskytla společnosti ARC licenci na technologii PRISM a poskytla společnosti ARC inženýrské a designové znalosti GEH. Počáteční nasazení předpokládá ARC Canada v Kanadě a v říjnu 2019 dokončila CNSC fázi 1 předlicenčního přezkoumání návrhu dodavatele pro ARC-100.

V červenci 2018 ARC a New Brunswick Power oznámily, že zkoumají potenciální nasazení reaktoru ARC-100 v jaderné elektrárně Point Lepreau v New Brunswicku, a v listopadu 2020 se k těmto dvěma společnostem připojil Moltex a vytvořil tam klastr prodejců SMR. V únoru 2021 vláda New Brunswick oznámila financování ARC Canada ve výši 20 milionů dolarů a v dubnu 2021 byly potvrzeny plány na první jednotku v Point Lepreau. V roce 2021 ARC nabídla návrh společnosti Energoatom na Ukrajině.

CEFR

Čínský experimentální rychlý reaktor o výkonu 65 MWt je v podstatě spíše než energetický reaktor, i když mimochodem může generovat 20 MWe. Jde o důležitou součást vývoje čínského reaktoru a podrobnosti jsou uvedeny v části výzkumu a vývoje dokumentu China Fuel Cycle. Je chlazený sodíkem na 530 °C a funguje od roku 2010.

Rapid-L

Malý design vyvinutý japonským Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) ve spolupráci s Mitsubishi Research Institute a financovaný Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) je 5 MWt, 200 kWe Rapid-L, využívající lithium-6 (neutronový jed) jako kontrolní médium. Měl by mít 2700 palivových

kolíků nitridu uranu obohaceného na 40–50 % s bodem tání 2600 °C integrovaných do jednorázové kazety nebo „integrovaného palivového souboru“. Systém řízení reaktivity je pasivní a využívá lithiové expanzní moduly (LEM), které poskytují kompenzaci vyhoření, provoz při částečném zatížení a také zpětnou vazbu s negativní reaktivitou. Během normálního provozu je lithium-6 v LEM suspendováno na inertním plynu nad oblastí jádra. Jak teplota reaktoru stoupá, lithium-6 expanduje, přesunutí rozhraní plyn/kapalina dolů do jádra a tím přidání negativní reaktivity. Jiné druhy lithiových modulů, také integrované do palivové kazety, vypínají a spouštějí reaktor. Chlazení probíhá pomocí roztaveného sodíku a s řídicím systémem LEM je výkon reaktoru úměrný průtoku primárního chladiva. Tankování by bylo každých 10 let v prostředí inertního plynu. Obsluha by nevyžadovala žádné dovednosti, vzhledem k inherentním bezpečnostním konstrukčním prvkům. Celá rostlina by byla asi 6,5 metru vysoká a 2 metry v průměru. Tankování by bylo každých 10 let v prostředí inertního plynu. Obsluha by nevyžadovala žádné dovednosti, vzhledem k inherentním bezpečnostním konstrukčním prvkům. Celá rostlina by byla asi 6,5 metru vysoká a 2 metry v průměru. Tankování by bylo každých 10 let v prostředí inertního plynu. Obsluha by nevyžadovala žádné dovednosti, vzhledem k inherentním bezpečnostním konstrukčním prvkům. Celá rostlina by byla asi 6,5 metru vysoká a 2 metry v průměru.

Větší reaktor RAPID dodává 1 MWe a je poháněn U-Pu-Zr a chlazen sodíkem.

4S

Systém „jaderné baterie“ Super-Safe, Small & Simple (4S) je vyvíjen společností Toshiba a Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) v Japonsku ve spolupráci s SSTAR work a Westinghouse (vlastněný Toshiba) v USA. . Používá sodík jako chladicí kapalinu (s elektromagnetickými čerpadly) a má pasivní bezpečnostní prvky, zejména záporný teplotní koeficient reaktivity.

Celá jednotka by byla postavena v továrně, přepravena na místo, instalována pod úroveň terénu a poháněla by parní cyklus přes sekundární sodíkovou smyčku. Je schopen tři desetiletí nepřetržitého provozu bez doplňování paliva. Kovové palivo (169 kolíků o průměru 10 mm) je uran-zirkonium obohacené na méně než 20 % nebo slitina U-Pu-Zr s 24 % Pu pro verzi 30 MWt (10 MWe) nebo 11,5 % Pu pro verzi 135 MWt (50 MWe) verze. Stálého výkonu po celou dobu životnosti jádra ve verzi 30 MWt je dosaženo postupným pohybem prstencového reflektoru kolem štíhlého jádra (průměr 0,68 m, výška 2 m v malé verzi; průměr 1,2 m a výška 2,5 m ve větší verzi) směrem nahoru. jeden milimetr za týden. Po 14 letech je absorber neutronů ve středu aktivní zóny odstraněn a reflektor opakuje svůj pomalý pohyb po jádru po dobu dalších 16 let. Vyhoření bude 34 GWden/t. V případě ztráty výkonu reflektor spadne na dno nádoby reaktoru, zpomalí reakci a vnější cirkulace vzduchu zajišťuje odvod rozpadového tepla. Dalším bezpečnostním zařízením je tyč absorbující neutrony, která může spadnout do aktivní zóny. Po 30 letech by se palivo nechalo jeden rok vychladnout, pak by bylo odstraněno a odesláno ke skladování nebo likvidaci.

Obě verze 4S jsou navrženy tak, aby automaticky udržovaly výstupní teplotu chladicí kapaliny 510-550°C – vhodné pro výrobu energie s vysokoteplotní elektrolytickou výrobou vodíku. Náklady na elektrárnu jsou projektovány na 2 500 USD/kW a náklady na energii 5–7 centů/kWh pro malou jednotku – což je v mnoha lokalitách velmi konkurenceschopné s naftou. Projekt získal značnou podporu na Aljašce a koncem roku 2004 město Galena udělilo společnosti Toshiba počáteční souhlas k výstavbě 10 MWe (30 MWt) 4S reaktoru na tomto vzdáleném místě. Do roku 2008 probíhalo hodnocení před podáním žádosti Nuclear Regulatory Commission (NRC) s ohledem na žádost o certifikaci návrhu v říjnu 2010 a následnou žádost o kombinovanou stavební a provozní licenci (COL). Jeho přezkoumání je nyní NRC uvedeno jako „neaktivní“. Jeho design je dostatečně podobný PRISM – GE' PRISM) – aby měla dobré vyhlídky na licencování. Toshiba plánovala celosvětový marketingový program

prodeje jednotek pro výrobu energie ve vzdálených dolech, pro těžbu dehtových písků, odsolovací zařízení a pro výrobu vodíku. Nakonec očekávala, že tržby za výrobu vodíku převýší tržby za dodávky energie.

L-4S je verze 4S chlazená Pb-Bi.

Reaktory s postupnou a stojatou vlnou

Toto není malý reaktor a podrobnosti jsou na informační stránce o rychlých neutronových reaktorech a na TerraPower.

Rychlé reaktory chlazené olovem a olovem a bismutem

Olovo nebo olovo-bismutové eutektikum v rychlých neutronových reaktorech je schopné vysokoteplotního provozu při atmosférickém tlaku. Pb-208 – 54 % přirozeně se vyskytujícího olova – je transparentní pro neutrony. To znamená, že účinnost je lepší díky většímu rozestupu mezi palivovými kolíky, což pak umožňuje proudění chladicí kapaliny konvekcí pro odvod odpadního tepla. Také protože nereagují s vodou, je rozhraní výměníku tepla bezpečnější. Při styku se vzduchem nehoří. Jsou však korozivní pro povlaky paliva a oceli, což původně omezovalo teploty na 550 °C. S dnešními materiály lze dosáhnout 650 °C a v budoucnu se počítá s 800 °C s druhým stupněm vývoje IV. generace s použitím ocelí zpevněných oxidovou disperzí. Olovo a Pb-Bi mají mnohem vyšší tepelnou vodivost než voda, ale nižší než sodík.

Zatímco olovo má omezenou aktivaci z neutronů, problém s Pb-Bi je v tom, že poskytuje toxický aktivační produkt polonia (Po-210), alfa-zářič s poločasem rozpadu 138 dní. Pb-Bi taje při relativně nízkých 125 °C (proto eutektické) a vře při 1670 °C, Pb taje při 327 °C a vře při 1737 °C, ale jeho výroba je mnohem hojnější a levnější než vizmut, proto se předpokládá pro budoucí použití ve velkém měřítku, i když je třeba zabránit zamrznutí. V roce 1998 Rusko odtajnilo

mnoho výzkumných informací odvozených ze svých zkušeností s Pb-Bi v podmořských reaktorech a následně vzrostl zájem USA o použití Pb obecně nebo Pb-Bi pro malé reaktory.

BREST-300

Rusko experimentovalo s několika návrhy reaktorů chlazených olovem a získalo 70 reaktorových let zkušeností s chlazením olova a bismutu až do 90. let 20. století v podmořských reaktorech. Významnou novou ruskou konstrukcí od NIKIET je rychlý neutronový reaktor BREST, 700 MWt, 300 MWe, s olovem jako primárním chladičem, o teplotě 540 °C, napájející superkritické parní generátory. Jádro leží v kaluži olova při téměř atmosférickém tlaku. Je ze své podstaty bezpečný a používá nitridové palivo U+Pu. Efektivní obohacení je asi 13,5 %. Palivový cyklus je uváděn na 5-6 let s částečným dotankováním na cca 10 měsíců. Nelze vyrábět plutonium na úrovni zbraní (protože neexistuje žádná uranová pokrývka) a použité palivo lze recyklovat donekonečna, se zařízeními na místě.

Pilotní demonstrační blok se staví v Seversku s dokončením v roce 2026 a plánuje se 1200 MWe bloků. Reaktor BREST je nedílnou součástí pilotního demonstračního energetického komplexu (PDEC), který se skládá ze tří prvků: smíšeného nitridu uranu a nitridu plutonia pro výrobu/přepřacování paliva; jaderná elektrárna s reaktorem BREST-300; a modul na přepřacování použitého jaderného paliva (pro provoz v roce 2024). Tato kombinace umožňuje plně uzavřený palivový cyklus na jednom místě.

SVBR-100

Menším a novějším ruským projektem jako malý modulární reaktor měl být olověný-bismutový rychlý reaktor (SVBR) o výkonu 280 MWt, 100 MWe, vyvíjený společností AKME-engineering a zapojením společnosti Hidropress do návrhu. Jedná se o integrální konstrukci s 12 parogenerátory a dvěma hlavními cirkulačními čerpadly umístěnými ve stejném Pb-Bi bazénu při 340-490°C jako

aktivní zóna reaktoru. Je navržen tak, aby byl schopen používat širokou škálu paliv, ačkoli pilotní jednotka by zpočátku používala oxid uranu obohacený na 16,3 %. S palivem U-Pu MOX by fungoval v uzavřeném cyklu. Interval doplňování paliva by byl 7-8 let a počítalo se s životností 60 let. Teplota tání chladiva Pb-Bi je 123,5 °C, takže se během odstávky snadno udržuje v roztaveném stavu rozpadovým teplem doplněným v případě potřeby externími zdroji tepla.

Jednotka SVBR-100 o výkonu 280 MWt by byla vyrobena v továrně a přepravována (po železnici, silnici nebo po vodní cestě) jako modul o průměru 4,5 m a výšce 8,2 m. Očekávalo se, že elektrárna s takovými moduly bude dodávat elektřinu za nižší cenu než jakákoli jiná nová technologie se stejnou kapacitou a také s dosažením vlastní bezpečnosti a vysoké odolnosti proti šíření. (Rusko postavilo sedm ponorek třídy Alfa, každou poháněnou kompaktním reaktorem chlazeným Pb-Bi o výkonu 155 MWt, a získalo s nimi provozní zkušenosti za 80 reaktorových let.) V říjnu 2015 Rosatom oznámil: „Odborníci potvrdili, že neexistují žádné vědecké nebo technické problémy, které by bránily dokončení projektu a získání stavebního povolení.“ V listopadu 2016 Rosatom uvedl, že očekává, že hlavní specifikace pro stavbu SVBR-100 vypracuje do poloviny roku 2017, ale v roce 2018 byl projekt zrušen. Kapitálové náklady přes noc byly dříve odhadovány na 4000–4500 USD/kW a náklady na výrobu 4–5 c/kWh při 90% faktoru zatížení.

