

Jaderné palivo poskytuje stále něco nového

Cílem vývoje v oblasti reaktorové technologie a jaderného paliva je v současnosti uzavírání palivového cyklu, ale podstatnou měrou jsou také modifikovány palivové soubory pro současné reaktory, což přináší stále nové benefity pro spolehlivost a ekonomičnost jejich provozu. Mezi reaktory typu VVER zastávají výsadní postavení české Dukovany, které jsou iniciátorem mnohých modifikací.

Uzavíráme jaderný palivový cyklus

V současné době je ve většině jaderných elektráren světa používán palivový cyklus, který je označován za otevřený. Znamená to, že vytěžená uranová ruda je mechanicky a chemicky zpracována, vzniklý materiál je obohacen a jsou z něj vyrobeny palivové tablety. Následuje fabrikace palivové kazety, která je potom zavezena do aktivní zóny jaderného reaktoru. Po vyjmutí z reaktoru je palivo již jen skladováno a strategie většiny zemí, včetně České republiky, počítají s jeho uložením do hlubinného úložiště na desítky tisíc let, po které potrvá pokles aktivity na úroveň přírodního pozadí.

Přesto nelze použité jaderné palivo označovat za odpad, legislativně jím ani není, ale za významnou energetickou surovinu, neboť obsahuje procentuálně větší množství štěpitelného uranu 235 než přírodní uran a také další energeticky využí-

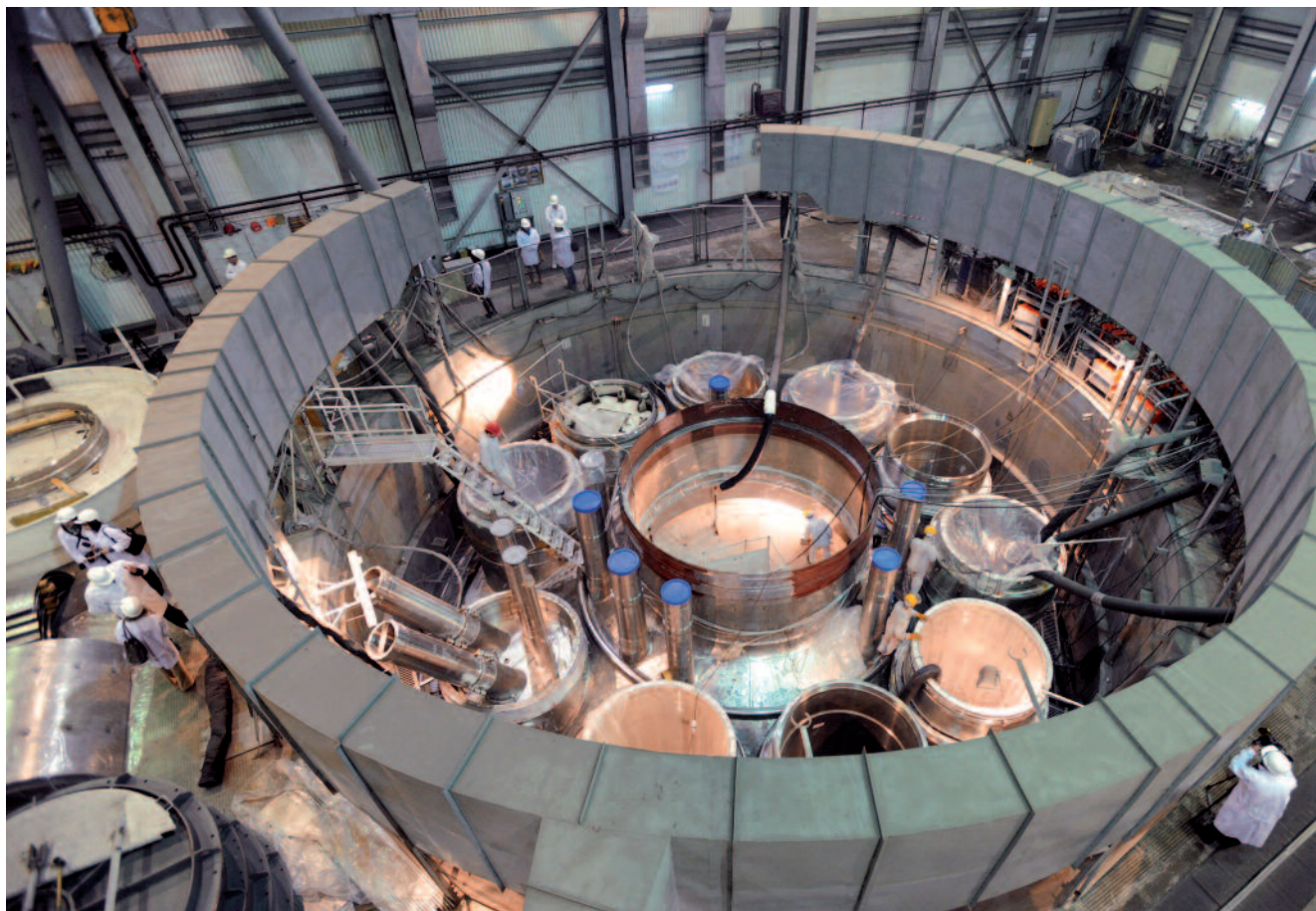
telné látky. Proto společnosti zabývající se výrobou paliva a vývojem jaderných reaktorů cílí na tak zvané uzavření palivového cyklu.

