

Projekt českého vysokoteplotního jaderného reaktoru HeFASTo

Petr Vácha, Sebastian Nývlt, Roman Koryčanský

ÚJV Řež, Hlavní 130, 250 68 Husinec-Řež; petr.vacha@ujv.cz

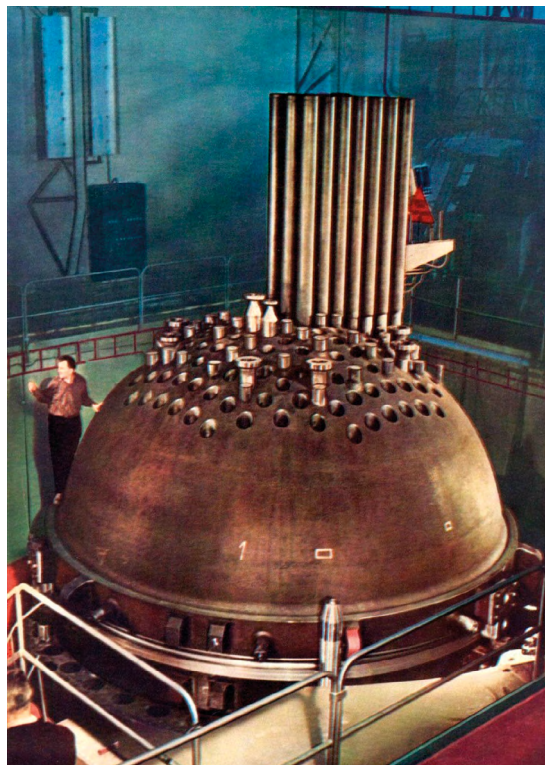
HeFASTo je český koncept rychlého jaderného reaktoru zaměřený na maximální univerzálnost využití produkovaného tepla a minimalizaci nově vznikajícího vyhořelého jaderného paliva.

Technologie rychlých jaderných reaktorů

Jaderná energetika zažila za necelých 80 let své dosavadní existence mnoho vzestupů i pádů. Prvotní nadšení z nového účinného a takřka neomezeného zdroje energie poměrně záhy vystřídalo vystřízlivění – známé světové zásoby uranu, klíčové suroviny pro výrobu jaderného paliva, rozhodně nebyly dostatečné k realizaci plánovaného masivního rozšíření této technologie. Nasazení tzv. „rychlých“ jaderných reaktorů, které jsou schopny jako vedlejší produkt svého provozování vytvářet jadernými reakcemi více nového štěpného materiálu, než sami spotřebují [1], se jevílo nevyhnutelným. Šedesátá léta 20. století se tak v jaderné energetice stala dekadou překotného vývoje technologie rychlého jaderného reaktoru. Důvodů, proč smělé plány na dominanci jaderných reaktorů na poli světové energetiky zůstaly nenaplněné, byla celá řada – od ekonomických a politických až po čistě technické.

Spolehlivý energetický jaderný reaktor představuje jedno z nejsložitějších a nekomplexnějších zařízení, které lidstvo ve své historii vytvořilo. Jeho úspěšný vývoj, uvedení do provozu, i samotný dlouhodobý provoz vyžadují precizní spolupráci stovek špičkových expertů z mnoha technických odvětví. Vyvinout od základu vlastní jaderný reaktor je tak výsada technologicky nejvyspělejších zemí světa. Navíc, zatímco vývoj reaktoru pracujícího s tepelným spektrem neutronů by bylo možné přirovnat například k náročnému prvovýstupu třítisícovky v Alpách, vývoj rychlého reaktoru by se pak srovnával se zdoláním himálajské osmitisícovky. Všechny technologické výzvy, které je třeba řešit při vývoji a stavbě jaderného reaktoru, jsou u jeho rychlé verze zkrátka mnohonásobně náročnější.

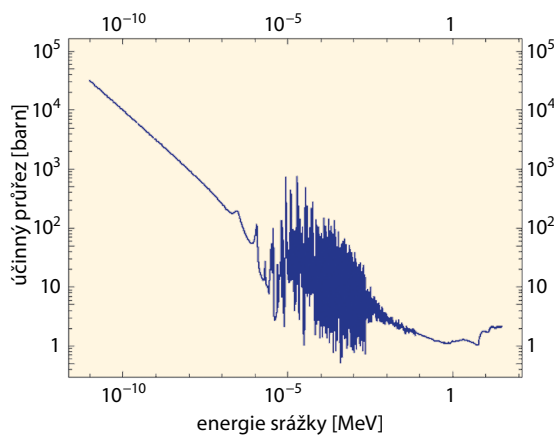
Česká republika a především bývalé Československo se k těmto zemím bezesporu řadí a řadí, jaderný výzkum a vývoj i průmysl mají na našem území dlouhou tradici a ve světě dobrou pověst. Vrcholem v jistém smyslu byl úspěšný vývoj (ale méně úspěšný provoz zakončený poměrně závažnou havárií) vlastního plynem chlazeného reaktoru A1 v Jaslovských Bohunicích