V prosinci 2009 byl Rosatom a En+ Group (dceřiná společnost Basic Element Group) založen AKME-engineering, společný podnik 50-50, jako otevřená akciová společnost za účelem vývoje a výstavby pilotního bloku SVBR ¹⁴. En+ je společníkem společnosti JSC EuroSibEnergo a 53,8% vlastníkem společnosti Rusal, která jednala s Rosatomem ohledně jaderné elektrárny na Dálném východě a fáze II jaderné elektrárny Balakovo. Ta měla přispět většinou kapitálu a Rosatom nyní hledá dalšího investora. V roce 2011 přešel 50% podíl EuroSibEnergo na její dceřinou společnost JSC Irkutskenergo.

Hlavními účastníky projektu jsou OKB Hidropress v Podolsku, VNIPIET OAO v Petrohradě a Státní výzkumné centrum RF Institute of Physics & Power Engineering (IPPE nebo FEI) v Obninsku.

Plánem bylo dokončit vývoj designu a zprovoznit pilotní zařízení o výkonu 100 MWe do roku 2019 s celkovou investicí 36 miliard RUR (550 milionů USD). Místem měl být Výzkumný ústav atomových reaktorů (RIAR nebo NIAR) v Dimitrovgradu – největším ruském jaderném výzkumném středisku – ačkoli dřívější plány počítaly s umístěním na IPPE/FEI v Obninsku. SVBR-100 by byl prvním reaktorem chlazeným těžkým kovem pro výrobu elektřiny. Hidropress jej popisuje jako multifunkční reaktor pro energii, teplo nebo odsolování.

Počítalo se také s SVBR-10 se stejnými konstrukčními principy, 20letým intervalem výměny paliva a výrobním výkonem 12 MWe a také se jedná o víceúčelovou jednotku.

(Odkaz na [brožuru SVBR](#))

Napájecí modul Gen4 (Hyperion).

Modul Gen4 je koncept 70 MWt/25 MWe chlazeného olovem-bismutem chlazeného reaktoru využívajícího 19,75 % obohaceného paliva z nitridu uranu od [Gen4 Energy](#). Reaktor byl původně koncipován jako draslíkem chlazená samoregulační „jaderná baterie“ poháněná hydridem uranu ^m. V roce 2009 však společnost Hyperion Power změnila konstrukci na palivo s nitridem uranu a chlazení olova a bismutu, aby urychlila certifikaci konstrukce ¹². To jej nyní klasifikuje jako rychlý neutronový reaktor, bez umírnění. Společnost tvrdí, že palivo z keramického nitridu má ve srovnání s oxidem uranu lepší tepelné a neutronové vlastnosti. Obohacení je 19,75 % a provozní teplota asi 500 °C. Eutektikum olovo-bismut je 45 % Pb, 55 % Bi. Jednotka bude instalována pod úrovní terénu.

Nádoba reaktoru, ve které je aktivní zóna a primární okruh přenosu tepla, je asi 1,5 metru široká a 2,5 metru vysoká. Je snadno přenosný, utěsněný a nemá žádné pohyblivé části. Sekundární chladicí okruh předává teplo externímu parogenerátoru. Reaktorový modul je navržen pro nepřetržitý provoz na elektřinu nebo technologické teplo (nebo kogeneraci) po dobu až 10 let bez doplňování paliva. Další reaktorový modul by pak mohl zaujmout jeho místo v celkové elektrárně. Starý modul s palivem spáleným na asi 15% obohacení by byl uložen v suchém skladu na místě, aby se ochladil po dobu až dvou let, než se vrátí do továrny.

V březnu 2010 Hyperion (jako tehdejší společnost) oznámil americké jaderné regulační komisi, že plánuje podat žádost o certifikaci designu v roce 2012. Společnost tehdy uvedla, že má mnoho projevů zájmu o objednávky jednotek. V září 2010 společnost podepsala dohodu se Savannah River Nuclear Solutions o případné výstavbě demonstrační jednotky na tamním ministerstvu energetiky. Hyperion plánoval postavit prototyp do roku 2015, možná s palivem na bázi oxidu uranu, pokud nitrid nebude k dispozici. V březnu 2012 US DOE podepsala dohodu se společností Hyperion o výstavbě demonstrační jednotky v lokalitě Savannah River v Jižní Karolíně.

V roce 2014 byly zveřejněny dva články o jaderném lodním pohonu, které vycházejí z velkého mezinárodního průmyslového projektu vedeného Lloyd's Register. Popisují předběžnou koncepční návrhovou studii pro tanker Suezmax o kapacitě 155 000 dwt, který je založen na konvenčním tvaru trupu s energetickým modulem Gen4 Energy o výkonu 70 MW pro pohon.

V březnu 2012 Hyperion Power Generation změnil svůj název na Gen4 Energy a název svého reaktoru na Gen4 Module (G4M). Svůj design navrhl pro vzdálená místa s menšími požadavky na energii.

Westinghouse LFR

Program Westinghouse Lead-Cooled Fast Reactor (LFR) vznikl na základě šetření provedeného v roce 2015, jehož cílem bylo identifikovat technologii, která by nejlépe podpořila řešení problémů jaderné energie pro globální nasazení. Je ve fázi koncepčního návrhu pro výkon až 450 MWe jako modulární bazénová jednotka, jednoduchá, škálovatelná a s pasivní bezpečností. Bude mít flexibilní výstup, který doplní přerušované obnovitelné napájení sítě. Jeho vysoká teplota – případně 650 °C – umožní průmyslové aplikace tepla. Westinghouse očekává, že bude velmi konkurenceschopný, bude mít nízké investiční a stavební náklady a zvýšenou bezpečnost.

Vzhledem k tomu, že olověné chladivo funguje při atmosférickém tlaku a nereaguje exotermicky se vzduchem nebo s kapalinami pro přeměnu energie (jako je superkritický oxid uhličitý a voda), technologie LFR také eliminuje potřebu a související náklady na dodatečné komponenty a redundantní bezpečnostní systémy vyžadované jinými konstrukcemi elektrárny. pro ochranu před únikem chladicí kapaliny. Dalšího provozního a bezpečnostního vylepšení je také dosaženo přijetím kombinace paliva a pláště s vysokou teplotou na základě těch, které vyvíjí společnost Westinghouse v rámci palivového programu odolného vůči nehodám.

V únoru 2017 společnost podepsala dohodu s Italskou národní agenturou pro nové technologie, energii a udržitelný ekonomický rozvoj (ENEA) a Ansaldo Nucleare o vývoji designu. Na vývoji se také podílí několik britských společností a předpokládá se počáteční licencování s britským Úřadem pro jadernou regulaci (ONR). V dubnu 2021 byla uzavřena smlouva s dceřinou společností Ansaldo, aby navrhla, poskytla, instalovala a otestovala klíčové komponenty reaktoru ve Versatile Lead Loop Facility a Passive Heat Removal Facility, které mají být navrženy a instalovány v závodě Ansaldo Nuclear ve Wolverhamptonu ve Spojeném království. Prototyp LFR bude mít asi 300 MWe při 500 °C.

Kromě výroby elektřiny při základním zatížení umožní vysokoteplotní provoz LFR efektivní schopnost sledování zátěže, kterou umožňuje inovativní systém skladování tepelné energie, stejně jako dodávku procesního tepla pro průmyslové aplikace a odsolování vody. Superkritický systém přeměny energie na oxid uhličitý, který využívá vzduch jako konečný chladič, výrazně snižuje spotřebu vody a eliminuje potřebu umístění závodu v blízkosti velkých vodních ploch.

Encapsulated Nuclear Heat-Source

Encapsulated Nuclear Heat-Source (ENHS) je koncept reaktoru chlazeného kapalným kovem o výkonu 50 MWe, který vyvíjí Kalifornská univerzita v Berkeley. Jádru je na dně modulu naplněného kovem, který je umístěn ve velké lázni sekundárního chladiče roztaveného kovu, která také pojme osm samostatných a nepropojených parogenerátorů. Uvnitř modulu probíhá konvekční cirkulace primárního chladiče a mimo něj sekundárního chladiče. Mimo sekundární bazén je zařízení chlazeno vzduchem. Řídicí tyče by bylo nutné seřizovat zhruba každý rok a sledování zatížení by bylo automatické. Celý reaktor je umístěn v 17 metrů hlubokém síle. Palivo je slitina uranu a zirkonia s 13% obohacením (nebo U-Pu-Zr s 11% Pu) s životností 15-20 let. Poté se modul vyjme a uloží na místě, dokud chladičí kapalina primárního olova (nebo Pb-Bi) neztuhne, a pak by bylo odesláno jako samostatná a chráněná položka. Nový palivový modul by byl dodáván kompletní s primárním chladičem. ENHS je navržen pro rozvojové země a je vysoce odolný proti šíření, ale ještě není blízko komercializace.

Heatpipe ENHS má teplo odváděné pomocí heatpipe z tekutého kovu. Stejně jako jádro vesmírného jaderného reaktoru SAFE-400 obsahuje jádro HP-ENHS palivové tyče a heatpipe zapuštěné do pevné struktury uspořádané do šestiúhelníkové mřížky v poměru 3:1. Jádru je orientováno horizontálně a má spíše čtvercový než válcový průřez pro efektivní přenos tepla. Heatpipe vycházejí ze dvou axiálních reflektorů, ve kterých je zapuštěna komora štěpného plynu,

a přenášejí teplo do mezilehlého chladiwa, které proudí přirozenou cirkulací. (Vesmírný štěpný reaktor SAFE-400 – Safe Affordable Fission Engine – byl 400 kWt heatpipe energetický systém o výkonu 100 kWe k pohonu vesmírného dopravního prostředku pomocí dvou energetických systémů Brayton (plynové turbíny poháněné přímo horkým plynem z reaktoru).

STAR-LM, STAR-H2, SSTAR

Projekt Secure Transportable Autonomous Reactor (STAR) v Argonne National Laboratory vyvíjel malé, víceúčelové systémy, které fungují téměř autonomně po velmi dlouhou dobu. STAR-LM je továrně vyrobený rychlý neutronový modulární reaktor chlazený eutektikem olova a bismutu s pasivními bezpečnostními prvky. Jeho velikost 300-400 MWt znamená, že jej lze přepravovat po železnici. Používá palivo nitrid uranu a transuranu v kazetě o průměru 2,5 m, která se vyměňuje každých 15 let. Odvod rozpadového tepla je vnější cirkulací vzduchu. STAR-LM byl koncipován pro výrobu energie s kapacitou asi 175 MWe.

STAR-H2 je adaptací stejného reaktoru pro výrobu vodíku, přičemž teplo z reaktoru o teplotě až 800 °C je přenášeno heliovým okruhem k pohonu samostatného zařízení na výrobu termochemického vodíku, zatímco teplo nižší kvality se využívá k odsolování (multi-fáze bleskového procesu). Jeho vývoj je dále.

Menší variantou STAR je Small Sealed Transportable Autonomous Reactor (SSTAR), který byl vyvinut Lawrence Livermore, Argonne a Los Alamos National Laboratories ve spolupráci s dalšími, včetně společnosti Toshiba. Má olověné nebo Pb-Bi chlazení, výstupní teplotu jádra 564°C a má integrovaný parní generátor uvnitř uzavřené jednotky, který by byl instalován pod úrovní terénu. Koncipován ve velikostech 10-100 MWe, hlavní vývoj byl zaměřen na verzi 45 MWt/20 MWe jako součást úsilí americké generace IV. Po 20 nebo 30 letech provozní životnosti bez doplňování paliva je pak celý reaktorový blok vrácen k recyklaci paliva. Nádoba reaktoru je 12

metrů vysoká a má průměr 3,2 m a aktivní zóna je metr vysoká a má průměr 1,2 m (verze 20 MWe). SSTAR by nakonec byl spojen s turbínou Braytonova cyklu využívající superkritický oxid uhličitý s přirozenou cirkulací do čtyř výměníků tepla. Prototyp byl plánován na rok 2015, ale vývoj se zřejmě zastavil.

LSPR

V Japonsku se vyvíjí rychlý reaktor chlazený olovem-bismutem-eutektickým (LBE) o výkonu 150 MWt/53 MWe, LSPR (LBE-Cooled Long-Life Safe Simple Small Portable Proliferation-Resistant Reactor). Palivové jednotky by byly dodávány z továrny a fungovaly po dobu 30 let, poté by byly vráceny. Koncept je určen pro rozvojové země.

SEALER

LeadCold Reactors (Blykalla Reaktorer) byla založena v roce 2013 jako spin-off společnost z Royal Institute of Technology (KTH) ve Stockholmu. Má dceřinou společnost v Kanadě. Jeho SEALER-3 (Swedish Advanced Lead Reactor) je olovem chlazený rychlý reaktor navržený s nejmenším možným jádrem, které může dosáhnout kritičnosti v rychlém spektru s použitím paliva obohaceného o 20 % oxidu uranu. Základní reaktor je 8 MWt se špičkovým elektrickým výkonem 3 MWe, což vede k životnosti aktivní zóny 30 let plného výkonu (při 90% dostupnosti bez doplňování paliva) s chladivem pod 450 °C, aby se minimalizovala koroze. Společnost vyvinula nové slitiny hliníku a oceli, které jsou vysoce odolné vůči korozi při kontaktu s tekutým olovem až do 450 °C. Nádoba reaktoru je navržena tak, aby byla dostatečně malá, aby umožnila přepravu letadlem.