Znamená to, že použité palivo je přepracováno a zbývající uran a plutonium, které bylo vygenerováno štěpením v reaktoru, jsou použity pro výrobu paliva MOX. Jako štěpitelná látka zde tedy slouží směs oxidů uranu a plutonia. Zbylé látky, pokud jsou od nich navíc ještě odděleny tzv. minoritní aktinidy, jsou potom ukládány do úložiště aktivních odpadů, avšak jejich poločas rozpadu bývá o několik řádů kratší než v původním případě, takže je nutné je izolovat od životního prostředí jen několik stovek let.

Směsné palivo je možné používat v tepelných (tlakovodních a varných) i rychlých reaktorech. První pokusy v tepelném reaktoru byly provedeny v roce 1963, ale o použití v průmyslovém měřítku můžeme mluvit až od 80. let. K největším prů-

kopníkům paliva MOX pro tepelné reaktory se řadí Japonsko a Francie. Z japonských 43 reaktorů, které byly v provozu před fukušimskou havárií používalo až 10 palivo MOX, které tvořilo třetinu aktivní zóny. Přes 30 reaktorů z Francie, Německa, Švýcarska a Belgie používá stejný poměr klasického a směsného paliva. Až poloviční podíl směsného paliva v aktivní zóně nemění výrazně provozní charakteristiky reaktoru a vyžaduje modifikace jen menšího rozsahu, například rozšíření počtu řídicích tyčí. Nové typy reaktorů jsou projektovány tak, aby bylo možno jejich aktivní zónu zcela zaplnit směsným palivem.

Tímto ale ještě není možno palivový cyklus zcela uzavřít a opakovaně recyklovat použité palivo. Izotopické složení použitého směsného paliva z tepelného reaktoru totiž omezuje možnost další recyklace a takřka veškeré čeká ve skladech na větší rozšíření rychlých reaktorů.



Reaktorový sál rychlého reaktoru BN-800 během výstavby čtvrtého bloku Bělojarské jaderné elektrárny.



První palivové kazety se směsným palivem pro reaktor BN-800, které byly vyrobeny podnikem NIAR v Dimitrovgradu v rámci zkušební výroby, která v současnosti přechází na průmyslovou.