Obr. 1 Vrchní víko reaktorové nádoby reaktoru KS-150 v elektrárně A1 v Jaslovských Bohunicích. [4]

(obr. 1) [2]. Před rokem 1968 zde s podporou Sovětského svazu existoval i samostatný program na vývoj rychlého, sodíkem chlazeného reaktoru, který měl být spojen i s plánovaným tuzemským závodem na obohacování, výrobu a přepracování jaderného paliva – ten byl však po srpnové invazi ukončen a veškerá práce českých vědců a inženýrů v oblasti rychlých reaktorů byla následně využívána výhradně v SSSR [3].

Rychlé jaderné reaktory rádi srovnáváme s nadzvukovými dopravními letouny pro přepravu pasažérů. Technologie pro jejich realizaci existovaly už před desítkami let, vzniklo i několik prototypů, ty nejlépejší do-



Obr. 2 Závislost účinného průřezu štěpení ^{235}U na energii neutronu. (Pozn. Jednotka barn je rovna 10^{-28} m^2). Zdroj: ENDF open data

sáhly omezeného komerčního nasazení. Potom však přišlo vystřízlivění. To, že daná technologie je realizovatelná, totiž automaticky neznamená, že je možné ji masově nasadit do provozu! Stejný osud tedy do konce století potkal jak nadzvukové dopravní letouny, tak rychlé jaderné reaktory – postupně se z nich stala spíše senzace, ukázka technologické vyspělosti, která však byla v socioekonomických podmínkách dané doby dlouhodobě neudržitelná. Nadzvukové letouny se vrátily do oblasti vojenství, rychlé reaktory až na několik málo výjimek do oblasti vědy a výzkumu.

V posledních letech se však situace opět mění. Zatímco nesporné teoretické výhody rychlých reaktorů ve formě lepšího využití paliva, minimalizace odpadů a vysoké účinnosti zůstávají stále stejně lákavé, technologické překážky sedmdesátých a osmdesátých let minulého století jsou díky pokroku v materiálech a technologiích z většími minulostí.

Princip fungování rychlých reaktorů

Pokud se zaměříme na fyzikální princip fungování, rychlé reaktory se od „klasických“ (tepelných) v mnohém liší. Tepelný reaktor využívá takzvaný moderátor – materiál obsahující lehká jádra, která při srážkách se srovnatelně hmotnými neutrony efektivně odebírají neutronům kinetickou energii (moderují je), a to až na energii tepelného pohybu (odsud i sám název *tepelný reaktor*). Toto snižování kinetické energie je žádoucí, pravděpodobnost způsobení dalšího štěpení je totiž silně závislá na energii neutronu (viz obr. 2) a pro tepelné neutrony je více než stokrát větší než pro „rychlé“ neutrony o energii, při které vznikají přímo ze štěpení. Při tomto „zpomalování“ se v reaktorech snižuje energie neutronu zhruba *stomilionkrát*.

V rychlém reaktoru ovšem záměrně žádný moderátor není a je tak potřeba problém nízké pravděpodobnosti štěpení něčím kompenzovat. Tato „daň“ se platí ve formě alespoň čtyřikrát vyššího obohacení jaderného paliva a také nutnosti vyrobit aktivní zónu co nejvíce fyzicky kompaktní pro snížení úniků neutronů mimo prostor aktivní zóny.

Jak to z předešlého textu vypadá, rychlé reaktory se vyznačují řadou komplikací a technologických výzev. Jaké jsou tedy jejich výhody a proč se stále jedná o velmi žádanou technologii?

V prvé řadě si musíme ujasnit, co si od reaktorů budoucnosti slibujeme. Mezinárodní iniciativa GIF, ustavená k posouzení reaktorových konceptů budoucnosti,

se snažila tuto otázku zodpovědět a došla k závěru, že jaderné reaktory budoucnosti mají být bezpečné, udržitelné a ekonomicky produkovat velké množství elektrické energie a tepla [6]. A právě díky otázce udržitelnosti se rychlé reaktory dostávají do popředí na úkor současných tepelných reaktorů. Oba typy reaktorových systémů sice lze považovat za udržitelné z pohledu dopadu jejich provozu na životní prostředí, ale už ne z pohledu nakládání s jaderným palivem. Reaktor pracující na tepelných energiích je poměrně neefektivní. Z pohledu využití potenciálu paliva v něm zůstává – i po pěti letech provozu – nevyužito přes 90 % potenciálně využitelné energie [1]. Tepelný reaktor však takové palivo už dále použít nedokáže a je potřeba použité palivo nahradit čerstvým.