Vzhledem k tomu, že regulační rámec pro udělování licencí pro malé reaktory je v Kanadě zaveden lépe než ve většině ostatních zemí, Nunavut a Severozápadní teritoria se pravděpodobně stanou prvními trhy pro jednotky SEALER. Kanadská komise pro jadernou bezpečnost (CNSC) zahájila fázi 1 15měsíčního předlicenčního

přezkoumání návrhu dodavatele v lednu 2017, ale kontrola je nyní na žádost dodavatele pozastavena. V roce 2016 pobočka Essel Group Middle East souhlasila s investicí do švédsko-kanadského projektu a v lednu 2017 byla podepsána investiční dohoda ve výši 200 milionů dolarů na licenci a výstavbu „první soukromě financované jaderné elektrárny chlazené olovem na světě“. Financování umožní společnosti LeadCold dokončit předlicenční přezkoumání s CNSC, dokončit podrobný technický návrh reaktoru, provést výzkum a výzkum

V únoru 2021 společnost Uniper Sweden podepsala dohodu o společném podniku a vytvořila společnost Swedish Modular Reactors AB s LeadCold a KTH zaměřenými na vybudování demonstračního SEALER-3 do roku 2030 v Oskarshamnu. V únoru 2022 udělila Švédská energetická agentura financování společného podniku ve výši 10,6 milionu USD.

SEALER-5 je reaktor o výkonu 5 MWe. Nahrazením standardního paliva s oxidem uranu nitridem uranu (UN) může stejné jádro obsahovat o 40 % více štěpného materiálu. To umožňuje jádru provozovat o 40 % vyšší tepelný výkon po stejnou dobu jako SEALER-3, *tedy* 30 let.

SEALER-10 je systém nakládání s odpady. Po 30 letech provozu budou první jednotky SEALER přepraveny zpět do centralizovaného recyklačního zařízení. Plutonium a minoritní aktinidy přítomné ve vyhořelém palivu budou poté odděleny a převedeny na nitridové palivo pro recyklaci v reaktoru SEALER o výkonu 10 MWe. Jeden takový reaktor bude stačit pro hospodaření s použitým palivem deseti menších bloků SEALER.

čínské Hedianbao

Malý výzkumný ústav v Hefei v provincii Anhui v Číně provádí určitou koncepční práci na „přenosné jaderné baterii“ navržené tak, aby se vešla do standardního přepravního kontejneru. Rychlý reaktor

chlazený olovem by byl schopen generovat tepelný výkon 10 megawattů a je založen na konstrukci ruského podmořského reaktoru.

Korejské návrhy rychlých reaktorů

V Jižní Koreji pracuje Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) na návrzích rychlých reaktorů chlazených sodíkem, ale druhý proud vývoje rychlých reaktorů probíhá prostřednictvím Centra pro výzkum jaderné transmutační energie v Koreji (NuTrECK) na univerzitě v Soulu (SNU). Pracuje na olověno-bismutově chlazené konstrukci o výkonu 35 MW, která by fungovala na pyrozpracované palivo. Je navržen tak, aby byl pronajat na 20 let a provozován bez doplňování paliva, poté vrácen dodavateli. Poté by se v pyrotechnickém závodě doplnilo palivo a mělo by projektovanou životnost 60 let. Fungoval by při atmosférickém tlaku, čímž by se odstranily velké obavy týkající se havárií se ztrátou chladicí kapaliny.

Reaktory s roztavenou solí

Ty většinou používají roztavené fluoridové soli jako primární chladivo při nízkém tlaku. Lithium-berylliumfluorid a soli fluoridu lithného zůstávají kapalné bez tlakování až do 1400 °C, na rozdíl od PWR, který pracuje při asi 315 °C pod tlakem 150 atmosfér.

Rychlospektrální MSR používají chladicí kapalinu chloridové soli. Ve většině konstrukcí je palivo rozpuštěno v primárním chladivu, ale v některých je palivo oblázkové lože.

Během 60. let vyvinuly USA koncept množivého reaktoru s roztavenou solí jako primární záložní možnost pro rychlý množivý reaktor (chlazený tekutým kovem) a malý prototyp 8 MWt Molten Salt Reactor Experiment (MSRE) provozovaný v Oak Ridge více než čtyři roky. let do roku 1969 (program MSR probíhal v letech 1957-1976). Tetrafluorid U-235 obohacený na 33 % byl v roztaveném fluoridu lithia, berylia a zirkonia při 600-650 °C, který protékal grafitovým moderátorem. Druhá kampaň používala palivo U-233, ale program nepokročil k vybudování množírny MSR využívající

thorium. Nyní je o tento koncept obnovený zájem v Japonsku, Rusku, Číně, Francii a USA a jedním ze šesti návrhů generace IV vybraných pro další vývoj je reaktor na roztavenou sůl (MSR).

V normálním MSR je palivem roztavená směs solí fluoridu lithného a berylnatého (FLiBe) s rozpuštěným obohaceným uranem – fluoridy U-235 nebo U-233 (UF_4). Jádro se skládá z neplátovaného grafitového moderátoru uspořádaného tak, aby umožňoval průtok soli při teplotě přibližně 700 °C a při nízkém tlaku. Mnohem vyšší teploty jsou možné, ale ještě nebyly testovány. Teplo se přenáší do sekundárního solného okruhu a odtud do páry. Základní konstrukce není rychlý neutronový reaktor, ale s určitým omezením pomocí grafitu může být epitermální (střední rychlost neutronů) a poměr chovu je menší než 1.

Thorium může být rozpuštěno s uranem v jediné kapalině MSR, známé jako homogenní design. Dvoukapalinové nebo heterogenní MSR by měly úrodnou sůl obsahující thorium v druhé smyčce oddělené od palivové soli obsahující štěpný uran a mohly by fungovat jako množivý reaktor (MSBR). V každém případě se používají sekundární okruhy chladicí kapaliny.

Produkty štěpení se rozpouštějí v palivové soli a mohou být kontinuálně odstraňovány v on-line přepracovací smyčce a nahrazovány štěpným uranem nebo případně Th-232 nebo U-238. Aktinidy zůstávají v reaktoru, dokud se nerozštěpí nebo nepřemění na vyšší aktinidy, které tak učiní.

Kapalné palivo má záporný teplotní koeficient reaktivity a silný záporný koeficient reaktivity, což poskytuje pasivní bezpečnost. Pokud se teplota paliva zvýší, reaktivita se sníží. MSR má tedy významnou schopnost sledovat zatížení, kde snížený odběr tepla trubkami kotle vede ke zvýšení teploty chladicí kapaliny, nebo větší odvod tepla snižuje teplotu chladicí kapaliny a zvyšuje reaktivitu. Primární řízení reaktivity využívá sekundární čerpadlo nebo cirkulaci chladicí kapaliny, které mění teplotu palivové soli v aktivní zóně a

tím mění reaktivitu díky svému silnému zápornému koeficientu reaktivity. MSR pracuje při téměř atmosférickém tlaku, což eliminuje riziko explozivního uvolnění těkavých radioaktivních látek.

Mezi další atraktivní rysy palivového cyklu MSR patří: vysoce aktivní odpad obsahující pouze štěpné produkty, tedy radioaktivitu s kratší životností (aktinidy se z U-233 tvoří méně snadno než v palivu s atomovou hmotností větší než 235); malý inventář zbraní-štěpného materiálu (Pu-242 je dominantní izotop Pu); vysokoteplotní provoz poskytující vyšší tepelnou účinnost; vysoká spotřeba paliva a tím i nízká spotřeba paliva (francouzská samochovná varianta požaduje 50 kg thoria a 50 kg U-238 na miliardu kWh); a bezpečnost díky pasivnímu chlazení do libovolné velikosti. Některé mají zmrazovací zátky, takže primární sůl může být odváděna gravitací do vysypávacích nádrží konfigurovaných tak, aby se zabránilo kritičnosti. Ovládací tyče jsou vlastně vypínací tyče.

Lithium použité v primární soli musí být docela čisté Li-7, protože Li-6 produkuje tritium, když je štěpeno neutrony. Li-7 má velmi malý průřez neutronů. To znamená, že přírodní lithium musí být obohaceno a je nákladné. Čistý Li-7 se obecně nepoužívá v sekundárních chladicích solích. Ale i s obohacným Li-7 se nějaké tritium produkuje a musí být zadrženo a regenerováno.

Koncepce MSR je v programu IV. generace uplatňována ve dvou variantách: jedna s rychlým neutronovým reaktorem se štěpným materiálem rozpuštěným v soli cirkulačního paliva a s palivem s pevnými částicemi v grafitu a soli fungující pouze jako chladivo.

MSR by normálně fungovaly při mnohem vyšších teplotách než LWR – až do minimálně 700 °C, a proto mají potenciál pro procesní teplo. Roztavené fluoridové soli (možná jednoduše kryolit – Na-Al fluorid) jsou preferovanou styčnou tekutinou v sekundárním okruhu mezi jaderným zdrojem tepla a jakýmkoli chemickým závodem. Průmysl tavení hliníku poskytuje značné zkušenosti s jejich bezpečným řízením.

Jeden z vývojářů MSR, Moltex, navrhl koncept akumulace tepla roztavené soli (GridReserve), aby reaktor mohl doplňovat přerušované obnovitelné zdroje. Když je poptávka po elektřině nízká, může být teplo z 300 MWe stabilního solného reaktoru (SSR, viz níže) převedeno do dusičnanové soli uchovávané v zásobních nádržích po dobu až osmi hodin a později využito k pohonu turbíny, když poptávka stoupne. Tato technologie akumulace tepla se již používá u koncentrované solární energie (CSP), ale není vhodná pro konvenční jaderné reaktory, které produkují teplo při teplotě kolem 300 °C; výstupní teplota SSR přibližně 600 °C je však dostatečně vysoká pro použití s tímto systémem a poskytuje špičkovou kapacitu 900 MWe.

Zatímco technologie MSR byla zkoumána v mnoha zemích po desetiletí, obecně se má za to, že licencování MSR je velkou výzvou a že obecně jsou zatím velmi omezené zkušenosti s návrhem nebo provozem MSR.

Viz také informační papír Molten Salt Reactors pro více podrobností o níže popsanych konstrukcích.

MSR s palivem v primárním solném chladivu

Reaktor s kapalným fluoridem thoria (LFTR)

Reaktor Liquid Fluoride Thorium Reactor (LFTR) je heterogenní konstrukce MSR, která vyrábí své palivo U-233 z úrodné vrstvy solí fluoridu lithného a beryllitého (FLiBe) s fluoridem thorium. Některé z neutronů uvolněných během štěpení soli U-233 v aktivní zóně reaktoru jsou absorbovány thoriem obsaženým v soli plození. Výsledný U-233 se oddělí od soli plození a ve FLiBe se stane kapalným palivem jádra. LFTR mohou rychle měnit svůj výstupní výkon, a proto mohou být použity pro sledování zátěže.

Flibe LFTR

Flibe Energy v USA studuje 40 MW dvoukapalný grafitem moderovaný tepelný reaktor založený na americkém programu reaktoru na výrobu roztavené soli v 60. až 70. letech 20. století. V

obou okruzích používá jako primární chladivo sůl fluorid lithný/fluorid berylnatý (FLiBe). Palivo je uran-233 vyšlechtěný z thoria v deka soli FLiBe. Palivová sůl cirkuluje přes grafitová polena. Sůl chladicí kapaliny sekundární smyčky je fluorid sodný-beryllium ($\text{BeF}_2 \text{ - NaF}$). Předpokládá se 2 MWt poloprovoz a případně 600 MWt/250 MWe komerční elektrárny.

Fuji MSR

Fuji MSR je grafitem moderovaný design pro provoz jako blízký množitel s palivovou solí $\text{ThF}_4 \text{ - UF}_4$ a chladicí kapalinou FLiBe při 700 °C. Může spotřebovávat plutonium a aktinidy a má výkon od 100 do 1000 MWe. Mezinárodně je vyvíjen japonským, ruským a americkým konsorciem: International Thorium Molten Salt Forum (ITMSF) se sídlem v Japonsku. Bylo navrženo několik variant, včetně 10 MWe mini Fuji. Společnost Thorium Tech Solutions (TTS) plánuje komercializovat koncept Fuji a pracuje na něm s testovacím reaktorem Halden v Norsku.