V tepelných reaktorech je používán moderátor (v našich jaderných elektrárnách hraje jeho roli voda), který zpomaluje neutrony a zvyšuje tak pravděpodobnost jejich zachytu jádrem uranu 235. Rychlé reaktory jsou chlazeny olovem, sodíkem či plyny, které nemají vlastnosti moderátoru, takže neutrony nejsou zpomalovány. Díky tomu dochází výrazně častěji k zachytu neutronu uranem 238, který se potom dvěma beta rozpady přeměňuje na štěpitelné plutonium 239. Při vhodné konstrukci aktivní zóny je tak možné generovat více paliva, tedy štěpitelných látek, než je do reaktoru zavedeno a reaktor potom nazýváme množivý. Právě tato vlastnost je zásadní pro uzavření palivového cyklu, protože umožňuje maximálně energeticky využít materiály obsažené v jaderném palivu, ať jde o uran 238 či štěpné produkty vznikající během rozpadu štěpitelných prvků.

Nejzdařileji probíhá vývoj rychlých reaktorů v Rusku, kde je v současnosti spuštěn reaktor BN-800, další článek spojující první prototypové sodíkové reaktory s komerčním typem. Tím má být BN-1200, jehož projekt již je připraven v ruské projekční kanceláři OKBM Afrikantov patříci do státní korporace pro jadernou energii Rosatom. Projekt bude modifikován na základě provozních zkušeností s reaktorem BN-800 a do roku 2030 mají v Rusku vzniknout tři bloky s komerční verzí rychlého sodíkového reaktoru. Tyto reaktory budou mít aktivní zónu zcela zaplněnou směsným palivem a budou recyklovat použité palivo z tlakovodních reaktorů. Vývojem paliva pro rychlé reaktory se zabývá palivová společnost TVEL, která dodává palivo také do všech českých reaktorů, ať jde o energetické v jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín, nebo o dva výzkumné v Řeži či jeden školní v Praze.

Do projektu reaktoru BN-800 byly zapojeny také čeští dodavatelé. Šlo například o firmy ARAKO a SIGMA GROUP, které dodaly přes tisíc kusů armatur a čerpadla pro hasící systémy.

Ruský Rosatom realizuje program Proryv, který má za cíl převést z výzkumných ústavů do praxe technologie pro uzavření palivového cyklu. Znamená to projekty řady rychlých reaktorů, ať už jde o již zmíněné sodíkové reaktory, nebo inovativní typy malých rychlých reaktorů. Největší důraz je kladen na reaktory řady BN, které jsou celosvětově nejúspěšnějšími sodíkovými



Horní konec makety palivové kazety pro rychlý reaktor chlazený sodíkem BOR-60 sloužící k výzkumným účelům.

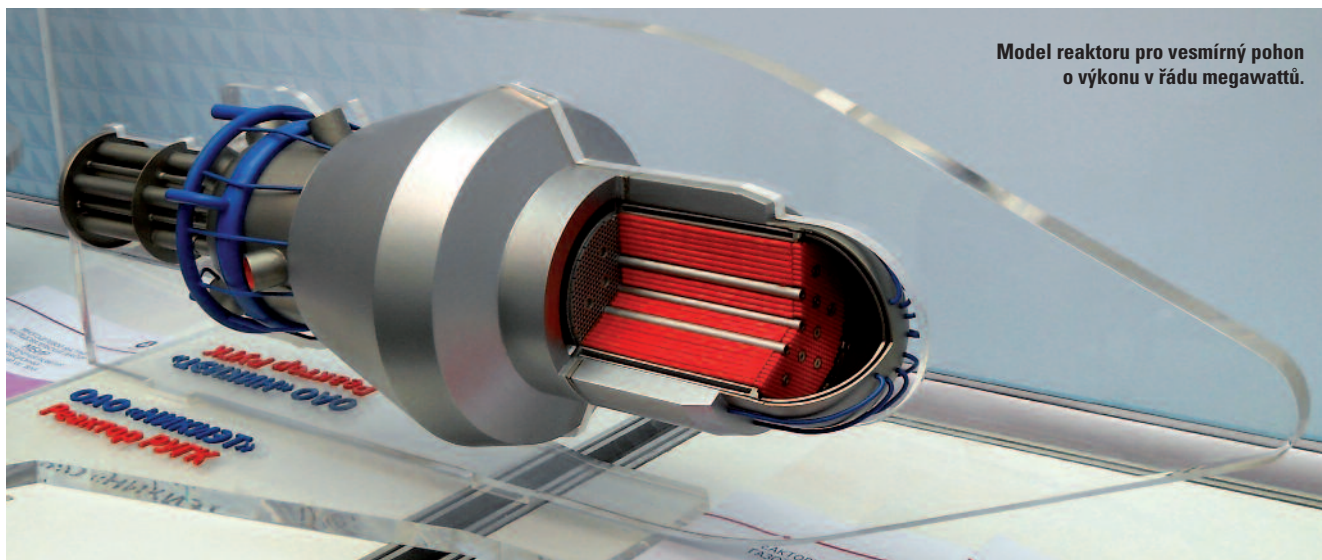


Zkušební kazeta s nitridovým palivem pro reaktor BREST-300 pro ozařovací zkoušky.

reaktory, protože jsou komerčně provozovány výrazně delší dobu než jejich ekvivalenty z Francie, Japonska či Spojených států.

Vývojový ústav NIKIET se zabývá projektem reaktoru MBIR, který bude po svém spuštění nejvýkonnějším výzkumným rychlým reaktorem a na jehož projektování se podílí i uherskobrodská společnost EGP

Invest. Ta je také zapojena do vývoje dalšího malého rychlého reaktoru – jde o SVBR-100 chlazený olovem a bismutem, který projektuje společnost AKME-Engineering. Harmonogram projektu nasvědčuje, že půjde o světově první malý rychlý reaktor, který bude spuštěn. A posledním inovativním ruským projektem je BREST-300, což je malý reaktor chlazený olovem



Model reaktoru pro vesmírný pohon o výkonu v řádu megawattů.

vyvíjený ústavem NIKIET a bude používat nitridové jaderné palivo. Všechny zmíněné společnosti jsou součástí Rosatomu a společně se snaží převést nové technologie rychlých reaktorů z rýsovacích prken do praxe.

Pro nové reaktory je potřeba také vyvíjet nová paliva, čímž se zabývají vývojové podniky společnosti TVEL, ruského výrobce jaderného paliva. V podniku Gornochimicheskij kombinat kupříkladu vznikla prototypová linka na výrobu směsných palivových tablet pro reaktor BN-800 a také linka na výrobu nitridového paliva pro reaktor BREST-300. Mechanické i ozařovací zkoušky nitridového paliva již probíhají, aby bylo včas připraveno pro výrobní blok s tímto novým typem reaktoru. Ruský jaderný průmysl naznačuje, že v příštích deseti letech bychom se mohli dočkat mnoha novinek v oblasti jaderných technologií, obzvláště rychlých reaktorů.

Vývoj paliva pro současné reaktory přináší další úspěchy

Také v oblasti paliva pro současné reaktory typu VVER bychom našli řadu inovativních kroků, které přispívají k jeho spolehlivosti a efektivitě. Příkladem může být délka jeho pobytu v aktivní zóně: zatímco původně byla každá kazeta v reaktoru tři roky, právě licencovaný nový typ je určen pro šestiletý palivový cyklus.

Výrobce TVEL spolupracuje při vývoji paliva pro reaktory typu VVER s odborníky z českých společností ČEZ, ŠKODA JS, ÚJP Praha, ÚJV Řež a ALVEL. K jejímu podstatnému prohloubení došlo v roce 1996, kdy TVEL zvítězil v tendru na dodávky paliva pro Dukovany nad americkým Westinghouse. Elektrárna tak získala nový typ paliva pro čtyřletý palivový cyklus a dodnes pro ni TVEL dodává své palivové novinky.

Z uvedených společností je nejmladší ALVEL, která byla v roce 2011 založena brněnskou společností ALTA a společností TVEL. Je zaměřena na lokalizaci služeb v oblasti palivového cyklu jaderných elektráren na území Evropské unie, a to včetně vý-

zkumné a vývojové činnosti, a také posiluje spolupráci českých organizací přímo s ruským výrobcem TVEL.