Integrální MSR

Kanadská společnost Terrestrial Energy založená v roce 2013 navrhla Integral MSR (IMSR). Tento zjednodušený MSR integruje primární komponenty reaktoru, včetně primárních výměníků tepla do sekundárního okruhu čisté soli, v utěsněné a vyměnitelné nádobě aktivní zóny, která má projektovanou životnost sedm let. IMSR bude pracovat při 600-700 °C, což může podporovat mnoho aplikací průmyslového procesního tepla. Moderátor je šestiúhelníkové uspořádání grafitových prvků. Palivová sůl je eutektikum standardního (5%) nízko obohaceného uranového paliva (UF_4) a fluoridové nosné soli při atmosférickém tlaku. Sůl chladicí kapaliny sekundární smyčky je $\text{ZrF}_4 \text{ - KF}$ při atmosférickém tlaku. Terciární pára má teplotu 600 °C pro výrobu energie, procesní teplo nebo pro zálohování větru a slunce. Nouzové chlazení a odvod zbytkového tepla jsou pasivní. Každá elektrárna by měla prostor pro dva reaktory, což by umožnilo sedmiletou výměnu, přičemž použitá

jednotka by se po ochlazení a rozkladu štěpných produktů odstranila pro přepracování mimo lokalitu. Terrestrial Energy doufá, že svůj první komerční reaktor zprovozní v roce 2020.

IMSR je škálovatelný, ale od roku 2016 se společnost zaměřuje na blok 440 MWt/195 MWe. Předpokládá se, že celkové vyrovnané náklady na elektřinu z největších budou konkurenceschopné se zemním plynem. Nejmenší je navržen pro off-grid, vzdálené napájecí aplikace a jako prototyp. V plánech na rok 2016 se také počítá s průmyslovým teplem na 600 °C. V září 2021 společnost oznámila svou modernizovanou elektrárnu IMSR400 o výkonu 390 MWe se dvěma reaktory a generátory.

Ve srovnání s jinými návrhy MSR se společnost záměrně vyhýbá používání paliv na bázi thoria nebo jakékoli formy šlechtění kvůli „jejich dodatečné technické a regulační složitosti“. V září 2021 společnost uzavřela smlouvu s Orano na kompletní palivové služby po celém světě pro IMSR a v říjnu udělila smlouvy společnosti BWXT Canada na systémy zásobování párou.

V listopadu 2017 společnost Terrestrial Energy dokončila fázi 1 předlicenčního přezkoumání návrhu IMSR-400 ze strany Kanadské komise pro jadernou bezpečnost (CNSC) a v říjnu 2018 vstoupila do fáze 2 přezkoumání. V lednu 2019 společnost oznámila americké jaderné regulační komisi (NRC) svůj záměr požádat o schválení návrhu pro IMSR-400. V prosinci 2019 CNSC a US NRC vybraly IMSR společnosti Terrestrial Energy pro první společný technický přezkum pokročilého jaderného reaktoru s nelehkou vodou. Terrestrial Energy doufá, že svůj první komerční reaktor zprovozní v roce 2020. IMSR je kandidátem na americký program Advanced Reactor Demonstration Program, ale nezískal grant na časný (sedmiletý) vývoj.

V únoru 2019 projekt postoupil do fáze 2 hodnocení lokality ze strany Canadian Nuclear Laboratories – což je samostatný proces pro udělování licencí – ve vztahu k případnému umístění komerčního

závodu v Chalk River do roku 2026. Od listopadu 2019 vývoj IMSR podporuje Canadian Nuclear Laboratories' Kanadská iniciativa pro jaderný výzkum (CNRI). V říjnu 2020 byl oznámen grant 20 milionů C\$ od kanadského strategického inovačního fondu, aby se urychlil vývoj IMSR.

V lednu 2015 společnost oznámila dohodu o spolupráci s americkou národní laboratoří Oak Ridge (ORNL) o pokroku v návrhu po dobu asi dvou let a v květnu podobnou dohodu s Dalton Nuclear Institute ve Spojeném království. V březnu 2017 společnost uzavřela smlouvu s University of New Brunswick na validační a ověřovací práce pro IMSR. V srpnu 2021 společnost podepsala dohodu s Westinghouse ve Velké Británii o vývoji a dodávkách paliva. Společnost požádala o americkou úvěrovou záruku ve výši až 1,2 miliardy USD na podporu financování projektu licence, výstavby a uvedení do provozu prvního amerického IMSR, komerčního zařízení o výkonu 190 MWe. V listopadu 2021 poskytla DOE grant ve výši 3 milionů \$ na podporu licencování a komercializace IMSR.

Společnost Terrestrial Energy přezkoumala čtyři potenciální místa pro reaktor v USA, včetně jednoho v Idaho National Laboratory (INL), a v březnu 2018 byla podepsána dohoda s Energy Northwest o prvním IMSR, který zde bude postaven. Další tři místa se nacházejí východně od Mississippi.

Baterie z roztavené soli MicroNuclear

MicroNuclear LLC vyvíjí to, co nazývá jadernou baterií roztavené soli (MsNB). Jedná se o koncept malého jaderného štěpného zdroje poskytujícího teplo roztavenou solí bez čerpadel nebo ventilů pro pohon komerční plynové turbíny o výkonu 5-10 MWe. Žádné doplňování paliva by nebylo potřeba asi deset let. Celá MsNB by měla průměr 3m a výšku 3m. Žádné další podrobnosti. Idaho National Laboratory a Idaho University jsou zapojeny.

Transatomová síla

Transatomic Power (TAP) je americká společnost částečně financovaná fondem Founders Fund, která původně usilovala o vývoj jednokapalinové MSR využívající velmi nízko obohacené uranové palivo (1,8 %) nebo celou aktinidovou složku použitého paliva LWR. Společnost však musela stáhnout některá přehnaná tvrzení týkající se spalování aktinidů uvedená v *MIT Technology Review* v roce 2016 a revidovala návrh na použití 5% obohaceného uranu. Revidovaný design reaktoru TAP má velmi kompaktní jádro sestávající z účinného moderátoru hydridu zirkonia a soli na bázi fluoridu lithného (LiF) obsahujícího tetrafluorid uranu (UF_4) palivo a také aktinidy, které vznikají během provozu. Sekundárním chladivem je sůl FLiNaK (LiF-KF-NaF) do parního generátoru. Tok neutronů je větší než u grafitového moderátoru, a proto silně přispívá ke spalování generovaných aktinidů. Produkty štěpení by byly nepřetržitě odstraňovány, zatímco by se přidávalo malé množství čerstvého paliva, což by umožnilo reaktoru zůstat kritický po celá desetiletí. Odvod odpadního tepla je přirozenou konvekcí přes chladicí komín.

Komerční reaktor by měl výkon 1250 MWt/550 MWe běžící při 44% tepelné účinnosti s 650 °C v primární smyčce, využívající parní cyklus.

V září 2018 společnost oznámila, že ukončí činnost a zpřístupní své duševní vlastnictví volně online.

ThorCon

Martingale v USA navrhuje ThorCon MSR (TMSR), což je 250 MWe zvětšený Oak Ridge MSRE. Jedná se o jednofluidní thoriový konvertorový reaktor v tepelném spektru, moderovaný grafitem. Využívá kombinaci U-233 z thoria a nízko obohaceného U-235 (obohaceného na 19,7 %) z těžného uranu. Palivová sůl je fluorid sodný-beryllium ($BeF_2 \cdot NaF$) s rozpuštěným tetrafluoridem uranu a thoria (fluoridu Li-7 se z cenových důvodů vyhýbáme). Sůl chladicí kapaliny sekundární smyčky je také fluorid sodný-beryllium. Pracuje

při 700°C. Neexistuje žádné online zpracování – to probíhá v centralizovaném závodě na konci životnosti jádra – s mezitím odplyňováním některých štěpných produktů.

Několik 550 MWt, 250 MWe modulů TMSR by zahrnovalo elektrárnu. Každý modul obsahuje dva vyměnitelné reaktory v utěsněných „plechovkách“. Každá plechovka obsahuje reaktorovou „nádobu“, primární výměník tepla a čerpadlo primární smyčky. Každá plechovka je 11,6 m vysoká, 7,3 m průměr a váží 360 tun. Plechovky jsou umístěny v silech pod úrovní terénu (30 m dolů). Pod každým je pod mrazicím ventilem 32válcová nádrž na vypouštění soli na palivo.

V každém okamžiku vyrábí energii pouze jedna z plechovek každého modulu. Druhá plechovka je v režimu chlazení. Každé čtyři roky je plechovka, která byla ochlazená, odstraněna a nahrazena novou plechovkou. Palivová sůl se přenesla do nové plechovky a plechovka, která byla v provozu, přejde do režimu chlazení. V říjnu 2015 Martingale podepsal dohodu se třemi indonéskými společnostmi o uvedení elektrárny ThorCon o výkonu 500 MW (TMSR-500). V roce 2020 Thorcon International spolupracoval s jihokorejským Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering na vybudování TMSR500 jako první jaderné elektrárny (PLTN) v Indonésii.

V červenci 2020 Thorcon International podepsal dohodu o spolupráci s indonéským ministerstvem obrany s cílem vyhodnotit vývoj malého TMSR (do 50 MW) buď pro výrobu energie, nebo pro lodní pohon. Thorcon bude poskytovat technickou podporu pro výzkum a vývoj ministerstva.

Moltex SSR

Moltex Energy 's Stable Salt Reactor (SSR) je koncepční návrh britského reaktoru MSR, který spoléhá na konvekci ze statických vertikálních palivových trubek v aktivní zóně pro přenos tepla do chladiwa reaktoru. Protože jaderný materiál je obsažen v palivových souborech, lze pro chladicí sůl s nízkou radioaktivitou použít

standardní průmyslová čerpadla. Teplota jádra je 500-600°C při atmosférickém tlaku. Rozpadové teplo je odváděno přirozenou konvekcí vzduchu.

Palivové trubky ze tří čtvrtin naplněné roztavenou palivovou solí jsou seskupeny do palivových souborů, které jsou podobné těm, které se používají ve standardních reaktorech, a používají podobné konstrukční materiály. Palivová sůl je asi 60 % NaCl, 20 % PuCl₂, 20 % UCl₃, s téměř jakýmkoliv množstvím aktinidů a trichloridů lanthanoidů přimíchaných v závislosti na použitém oxidovém palivu použitém při přepracování – celkově asi 16 % štěpných. Jednotlivé palivové trubky jsou odvětrávány, takže ušlechtilé plyny štěpných produktů unikají do chladicí soli, kterou je ZrF₄-KF-NaF směs, jejíž akumulace radionuklidů je řízena. Jód a cesium zůstávají rozpuštěné v palivové soli. Ostatní plyny štěpných produktů kondenzují na horních stěnách palivové trubky a padají zpět do palivové směsi dříve, než mohou uniknout do chladicí kapaliny. Palivové soubory lze posouvat do stran bez jejich demontáže. Tankování je tak kontinuální online a po dostatečném spálení paliva se vyčerpané agregáty skladují na jeden měsíc k ochlazení na jedné straně bazénu a poté se vytahují, aby sůl zmrzla. Přepracování je přímočaré a lze zpracovat jakoukoli hladinu lanthanoidů.

Továrně vyráběné moduly SSR o výkonu 150 MWe obsahují palivo, čerpadla, primární výměník tepla, regulační lopatky a přístrojové vybavení. Několik, až do velikosti gigawattů, může sdílet reaktorovou nádrž, zpola naplněnou chladicí solí, která přenáší teplo pryč z palivových souborů do periferních parogenerátorů, v podstatě konvekcí, při atmosférickém tlaku. Existují tři varianty SSR: Stable Salt Reactor – Wasteburner (SSR-W) rychlý reaktor; asi dva roky za vývojem tepelného spektrálního reaktoru SSR-U pro různé aplikace; a SSR-Th s thoriovým palivem. Verze GridReserve má akumulaci tepla.

SSR-W je nejjednodušší a nejlevnější díky kompaktnímu jádru a žádnému moderátoru. Primárním štěpným palivem v této původní verzi rychlého reaktoru měl být chlorid plutonium-239 s minoritními aktinidy a lanthanoidy, získaný z paliva LWR nebo z reaktoru SSR-U. V roce 2020 bylo palivo SSR-W 25 % reaktorového PuCl_3 s 30 % UCl_3 a 45 % KCl . Primární chladicí sůl je $\text{ZrF}_4\text{-KF}$ při maximální teplotě 590°C . Sekundárním chladivem je dusičnanový solný pufr. Vyhoření je 120-200 GWd/t. Předpokládá se demonstrační zařízení SSR-W300 o výkonu 750 MWt/300 MWe. S New Brunswick Power byla podepsána dohoda o počátečním nasazení v Point Lepreau v Kanadě a v březnu 2021 kanadská vláda oznámila investici ve výši 50,5 milionu kanadských dolarů. V dubnu 2021 byly potvrzeny plány na toto plus závod na recyklaci použitého kanadského jaderného paliva pro něj. V listopadu 2020 se k těmto dvěma společnostem připojila společnost ARC Canada a vytvořila tam cluster dodavatelů SMR. Kanadská komise pro jadernou bezpečnost, která provedla předlicenční přezkoumání návrhu dodavatele SSR-W, dokončila první fázi. První funkční reaktor se předpokládá po roce 2030.

Společnost oznámila fyzicky větší a dražší SSR-U „globální pracantovou verzi“ své konstrukce se spektrem tepelných neutronů běžícím na fluoridech LEU (obohacených až o 7 %) s grafitem zabudovaným do palivových souborů, což zvyšuje velikost jádra. Běží při vyšší teplotě než rychlá verze – minimálně 600°C – s chladicí solí $\text{ZrF}_4\text{-NaF}$ stabilizovanou pomocí ZrF_2 . Kromě elektřiny je jejím účelem i výroba vodíku. Je navržen tak, aby byl kompatibilní s chovem thoria na U-233. Má se za to, že má mnohem větší potenciální trh, a očekává se první nasazení ve Spojeném království ve 30. letech 20. století s potenciálem nahradit CCGT a uhelné elektrárny.

SSR-Th je thorium šlechtitelská verze SSR-U, s thoriem v chladicí soli a vyrobený U-233 se postupně rozpouští ve vizmutu na dně solné nádrže. Obsahuje U-238, který ji denaturuje a zajišťuje, že nikdy nehrozí riziko šíření. Jakmile je dosaženo požadované úrovně U-233

(pod 20 %), vizmut s uranem se odebere po dávkách a směsný izotopový uran se chloruje, aby se stal palivem. Pokud se palivo používá v rychlém reaktoru, lze přidat plutonium a aktinidy.

Moltex také představil svůj koncept akumulace tepla roztavené dusičnanové soli GridReserve , který umožňuje reaktoru doplňovat přerušované obnovitelné zdroje.

Rychlý reaktor na roztavený chlorid

Southern Company Services v USA vyvíjí rychlý reaktor s roztaveným chloridem (MCFR) s TerraPower, Oak Ridge National Laboratory (ORNL) – která je hostitelem práce – Electric Power Research Institute (EPRI) a Vanderbilt University. Nejsou k dispozici žádné podrobnosti kromě toho, že palivo je v soli a v jádře není nic kromě palivové soli. Jako rychlý reaktor může spalovat U-238, aktinidy a thorium, stejně jako použité palivo z lehkovodního reaktoru, nevyžaduje žádné obohacování kromě počátečního zatížení palivem (tyto detaily od TerraPower, ne Southern). Uvádí se, že je velká. Jedinými dalšími reaktory využívajícími chloridové palivové soli jsou Elysium MCSFR a Moltex SSR.

V lednu 2016 udělila US DOE projektu grant Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear (GAIN) v hodnotě až 40 milionů \$. V srpnu 2016 Southern Nuclear Operating Company podepsala dohodu o spolupráci s X-energy na spolupráci na vývoji a komercializaci jejich příslušných návrhů malých reaktorů. S TerraPower a ORNL, X-energy navrhuje Xe-100 HTR s oblázkovým ložem o výkonu 48 MWe a malý mikroreaktor Xe-Mobile.

V prosinci 2020 vybrala DOE společnost Southern Company pro projekt sdílení nákladů ve výši 113 milionů \$ na sedm let (podíl DOE 90 milionů \$) na vývoj Molten Chloride Reactor Experiment (MCRE). Jedná se o projekt výstavby reaktoru bazénového typu o výkonu 300 kWt, který poskytne data a provozní zkušenosti pro návrh, licencování a provoz demonstračního MCFR založeného na technologii TerraPower. V listopadu 2021 Southern a DOE podepsaly

dohodu o výstavbě MCRE v Idaho National Laboratory (INL). Spolupracovníci na projektu MCRE jsou TerraPower, INL, Core Power, Orano Federal Services, EPRI a 3M Company. Očekává se, že MCRE bude v provozu v roce 2026.

MCFR propaguje Core Power ve Spojeném království pro námořní použití. Během své provozní životnosti nebude vyžadovat doplňování paliva. Core Power si klade za cíl spolupracovat s vývojáři technologií s cílem umožnit nasazení námořních MSR, včetně změn námořních předpisů pro široké přijetí lodí s pohonem m-MSR po celém světě.

V listopadu 2020 oznámila dohodu o spolupráci s TerraPower, Southern Company a Orano USA na vývoji technologie MSR v USA v rámci programu Advanced Reactor Demonstration Program.

Elysium MCSFR

Společnost Elysium Industries v USA a Kanadě má konstrukci rychlého reaktoru s roztaveným chloridem (MCSFR) s palivem v chloridové soli. Pracuje pod úrovní při téměř atmosférickém tlaku. Primární palivová sůl a sekundární sůl přenášejí teplo do parogenerátorů o teplotě 650 °C. Je navržen tak, aby sledoval zatížení. Zvažuje se řada velikostí od 125 do 3000 MWt (50 MWe až 1200 MWe). Palivem může být použité palivo z lehkovodních reaktorů nebo ochuzený uran s trochou plutonia, ačkoli v roce 2020 bylo palivo uváděno jako PuCl_3 se štěpnými produkty, neboli 15 % HALEU. Vybrané štěpné produkty jsou odstraněny online. Součástí pasivní bezpečnosti je mrazicí zátka. Má záporné teplotní a pórovitostní koeficienty.

MOSART

Ruský reaktor pro recyklaci a transmutaci aktinidů roztavené soli (MOSART) je větší rychlý reaktor poháněný pouze transuranovými (TRU) fluoridy z uranu a použitého paliva MOX LWR. Konstrukce 2400 MWt má homogenní jádro z Li-Na-Be nebo Li-Be fluoridů bez grafitového moderátoru.

Viz také informační stránka o reaktorech na roztavenou sůl .

Kompaktní reaktor na roztavenou sůl Seaborg

Seaborg Technologies v Dánsku (založeno v roce 2015) má design termoepitermního jednofluidního reaktoru pro 50 MWt pilotní blok Compact Molten Salt Reactor (CMSR) s výhledem na 250 MWt komerční modulární jednotky poháněné vyhořelým palivem LWR a thoriem. Palivová sůl je Li-7 fluorid, zpočátku s uranem jako fluoridem. Později se jako palivo předpokládá thorium, plutonium a minoritní aktinidy jako fluoridy, proto se reaktor nazývá odpadní hořák. Ten je čerpán přes jádro grafitové kolony a výměník tepla. Produkty štěpení se získávají online. Sekundární chladicí sůl je FLiNaK při 700 °C. Vyhořelé palivo LWR by mělo uran extrahovat pro recyklaci, takže plutonium a minoritní aktinidy se stanou součástí paliva MSR s thoriem. Společnost prohlašuje velmi rychlou dobu náběhu výkonu. Vysokoteplotní výstup umožní použití při výrobě vodíku, syntetických paliv, *atd* .

V březnu 2017 poskytla agentura pro veřejné financování Innovation Fund Denmark grant společnosti Seaborg na „vybudování ústředních prvků v její dlouhodobé strategii a postavení se pro dodatečné investice potřebné k pokroku směrem ke komerční vyspělosti“. Jedná se o první dánskou investici do výzkumu jaderného štěpení od doby, kdy země zavedla zákaz jaderné energie v roce 1985. V prosinci 2020 vydal American Bureau of Shipping (ABS) prohlášení o proveditelnosti použití reaktoru na člunech s výkonem 200–800 MWe na bárka. Toto je první fáze pětifázového procesu kvalifikace nové technologie ABS. Seaborg si klade za cíl nasadit první plnohodnotný prototyp energetického člunu do roku 2025.

MSR s pevným palivem (fluoridové vysokoteplotní reaktory)

Mark 1 Pebble Bed FHR

Jednalo se o předkoncepční návrh v USA dokončený v roce 2014 za účelem vyhodnocení potenciálních přínosů technologie fluoridového vysokoteplotního reaktoru (FHR). Konsorcium zahrnující University of California Berkeley, Oak Ridge National Laboratory a Westinghouse jej navrhlo jako FHR s oblázkovým ložem o výkonu 236 MWt/100 MWe s prstencovým jádrem, pracujícím při 700 °C. Je určen pro modulární výstavbu a od 100 MWe základního zatížení je schopen dodat 240 MWe se spoluspalováním plynu pro špičkové zatížení. Palivové oblásky mají průměr 30 mm, mnohem méně než plynem chlazené HTR. Projekt se zabýval tím, jak by mohly být FHR spojeny s Braytonovou turbínou s kombinovaným cyklem pro výrobu energie, návrhem pasivního systému odvodu rozpadového tepla a prstencovým jádrem oblázkového lože. PB-FHR má negativní dutinovou reaktivitu a pasivní odvod rozpadového tepla.

AHTR/FHR

Výzkum chladicí kapaliny roztavené soli byl obnoven v Oak Ridge National Laboratory (ORNL) v USA pomocí pokročilého vysokoteplotního reaktoru (AHTR).¹⁶ Jedná se o větší reaktor využívající palivo TRISO s grafitovou maticí s povlakem částic, jako je tomu v GT-MHR (viz výše uvedená část o GT- MHR) a s roztaveným fluoridem (FLiBe) jako primárním chladičem. I když je podobný plynem chlazeným HTR, pracuje při nízkém tlaku (méně než 1 atmosféra) a vyšší teplotě a poskytuje lepší přenos tepla než helium. Sůl FLiBe se používá výhradně jako primární chladič a při nízkém tlaku dosahuje teplot 750-1000 °C nebo více. Toho by bylo možné využít při termochemické výrobě vodíku.

Malá verze AHTR/FHR je SmaHTR, s tepelnou velikostí 125 MWt odpovídající trhům s prvním procesním teplem nebo produkující 50+ MWe. Provozní teplota je 700 °C s primárním chladičem FLiBe a třemi integrovanými výměníky tepla. Je přenosný kamionem, má délku 9m a průměr 3,5m. Palivo je z 19,75 % obohacený uran v částicích TRISO v grafitových blocích nebo palivových deskách. Interval doplňování paliva je 2,5 až 4 roky v závislosti na konfiguraci

paliva. Sekundárním chladičem je FLiNaK až Braytonův cyklus a pro pasivní odvod rozpadového tepla jdou samostatné pomocné smyčky do vzduchem chlazených radiátorů. Pozdější verze mají dosáhnout 850-1000 °C s použitím materiálů, které budou teprve vyvinuty.

Předpokládá se velikost reaktorů 1500 MWe/3600 MWt, s investičními náklady odhadovanými na méně než 1000 USD/kW.

Kairos Power FHR a Hermes

Kairos Power USA navrhl 320 MWt/140 MWe fluoridový (FLiBe) solný chlazený vysokoteplotní reaktor (KP-FHR), který plánuje postavit v technologickém parku East Tennessee v Oak Ridge, Tennessee, ve spolupráci s Oak Ridge National Laboratory . Reaktor využívá na 19,75 % obohacené palivo TRISO ve formě obléžků s online doplňováním paliva a pracuje při teplotě až 650 °C. Sůl sekundárního okruhu je „solární“ dusičnan, který napájí generátor páry. Má pasivní vypínání a odvod rozpadového tepla. Prototypem je zkušební reaktor Hermes o výkonu 35 MWt, který si DOE vybrala v prosinci 2020 pro program v hodnotě 629 milionů USD na sedm let (podíl DOE 303 milionů USD). V květnu 2021 úřad Tennessee Valley Authority (TVA) souhlasil s poskytováním technické, provozní a licenční podpory pro projekt Hermes. TVA je držitelem předběžného povolení pro lokalitu Clinch River.

Thoriový solný reaktor

Čína plánuje 10 MWe reaktor s roztavenou solí na chov thoria (Th-MSR nebo TMSR), v podstatě LFTR, s cílem provozu v roce 2025 v Šanghajském institutu jaderné aplikované fyziky (SINAP, v rámci Čínské akademie věd). Toto je také známé jako vysokoteplotní reaktor chlazený fluoridovou solí (FHR). Má nízko obohacené palivo TRISO jako obléžkové lože, primární chladič FLiBe při 650 °C a sekundární chladič FLiNaK. Zhruba do roku 2025 je plánována demonstrační elektrárna s obléžkovým ložem o výkonu 100 MWt s otevřeným palivovým cyklem. SINAP vidí tento návrh jako potenciál pro vyšší teploty než MSR s palivovou solí.