Palivo je vyvíjeno jednak z hlediska obsahu štěpitelného uranu a za druhé z hlediska spolehlivosti, oba faktory mají pro provozovatele elektrárny především ekonomický přínos. Zvyšováním množství uranu 235, který obsahuje palivová kazeta, umožňuje prodloužit její pobyt v aktivní zóně. Toho lze dosáhnout zvyšováním počtu palivových tablet v proutku, ale také jejich rozměry a zmenšením či odstraněním centrálního otvoru. K větší efektivitě paliva přispívá i profilování obohacení, kdy v jedné kazetě jsou různě obohacené proutky. Dále je také vhodné redukovat materiály s parazitickou absorpcí neutronů.

V počátcích vývoje reaktorů byl díky nedostatku zkušeností kladen velký důraz na projektové rezervy, které spolu s vývojem technologií a získanými zkušenostmi dnes poskytují prostor pro inovace zlepšení efektivitě provozu. Cesta intenzivního vývoje nastoupená ruskými a českými odborníky v oblasti vývoje paliva pro reaktory VVER přináší mnohé pokroky. Z nich lze jmenovat třeba palivové soubory Gd-1 s gadoliniovým vyhořívajícím absorbatorem zavázané do dukovanských reaktorů od roku 2003, které umožnily přechod na pětiletý palivový cyklus. S tím, jak se zkracují pravidelné odstávky bloků, musí být obsah uranu 235 v palivu dále zvyšován, aby v reaktoru stále vydržely pět let. Toho má dosáhnout nové palivo s označením Gd-2M, které Dukovany používají od roku 2008.

Moderními technologiemi kontroly kvality je možno dosahovat ještě větší spolehlivosti paliva než bylo dříve zvykem. V případě zjištění netěsnosti některého palivového proutku, musí být celá kazeta vyjmuta z aktivní zóny a uzavřena do speciálního hermetického obalu, v němž je potom skladována. Reaktor musí být proto odstaven a každý den, kdy nevyrobí elektřinu, stojí jeho provozovatele miliony, takže na spolehlivost klade velký důraz. Například v Dukovanech byly zazname-

nány netěsnosti v řádu jednotek proutků z celkových milionů, které reaktory prošly za téměř 30 let jejich provozu, což je skvělým vysvědčením nejen pro výrobce a dodavatele firmu MSZ ve městě Elektrostal u Moskvy (dnes součást společnosti TVEL) dodávající palivo do JE Dukovany od jejího spuštění, ale i pro samotné pracovníky ČEZ, kteří jadernou elektrárnu provozují.

Pokračování vývoje a jeho přínosy v oblasti ekonomiky a spolehlivosti provozu paliva ukazují, že jaderné reaktory VVER-440 stále nejsou minulostí, ale i po několika desítkách let jejich provozu je možno dále zlepšovat efektivitu jejich provozu a představují dobrou perspektivu jak pro provozovatele, tak i dodavatele paliva.

Palivo pro vesmír

Zajímavé aplikace pro jadernou energetiku může znamenat i vesmírný jaderný pohon, který vyvíjí Rosatom ve spolupráci s ruskou Federální kosmickou agenturou Roskosmos. Malý vysokoteplotní plynem chlazený reaktor má poskytovat energii pro pohon, který bude schopen dopravit misi na Mars během dvou až čtyř měsíců, avšak klade velké nároky na použité materiály.

Projektováním reaktoru se zabývá vývojový ústav NIKIET patřící do Rosatomu a vývojem paliva společnost TVEL. Testy zkušebních palivových souborů probíhají od loňska v závodu MSZ, kde je vyráběno také palivo pro české jaderné elektrárny. Soubory pro vesmír jsou vyrobeny z oxidu uranu používaného pro klasické jaderné palivo, avšak s vyšším stupněm obohacení, aby reaktor mohl být kompaktnější. Základní konstrukční materiál představuje monokrystalická slitina žáruvzdorných kovů na bázi molybdenu.

Klasické reaktory pracují při teplotách přibližně o 1000 stupňů nižších, takže vývojáři hledají nové materiály, které by vydržely v takovém pracovním prostředí. Díky vesmírnému programu tak získáváme znalosti o nových materiálech a reaktorech, které by jednou mohly získat uplatnění i v pozemské jaderné energetice. ■