Čína prohlašuje, že má v této oblasti největší národní úsilí na světě a doufá, že na tuto technologii získá plná práva duševního vlastnictví. Americké ministerstvo energetiky na programu spolupracuje s Čínskou akademií věd, která měla počáteční rozpočet 350 milionů dolarů. Cílovým datem pro nasazení TMSR je rok 2032. Viz také část US AHTR [výše](#) a informační stránku o [čínském cyklu jaderného paliva](#) .

Vodné homogenní reaktory

Vodné homogenní reaktory (AHR) mají palivo smíchané s moderátorem jako kapalinu. Obvykle je nízko obohacený dusičnan uranu ve vodném roztoku. Asi 30 AHR bylo postaveno jako výzkumné reaktory a mají výhodu v tom, že jsou samoregulační a štěpné produkty jsou průběžně odstraňovány z cirkulujícího paliva. AHR o výkonu 1 MWt fungovala v Nizozemsku v letech 1974-77 s palivem Th-HEU MOX. Další podrobnosti jsou v dokumentu [Research Reactors](#) .

Teoretické cvičení publikované v roce 2006 ukázalo, že nejmenší možný reaktor pro tepelné štěpení by byl sférický vodní homogenní reaktor poháněný roztokem $\text{Am-242m}(\text{NO}_3)_3$ ve vodě . Jeho hmotnost by byla 4,95 kg, s 0,7 kg jaderného paliva Am-242m a průměrem 19 cm. Výkon by byl několik kilowattů. Možné aplikace jsou vesmírný program a přenosný zdroj neutronů vysoké intenzity. Díky malým rozměrům by byl snadno stínitelný.

Heatpipe mikroreaktory

Na rozdíl od jiných konstrukcí malých reaktorů, heatpipe reaktory používají tekutinu v mnoha utěsněných horizontálních ocelových heatpipe k pasivnímu vedení tepla z horkého palivového jádra (kde se tekutina odpařuje) do vnějšího kondenzátoru (kde tekutina uvolňuje latentní teplo vypařování) pomocí tepla. výměník. K zajištění kontinuálního izotermického vnitřního proudění páry/kapaliny při nižším než atmosférickém tlaku nejsou potřeba

žádná čerpadla. Princip je dobře zaveden v malém měřítku, ale zde se jako tekutina používá tekutý kov a předpokládá se velikost reaktoru až několik megawattů. Je zde velký záporný teplotní koeficient reaktivity. Po vypnutí je velmi málo rozpadového tepla.

Experimentální práce na reaktorech s heatpipe pro vesmír probíhaly s velmi malými jednotkami (asi 100 kWe), s použitím sodíku jako tekutiny. Byly vyvíjeny od roku 1994 v Los Alamos National Laboratory (LANL) jako robustní a technicky málo rizikový systém pro průzkum vesmíru s důrazem na vysokou spolehlivost a bezpečnost, přičemž nejznámější konstrukcí je rychlý reaktor Kilopower.

Heatpipe mikroreaktory mohou mít tepelné, epitermální nebo rychlé neutronové spektrum, ale nad 100 kWe jsou obecně rychlými reaktory.

Obecně se má za to, že licencování reaktorů s heatpipe je velkou výzvou a že s jejich návrhem nebo provozem jsou velmi omezené nebo žádné zkušenosti.

Westinghouse eVinci

Mikroreaktor eVinci 1 MWe až 5 MWe, ale v současných plánech typicky 1,6 MWe, by bylo plně továrně postaveno a poháněno palivem. Kromě výroby energie by bylo k dispozici i procesní teplo do 600 °C. Jednotky by měly životnost 40 let s tříletým intervalem doplňování paliva. Byly by přenosné, s nastavením do 30 dnů. Jednotky by měly bezpečnost „odchodu“ díky vlastní zpětné vazbě, která snižuje jadernou reakci s přebytečným teplem, což také ovlivňuje sledování zatížení. Pro eVinci existuje několik možností paliva, včetně uranu v oxidové, kovové a silicidní formě. LANL a INL zkoumají palivo. Westinghouse si klade za cíl dokončit návrh, testování, analýzu a licencování pro vybudování demonstrační jednotky do roku 2022, testování do roku 2023 a připravenost eVinci ke komerčnímu nasazení do roku 2025. Část vojenského vývoje výše), možná s použitím paliva TRISO, jako defence-eVinci (DeVinci), ale

financování DOD ve výši 11,9 milionu USD šlo pouze do března 2021. V prosinci 2020 vybrala DOE společnost Westinghouse pro projekt sdílení nákladů ve výši 9,3 milionu USD na sedm let (společnost DOE 7,4 milionu USD) na vývoj mikroreaktoru eVinci s cílem mít do roku 2024 demonstrační jednotku.

Od října 2020 dohoda s Bruce Power v Ontariu posoudí potenciál pro nasazení mimo síť v Kanadě, kde byla předložena k posouzení návrhu dodavatele CNSC před udělením licence.

V březnu 2022 oznámila kanadská vláda prostřednictvím kanadského strategického inovačního fondu pro inovace, vědu a hospodářský rozvoj (ISED) investici do reaktoru eVinci ve výši 21,6 milionu USD.

Oklo Aurora

Oklo Inc (dříve UPower) je kalifornská společnost založená v roce 2013. Vyvíjí rychlý reaktor o výkonu 1,5 MWes použitím kovového paliva HALEU U-Zr na bázi paliva EBR-II, ale s nižším spalováním. Jedná se o heatpipe reaktor s utěsněnými heatpipe pro přenos tepla z aktivní zóny reaktoru do superkritického systému přeměny energie na oxid uhličitý pro výrobu elektřiny. Je navrženo tak, aby fungovalo až 20 let před natankováním paliva. Je ze své podstaty bezpečný, s velkým teplotním záporným koeficientem reaktivity a nevyžaduje chlazení vodou. Bude instalován pod úrovní terénu. Národní laboratoř Idaho spolupracuje se společností na palivu a souhlasila s umístěním prototypové jednotky, pro kterou DOE vydalo povolení k použití na místě. V červnu 2020 přijala americká jaderná regulační komise žádost společnosti Oklo o kombinovanou stavební a provozní licenci.

Mikroreaktor NuScale

V dubnu 2019 společnost NuScale oznámila, že vyvíjí „jednoduchý a inherentně bezpečný kompaktní reaktor chlazený tepelnými trubicemi“ o výkonu 1–10 MWe, který „vyžaduje malou infrastrukturu místa, lze jej rychle rozmístit a je plně automatizovaný

během energetického provozu“. Mezi partnery patří Additech, INL a Oregon State University. Projekt navazuje na žádosti o nápady a návrhy od Ministerstva obrany USA a Ministerstva energetiky.

Ostatní

LEADIR-PS100

Toto je nový design od Northern Nuclear Industries v Kanadě, který kombinuje řadu funkcí v jedinečné kombinaci. Reaktor o výkonu 100 MWt, 36 MWe má grafitový moderátor, palivo TRISO v oblázcích, olovo (Pb-208) jako primární chladivo, vše jako integrální uspořádání bazénového typu při téměř atmosférickém tlaku. Dodává páru o teplotě 370 °C a je také uvažován jako průmyslová teplárna. Chladivo cirkuluje přirozenou konvekcí. Palivové oblásky jsou ve čtyřech člancích, každý s grafitovými reflektory, a kapacitu lze zvýšit přidáním článků. Vypínací tyče jsou podobné těm v reaktorech CANDU. Pasivní odvod rozpadového tepla je konvekcí vzduchu. Společnost jej prezentuje jako design Gen IV

Modulární konstrukce s využitím malých reaktorových bloků

Westinghouse a partneři společnosti IRIS nastínili ekonomický důvod pro modulární výstavbu svého návrhu IRIS (asi 330 MWe) a argument platí obdobně pro další podobné nebo menší jednotky. Zdůraznili, že IRIS se svou velikostí a jednoduchým designem ideálně hodí pro modulární výstavbu ve smyslu postupné výstavby velké elektrárny s více malými provozními bloky. Ekonomika rozsahu je zde nahrazena ekonomikou sériové výroby mnoha malých a jednoduchých komponentů a prefabrikátů. Očekávali, že výstavba prvního bloku IRIS bude dokončena do tří let s následným zkrácením na pouhé dva roky.

Uspořádání lokality bylo vyvinuto s více samostatnými jednotkami nebo více dvojčaty. V každém případě budou jednotky konstruovány tak, aby existovalo dostatečné fyzické oddělení, aby bylo možné postavit další jednotku, zatímco předchozí je v provozu a generuje

výnosy. Navzdory tomuto oddělení může být půdorys elektrárny velmi kompaktní, takže například lokalita se třemi samostatnými moduly IRIS poskytujícími kapacitu 1000 MWe by měla podobnou nebo menší velikost než lokalita se srovnatelným celkovým výkonem jedné jednotky.

Mnoho malých reaktorů je navrženo s ohledem na sériovou výstavbu a společný provoz jako moduly velké elektrárny. V tomto smyslu jsou to „malé modulární reaktory“ – SMR – ale ne všechny malé reaktory jsou tohoto druhu (např. Toshiba 4S), ačkoli termín SMR se používá volně pro všechny malé konstrukce.

Očekává se, že závody obsahující několik SMR budou mít kapitálové a výrobní náklady srovnatelné s většími závody. Ale každá malá jednotka, jako je tato, bude mít potenciálně profil financování a flexibilitu, která by jinak u větších závodů nebyla možná. Jakmile je jeden modul dokončen a začne vyrábět elektřinu, bude generovat kladný peněžní tok pro další modul, který má být postaven.

Westinghouse odhaduje, že 1 000 MWe dodávané třemi bloky IRIS postavenými v tříletých intervalech financovaných z 10 % po dobu deseti let vyžaduje maximální záporný peněžní tok nižší než 700 milionů USD (ve srovnání s asi trojnásobkem toho, co je u jednoho bloku 1 000 MWe). Pro rozvinuté země nabízejí malé modulární jednotky možnost výstavby podle potřeby; pro rozvojové země to může být jediná možnost, protože jejich elektrické sítě nemohou pojmout 1000+ MWe jednotlivých bloků.

Poznámky a reference

Poznámky

A. V USA, Velké Británii, Francii, Rusku, Číně a Indii většinou s použitím vysoce obohaceného paliva. Reaktory postavené jako neutronové zdroje nejsou určeny k výrobě tepla nebo páry a jsou zde méně relevantní. [[zpět](#)]

b. Velmi obecným pravidlem je, že žádná jednotlivá jednotka by neměla být větší než 15 % kapacity sítě [[Zpět](#)]

C. Tradiční bezpečnostní systémy reaktoru jsou „aktivní“ v tom smyslu, že zahrnují elektrické nebo mechanické ovládání na příkaz. Některé navržené systémy fungují pasivně, *např.* přetlakové ventily. Oba vyžadují paralelní redundantní systémy. Vlastní nebo úplná pasivní bezpečnost závisí pouze na fyzikálních jevech, jako je konvekce, gravitace nebo odolnost vůči vysokým teplotám, nikoli na fungování navržených komponent. Vzhledem k tomu, že malé reaktory mají vyšší poměr plochy povrchu k objemu (a teple aktivní zóny) ve srovnání s velkými bloky, není v malých reaktorech potřeba velké množství technického zabezpečení (včetně odvodu tepla ve velkých reaktorech). [[zpět](#)]

d. V roce 2010 svolala Americká nukleární společnost zvláštní výbor, který se měl zabývat licenčními problémy s SMR v USA, kde byly od 50. do 80. let 20. století postaveny desítky malých pozemních reaktorů, což dokazuje bezpečnost a zabezpečení lehkých vodou chlazených reaktorů, , plynem chlazené a kovem chlazené technologie SMR. Do výboru se významně zapojili navrhovatelé JMK spolu s Komisí pro jaderný dozor, laboratořemi ministerstva energetiky a univerzitami – celkem téměř 50 osob. Průběžná zpráva výboru ¹ obsahuje následující dvě tabulky, které zdůrazňují některé rozdíly mezi zavedenou flotilou reaktorů v USA a SMR.

Porovnání bezpečnostních systémů elektrárny současné generace s potenciálním návrhem JMK

Bezpečnostní systémy současné generace

System vysokotlakého vstřikování.
Nízkotlaký vstřikovací systém.

Bezpečnostní systémy SMR

Není vyžadován žádný aktivní bezpečnostní vstřikovací systém. Chlazení jádra je udržováno pomocí pasivních systémů.

Bezpečnostní systémy současné generace

Bezpečnostní systémy SMR

Nouzová jímka a související požadavky na čistou pozitivní sací výšku (NPSH) pro čerpadla související s bezpečností.

Žádná čerpadla související s bezpečností pro zmírnění nehod; odpadá tedy potřeba jímek a ochrany jejich sacího přívodu.

Nouzové dieselové generátory.

Pasivní design nevyžaduje nouzové napájení střídavým proudem (AC) pro udržení chlazení aktivní zóny. Teplo jádra odebrané přenosem tepla přes nádobu.

Aktivní kontejnmentové tepelné systémy.

Není vyžadováno kvůli pasivnímu odvodu tepla z kontejnmentu.

Kontejnmentový sprejový systém.

Sprejové systémy nejsou nutné ke snížení tlaku páry nebo k odstranění radiojódů z kontejnmentu.

Systémy spouštění systému nouzového chlazení aktivní zóny (ECCS), instrumentace a řízení (I&C). Složité systémy vyžadují značné množství online testování, které přispívá k nespolehlivosti závodu a problémům bezpečnostních systémů s neúmyslným spuštěním.

Jednodušší a/nebo pasivní bezpečnostní systémy vyžadují méně testování a nejsou tak náchylné k neúmyslnému spuštění.

Systém nouzové napájecí vody, zásobníky kondenzátu a související nouzové zásoby chladicí vody.

Schopnost odvádět teplo z jádra bez nouzového systému napájecí vody je významným bezpečnostním vylepšením.

Porovnání podpůrných systémů elektrárny současné generace s potenciálním návrhem JMK

Současné podpůrné systémy LWR

Podpůrné systémy SMR

Současné podpůrné systémy LWR

Těsnění čerpadla chladicí kapaliny reaktoru. Únik těsnění byl bezpečnostní problém. Údržba a výměna těsnění jsou nákladné a časově náročné.

Podpůrné systémy SMR

Integrální konstrukce eliminují potřebu těsnění.

Konečný chladič a související systémy rozhraní. Říční systémy a systémy mořské vody jsou aktivní systémy, které podléhají ztrátě funkce z takových příčin, jako jsou extrémní povětrnostní podmínky a biologické znečištění.

Konstrukce SMR jsou pasivní a odvádějí teplo vedením a konvekcí. Odvod tepla do externího vodního chladiče není vyžadován.

Uzavřené systémy chladicí vody jsou vyžadovány pro podporu bezpečnostních systémů pro odvod tepla z aktivní zóny a tepla ze zařízení.

Pro systémy související s bezpečností nejsou vyžadovány žádné uzavřené systémy chladicí vody.

Vytápění, větrání a klimatizace (HVAC). Vyžaduje se, aby fungovala pro podporu správného provozu systémů souvisejících s bezpečností.

Konstrukce zařízení minimalizuje nebo eliminuje potřebu chlazení místností související s bezpečností, čímž se eliminuje jak systém HVAC, tak související uzavřené systémy vodního chlazení.

Některé z raných (1950-1980) malých energetických reaktorů byly vyvinuty tak, aby poskytovaly autonomní zdroj energie (tj. nevyžadující neustálou dodávku paliva) ve vzdálených oblastech. USA vyrobily osm takových experimentálních reaktorů o výkonu 0,3 až 3 MWe rozmístěných na Aljašce, Grónsku a Antarktidě. SSSR jich vyrobil asi 20, mnoha druhů a jeden (Gamma) dodnes funguje v Kurčatově institutu. Dalším je běloruský Pamír, zmíněný v sekci HTR výše. [[zpět](#)]

E. První dvoubloková elektrárna VBER-300 měla být postavena ve městě Aktau v západním Kazachstánu, s dokončením prvního bloku se původně počítalo v roce 2016 a v roce 2017 u druhého. Akciová společnost Kazachstán-Ruské jaderné stanice (JSC) byla založena společnostmi Kazatomprom a Atomstroyexport (v poměru 50:50) v

říjnu 2006 za účelem návrhu, konstrukce a mezinárodního marketingu VBER-300. Viz stránku o VBER-300 na webu Kazatomprom (www.kazatomprom.kz) [[Zpět](#)]

F. Prototyp BWR Melekess VK-50 o výkonu 200 MWt (50 MWe netto) v Dimitrovgradu v Uljanovsku zahájil provoz v roce 1965. [[Zpět](#)]

G. Argentinská centrála modulárních prvků (CAREM). Podívejte se na web Invap (www.invap.com.ar). [[zpět](#)]

h. Stránka o NHR-5 na webu Institutu technologie jaderné energie univerzity Tsingua (nyní Institut jaderných a nových energetických technologií, www.inet.tsinghua.edu.cn). popisuje NHR-5 jako „světlo typu plavidla vodní reaktor s pokročilými funkcemi, včetně integrálního uspořádání, přirozené cirkulace, hydraulického pohonu řídicí tyče a pasivních bezpečnostních systémů. Na NHR-5 bylo provedeno mnoho experimentů, jako je kogenerace tepla a elektřiny, klimatizace a odsolování mořské vody." [[zpět](#)]

i. Viz stránku o modulárních jaderných reaktorech na webu Babcock & Wilcox (www.babcock.com). [[zpět](#)]

j. 69 palivových souborů je identických s normálními PWR, ale na délku asi 1,7 m, o něco méně než polovinu délky. [[zpět](#)]

k. V letech 1966 až 1988 experimentální reaktor s oblázkovým ložem **AVR** (Arbeitsgemeinschaft VersuchsReaktor) v německém Jülichu pracoval více než 750 týdnů při výkonu 15 MWe, většinu času s palivem na bázi thoria (smíchané s vysoce obohaceným uranem). Palivo se skládalo z asi 100 000 palivových článků velikosti kulečnickové koule. Bylo dosaženo maximálního vyhoření 150 GWd/t. Bylo použito k demonstraci přirozené bezpečnosti konstrukce kvůli zápornému teplotnímu koeficientu: výkon reaktoru rychle klesal, když byl přerušen tok chladiva helia.

300 MWe **THTR** (Thorium HochTemperatur Reaktor) v Německu byl vyvinut z AVR a fungoval v letech 1983 až 1989 s 674 000 oblásky, z nichž více než polovina obsahovala palivo Th/HEU (zbytek grafitový moderátor a některé absorbery neutronů). Ty byly průběžně recyklovány a palivo prošlo v průměru šestkrát aktivní zónou. Výroba paliva byla v průmyslovém měřítku. Reaktor byl odstaven ze sociopolitických důvodů, nikoli kvůli technickým potížím, a opět se prokázala základní koncepce s vlastními bezpečnostními prvky HTR. Poháněla parní turbínu.

200 MWt (72 MWe) **HTR-modul** byl poté navržen společností Siemens/Interatom jako modulární jednotka, která má být konstruována ve dvojicích, s výškou jádra trojnásobku jejího průměru, umožňující pasivní chlazení pro odvod rozpadového tepla, což eliminuje potřebu nouzového stavu. systémy chlazení jádra. Byl licencován v roce 1989, ale nebyl postaven. Tento návrh byl součástí technologie zakoupené společností Eskom v roce 1996 a je přímým předchůdcem modulárního reaktoru s oblázkovým ložem (PBMR).

Během 70. a 80. let Nukem vyrobil více než 250 000 palivových článků pro AVR a více než jeden milion pro THTR. V roce 2007 společnost Nukem oznámila, že pro to znovu získala odborné znalosti a zpřístupnila je jako průmyslovou podporu.

Kromě těchto konstrukcí s oblázkovým ložem běžel 20 MWt reaktor Dragon ve Velké Británii v letech 1964-75, 115 MWt reaktor Peach Bottom v USA běžel v letech 1966-74 a 8432 MWt Fort St Vrain běžel v letech 1976-89 – vše s hranolovým palivem a poslední dva dodávají energii komerčně. V USA byl v 80. letech vyvinut společností General Atomics návrh modulárního vysokoteplotního plynem chlazeného reaktoru (MHTGR) s vlastními bezpečnostními prvky, ale projekt DOE skončil v roce 1993. [[Zpět](#)]

1. Demonstrační GFR ALLEGRO o výkonu 80 MWt plánuje Euratom tak, aby zahrnoval veškerou architekturu a hlavní materiály a komponenty předpokládané pro plnohodnotnou GFR, ale bez

přímého systému (Brayton) cyklu přeměny energie. Vyvíjí se v projektu vedeném Francouzi a jeho přípravná fáze je plánována do roku 2026. [[Zpět](#)]

m Napájecí modul Hyperion byl původně navržen Národní laboratoří v Los Alamos jako „jaderná baterie“ o výkonu 70 MWt, která využívá palivo hydrid uranu (UH₃), který také funguje jako moderátor. UH₃ uchovává obrovské množství vodíku, ale tento uskladněný vodík disociuje, když teplota stoupne nad provozní teplotu 550 °C. Uvolňování plynného vodíku snižuje hustotu UH₃, což zase snižuje reaktivitu. Tento proces je obrácen, když teplota jádra klesá, což vede k reabsorpci vodíku. Následné zvýšení hustoty moderátoru má za následek zvýšení reaktivity jádra ¹¹. To vše bez velkých teplotních změn, protože hlavní zisk nebo ztráta energie je zahrnuta ve fázové změně. [[zpět](#)]

n. V říjnu 2010 společnost GEH oznámila, že zkoumá se společností Savannah River Nuclear Solutions možnost výstavby prototypu reaktoru PRISM v lokalitě Savannah River Ministerstva energetiky.

Ó. Protože MSR budou normálně pracovat při mnohem vyšších teplotách než LWR, mají potenciál pro procesní teplo. Další možností je mít sekundární héliové chladivo pro výrobu energie prostřednictvím Braytonova cyklu. [[zpět](#)]

p. Většina technologií vzduchem chlazených kondenzátorů (ACC) má omezení v tom, že trubky vedoucí páru musí být vyrobeny z uhlíkové oceli, což vážně omezuje životnost ACC. Holtec vyvinul ACC s nerezovými trubkami spojenými s hliníkovými žebry a tím s mnohem delší životností. [[zpět](#)]

Reference

1. Průběžná zpráva zvláštního výboru prezidenta Americké jaderné společnosti pro otázky licencí na malé a střední reaktory (SMR), American Nuclear Society (červenec 2010) 3. B&W představuje škálovatelnou, praktickou jadernou energii, tisková

- zpráva Babcock & Wilcox (10. června 2009); Malé reaktory generují velké naděje, Wall Street Journal (18. února 2010) [[Zpět](#)]
4. Rusko plánuje rozmístění malých reaktorů, World Nuclear News (13. září 2007)
6. Tennessee Valley Authority (TVA) – Dopis klíčových předpokladů pro možné spuštění a výstavba modulů malých modulárních reaktorů v lokalitě Clinch River, dopis TVA Komisi pro jaderný dozor (5. listopadu 2010)
7. PBMR zvažuje změnu produktové strategie, tisková zpráva PBMR (Pty) (5. února 2009). [[Zpět](#)]
8. PBMR odloženo, World Nuclear News (11. září 2009). [[Zpět](#)]
9. Projev ministryně veřejných podniků Barbary Hoganové k Národnímu shromáždění o modulu Pebble Bed Modular Reactor, tisková zpráva ministerstva veřejných podniků (16. září 2010). [[Zpět](#)]
10. Jihoafrická společnost Pebble Bed Company spojuje své síly s MHI of Japan, tisková zpráva PBMR (Pty) (4. února 2010). [[Zpět](#)]
11. Velké naděje na hydrid, Nuclear Engineering International (leden 2009).
12. Hyperion spouští rychlý reaktor s palivem U_2N_3 a chlazeným Pb-Bi, Nuclear Engineering International (listopad 2009). [[zpět](#)]
13. Předaplikační zpráva o hodnocení bezpečnosti reaktoru s inovativním malým modulem energetického reaktoru (PRISM) na tekutý kov – závěrečná zpráva, NUREG-1368, Úřad pro regulaci jaderných reaktorů, Komise pro jaderný dozor USA (únor 1994). [[Zpět](#)]
14. En+ je společníkem společnosti JSC EuroSibEnergó a 53,8% vlastníkem společnosti Rusal, která jednala s Rosatomem ohledně jaderné elektrárny na Dálném východě a fáze II jaderné elektrárny Balakovo. Ta měla přispět většinou kapitálu a Rosatom nyní hledá dalšího investora. V roce 2011 přešel 50% podíl EuroSibEnergó na její dceřinou společnost JSC Irkutskenergo. Iniciativa pro malé rychlé reaktory, World Nuclear News (4. ledna 2010); En+ Group a Rosatom tvoří JV k vytvoření rychlého neutronového reaktoru,

tisková zpráva En+ Group (25. prosince 2009). [[Zpět](#)]

15. TR10: Travelling-Wave Reactor, Matthew L. Wald, MIT Technology Review (březen/duben 2009); Zvláštní zpráva: 10 Emerging Technologies 2009, MIT Technology Review

16. Pokročilý vysokoteplotní reaktor: vysokoteplotní palivo, chladicí kapalina roztavené soli a reaktor na výrobu tekutých kovů, Charles Forsberg, Oak Ridge National Laboratory, představený na 1. mezinárodní Konferenci o inovativních jaderných energetických systémech pro udržitelný rozvoj světa (COE INES-1) konaná na Tokijském technologickém institutu, Tokio, Japonsko (31. října - 4. listopadu 2004) [[Zpět](#)]

17. Usnadnění mezinárodního udělování licencí na malé modulární reaktory , Pracovní skupina Světové jaderné asociace Cooperation in Reactor Design Evaluation and Licensing (CORDEL) (srpen 2015)

18. Robert Rosner a Stephen Goldberg, Malé modulární reaktory – klíč k budoucí výrobě jaderné energie v USA , Institut energetické politiky v Chicagu, The University of Chicago (listopad 2011) [[Zpět](#)]

Obecné zdroje

Malé modulární reaktory: Výzvy a příležitosti , Agentura pro jadernou energii OECD (duben 2021)

Vzestup jaderné technologie 2.0 – Vize Tractebel o malých modulárních reaktorech , Tractebel (2020)

Stav návrhů malých reaktorů bez doplňování paliva na místě, Mezinárodní agentura pro atomovou energii, Mezinárodní agentura pro atomovou energii IAEA-TECDOC-1536, ISBN 9201156065 (leden 2007)

Thorium jako zdroj energie – příležitosti pro Norsko, Výbor pro zprávy o thoriu, norské ministerstvo pro ropu a energetiku (2008)

Malé modulární reaktory – klíč k budoucí výrobě jaderné energie v USA , listopad 2011, technický dokument pro DOE z University of Chicago Energy Policy Institute (EPIC)

Malé modulární reaktory – jejich potenciální role ve Spojeném království, Národní jaderná laboratoř, červen 2012

Stav návrhů malých a středních reaktorů – Doplněk k informačnímu systému MAAE Advanced Reactors Information System (ARIS), Mezinárodní agentura pro atomovou energii (září 2012)

Zheng Mingguang (SNERDI), *Výzkum a vývoj malých reaktorů v Číně*, červen 2013

Usnadnění mezinárodního licencování malých modulárních reaktorů, spolupráce při hodnocení návrhu reaktorů a licencování (CORDEL) Pracovní skupina Světové jaderné asociace (srpen 2015)

Ministerstvo energetiky Ontaria - Studie proveditelnosti nasazení SMR: proveditelnost potenciálního nasazení malých modulárních reaktorů (SMRs) v Ontariu připravil Hatch Ltd. pro Ministerstvo energetiky Ontaria, 2. června 2016

Juan A. Vitali *et al.*, Studie o využití mobilních jaderných elektráren pro pozemní provoz (26. října 2018)

Lehkvodní reaktory

Velká kniha války...a další kapitola o jaderných reaktorech americké armády na webových stránkách Alternate Wars

Nuclear Seawater Desalination Plant spojený s 200 MW topným reaktorem, Haijun Jia a Yajun Zhang, Institute of Nuclear Energy Technology (INET), Tsinghua University, Peking, Čína, prezentované na *Mezinárodním sympoziu o mírových aplikacích jaderné technologie v zemích Rady pro spolupráci v Perském zálivu (GCC)*, Džidda, Saúdská Arábie (3.–5. listopadu 2008)

Plovoucí zdroje energie založené na elektrárnách jaderných reaktorů, Panov *a kol.*, Federal State Unitary Enterprise the Federal Scientific and Industrial Center II Afrikantov Experimental Design Bureau of Mechanical Engineering, Nižnij Novgorod, Rusko, prezentované na 5. mezinárodní konferenci o asijské energetické spolupráci: mechanismy, rizika, bariéry (AEC-2006), pořádané Institut energetických systémů Ruské akademie věd v Jakutsku, Rusko (27.-29. června 2006)

Komplex jaderného odsolování se zařízením varného reaktoru VK-

300, BA Gabaraev, Yu.N. Kuznětzov, AA Romenkov a Yu.A. Mishanina, prezentovaná na výročním sympoziu Světové jaderné asociace v roce 2004, Londýn (8.-10. září 2004)

Sekce o Flexblue na webu DCNS Web

NuScale Power Web

Holtec (www.holtecinternational.com)

Stránka TRIGA Nuclear Reactors na webových stránkách General Atomics Electronic Systems

Westinghouse SMR: Nuclear Engineering International, březen 2012

CAREM: Inovativní SMR Argentiny, Nuclear Engineering International Květen 2014

Vladimir Artisiuk, Rosatom Technical Academy, SMR Technology Development v Rusku a podpora budování kapacit pro nastupující země, prezentované na *Technickém setkání MAAE o technologickém hodnocení malých modulárních reaktorů pro krátkodobé nasazení*, které se konalo v Tunisu, Tunisko ve dnech 2. až 5. října 2017

Elena Pashina, Rosatom technologie SMR pro trh, prezentované na výroční jaderné konferenci Energiforsk 2021 o malých modulárních reaktorech konané ve dnech 20. – 21. ledna 2021

Vysokoteplotní plynem chlazené reaktory

Domovská stránka HTTR na webu Japonské agentury pro atomovou energii Webové

stránky PBMR

Pebble Bed Modular Reactor – První generace reaktoru IV, který bude postaven, Sue Ion, David Nicholls, Regis Matzie a Dieter Matzner, představeno na výročním sympoziu Světové jaderné asociace v Londýně v roce 2003 (3.-5. září 2003)

Status GT-MHR pro výrobu elektřiny, MP LaBar, AS Shenoy, WA Simon a EM Campbell, představený v roce 2003 na výročním sympoziu Světové jaderné asociace v Londýně (3.-5. září 2003) GT-MHR stránka na webu General Atomics Energy Group

Stránka EM2 na webu General Atomics Energy Group

Stránka o vysokoteplotních a velmi vysokoteplotních reaktorech na

webu Areva Webová

stránka Adams Atomic Engines, Inc.

HTGR Advances in China, Xu Yuanhui, Nuclear Engineering International (březen 2005)

Rapid-L:

(<http://journals.pepublishing.com/content/f662788028203252/>)

Vysokoteplotní plynem chlazené reaktory: Získané poznatky použitelné pro jadernou elektrárnu nové generace, Beck JM & Pinnock LF Idaho National Laboratory, duben 2011

Yujie Dong, Technologies of HTR-PM Plant a její ekonomický potenciál, INET/Tsinghua University, představil na Technickém setkání MAAE o ekonomické analýze HTGR a SMR, které se konalo ve Vídni, Rakousko dne 25. 28. srpna 2015

Rychlé reaktory chlazené kapalným kovem

Web Hyperion Power

David Pescovitz, Novel Nuclear Reactor (včetně baterií), *Lab Notes*, College of Engineering, University of California, Berkeley, Volume 2, Issue 8 (říjen 2002)

Stránka vývoje Heavy Liquid Metal Reactor na Argonne National Laboratory Nuclear Engineering Division web

STAR-H2: Bezpečný přenosný autonomní reaktor pro výrobu vodíku a odsolování, Wade *et al.*, prezentované na desáté mezinárodní konferenci o jaderném inženýrství (ICONE 10) konané v Arlingtonu, Virginia USA, (14.-18. dubna 2002)

Zpráva o stavu malého bezpečného přepravitelného autonomního reaktoru (SSTAR)/olověného rychlého reaktoru (LFR) a Podpora výzkumu a vývoje, Sienicki *et al.*, Argonne National Laboratory (29. září 2006)

Nuclear Energy to Go – Samostatný, přenosný reaktor, *Věda a technologie*, Lawrence Livermore National Laboratory (červenec/srpen 2004)

Web Advanced Reactor Concepts, LLC

Lead-Bismut Eutectics Cooled Long-Life Safe Simple Small Portable

Proliferation Resistant Reactor (LSPR), dostupný na webových stránkách Výzkumné laboratoře pro jaderné reaktory, Tokyo Institute of Technology (www.nr.titech.ac.jp) Stránka s technickými publikacemi projektu Galena na webu Burns and Roe Technické možnosti pro pokročilý reaktor na tekuté kovy – podkladový dokument, Kongres USA, Úřad pro hodnocení technologií, OTA-BP-ENV-126, Úřad vlády USA pro tisk, Washington, DC, USA (květen 1994) Sekce Terrapower na webu Intellectual

Ventures

Připravujeme dolů na Zemi, Nuclear Engineering International (říjen 2002)

STAR Performer, J. Sienicki *et al.*, Nuclear Engineering International (červenec 2005)

Keeping it Simple, A. Minato, Nuclear Engineering International (říjen 2005)

Reaktory na roztavenou sůl, AHTR

Příloha 6.0 Reaktor roztavené soli, IV. generace jaderných energetických systémů Desetiletý programový plán – fiskální rok 2007, Ministerstvo energetiky Úřad jaderné energetiky (září 2007) Prezentace jaderných reaktorů na kapalná paliva Robert Hargraves a Ralph Moir (29. března 2010)

Robert Hargraves a Ralph Moir, *Liquid Fluoride Thorium Reactors*, American Scientist, sv. 98, č. 4, s. 304 (červenec-srpen 2010)

Webové stránky EnergyFromThorium

Fluoride-salt-chlazené vysokoteplotní reaktory (FHR) pro základní a špičkovou elektřinu, stabilizaci sítě a procesní teplo, Forsberg, Hu, Peterson, Sridharan, 2013, MIT

Ho MKM, Yeoh GH, & Braoudakis G., 2013, Molten Salt Reactors, in Materials and process for energy: communication current research and technology development, ed A.Mendez-Vilas, Formatex Research Center Ignatiev, V & Feynberg, O, Kurchatov Inst, Molten Salt Reactor: přehled a perspektivy, OECD

2012

Terrestrial Energy Inc, Integral MSR Technical Summary, červen 2014

Transatomic Power Corp., technická bílá kniha, březen 2014

Energy Process Developments Ltd, červenec 2015, MSR Review: Feasibility of Developing a Pilot Scale Molten Salt Reactor ve Spojeném království, červenec 2015

Sherrell Greene, Oak Ridge National Laboratory, SmAHTR – malý modulární pokročilý vysokoteplotní reaktor, DOE FHR Workshop, 20.–21. září 2010

Vodné homogenní reaktory

Nukleární medicína – stránka výroby lékařských izotopů na webu Babcock & Wilcox Technical Services Group [již není k dispozici – místo toho viz B&W Medical Isotope Production System , představený na schůzce mezi US Nuclear Regulatory Commission (NRC) a Babcock & Wilcox Technical Services Group a další zúčastněné strany v ústředí NRC dne 17. května 2011]

Y. Ronen a kol., *The Smallest Thermal Nuclear Reactor* , Nuclear Science and Engineering 153, 1, 90-92 (2006)

Postscript/Dodatek

Některé z vývoje popsaných v tomto článku jsou fascinující a vzrušující. Přesto je prospěšné mít na paměti slova hlavního amerického průkopníka ve vývoji jaderných reaktorů. Admirál Hyman Rickover v roce 1953 – přibližně v době, kdy byl spuštěn jeho první testovací reaktor v USA – komentoval rozdíly mezi „akademickým reaktorem“ a „praktickým reaktorem“. Viz: http://en.wikiquote.org/wiki/Hyman_G._Rickover pro celou nabídku:

Akademický reaktor nebo reaktorová elektrárna má téměř vždy tyto základní charakteristiky: (1) Je jednoduchý. (2) Je malý. (3) Je to levné. (4) Je světlo. (5) Může být postaven velmi rychle. (6)

Účelově je velmi flexibilní. (7) Bude zapotřebí velmi malý vývoj. Bude používat převážně „běžné“ komponenty. (8) Reaktor je ve fázi studie. Nyní se nestaví.

Na druhé straně se praktický reaktor může vyznačovat následujícími charakteristikami: (1) Nyní se staví. (2) Zpoždění oproti plánu. (3) Vyžaduje to nesmírné množství vývoje na zdánlivě triviálních položkách. (4) Je to velmi drahé. (5) Stavba trvá dlouho kvůli problémům s technickým vývojem. (6) Je velký. (7) Je těžký. (8) Je to složité.

Nástrojem akademicko-reaktorového konstruktéra jsou papír a tužka s gumou. Pokud dojde k chybě, lze ji vždy vymazat a změnit. Pokud se konstruktér praktického reaktoru zmýlí, nosí tu chybu na krku; nejde to vymazat. Každý to vidí.