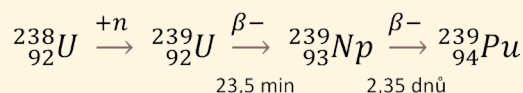
V případě rychlého reaktoru je však možnost využití jaderného paliva mnohem lepší, dokonce se dá hovořit o tom, že v takovém reaktoru dochází k „množení“ paliva – tedy víc paliva vzniká, než zaniká. Vzhledem k vysokému obohacení a velkému přebytku vznikajících neutronů se jich také velké množství (mnohem vyšší než v tepelném reaktoru) zachytí na izotopu uranu 238, kterého je v jaderném palivu, jakož i v uranové rudě naprostá většina (v přírodní rudě přes 99 %, v palivu běžně okolo 95 %). Reakce, která k vytvoření nového štěpného materiálu vede, je zobrazena na obr. 3.

Tento fakt je potřeba ještě dát do souvislosti s množstvím uranu na Zemi. Učinit dobrý odhad světových zásob uranu není jednoduché, stále dochází k nalézání nových ložisek a mnoho již nalezených ložisek umožňuje těžbu za vynaložení vyšších nákladů, než je při současných tržních cenách uranu únosné. Obecně panuje názor, že současně provozovaným tepelným reaktorům by uran vydržel několik set let [6]. Předpoklad konstantní spotřeby je však lichý, když vše dáme do kontrastu se současnou globální snahou o snížení dopadů na životní prostředí, které volají po omezení výroby elektřiny a tepla z fosilních zdrojů. Nasazení rychlých reaktorů a množení paliva se tak v budoucnosti stane nevyhnutelnou nutností, pokud má jaderná energetika zůstat udržitelnou.

Obecně je známo, že ve speciálně navržených reaktorech je možné k množení štěpného materiálu používat i thorium, kterého je na Zemi odhadem řádově stejné množství jako uranu (zde jsou světové zásoby ještě méně prozkoumané) [7]. Je však třeba doplnit, že naprostá většina současně provozovaných reaktorů není na využití thoriového paliva uzpůsobena.

Štěpná reakce v tepelném a rychlém reaktoru

Dá se říci, že rychlý reaktor je rychlý ještě v jiném smyslu tohoto slova – a to z pohledu řízení štěpné reakce. Tepelné i rychlé reaktory jsou řízeny s pomocí takzvaných zpomalených neutronů, které se uvolňují až s určitou prodlevou po samotném aktu štěpení, a jen díky jejich příspěvku je možné v reaktoru udržovat konstantní výkon. Jedna generace neutronů vznikajících okamžitě ze štěpení totiž trvá řádově 10^{-5} až 10^{-6} s [1] a vzhledem



Obr. 3 Jaderné reakce vedoucí k množení štěpného materiálu zachytem neutronu na ^{238}U .



Obr. 4 Rychlý reaktor chlazený tekutým sodíkem. Zdroj: *Wikipedia*

k tomu, že ze štěpení uranu vznikají dva nebo tři neutrony a pro udržení konstantního výkonu je nutné zajistit, aby se dalšího štěpení účastnil právě jeden z nich, bylo by bez existence zpožděných neutronů nemožné řetězovou reakci udržet řízenou. V přeneseném slova smyslu to znamená, že zpožděné neutrony fungují jako takový setrvačnický jaderného reaktoru. Jistou komplikací však je, že v rychlém reaktoru je zpožděných neutronů výrazně menší množství – máme tedy malý setrvačnický, a na každou změnu rychlý reaktor reaguje výrazně rychleji než reaktor tepelný. Jedná se tak o další z řady drobných komplikací, které dělají provoz rychlého reaktoru řádově náročnějším než v případě tepelného.

Z hlediska bezpečnosti provozu je nutné zmínit ještě další aspekt provozu jaderných reaktorů a další zdroj rozdílu mezi tepelnými a rychlými reaktory. Mimo uměle vyvolané změny výkonu jaderného reaktoru (zasunutí nebo vysunutí regulačních tyčí, změnu koncentrace kyseliny borité ve vodou chlazených reaktorech apod.) působí i přírodní jevy, které fungují jako výkonová zpětná vazba. Pro příklad můžeme uvést třeba hustotu samotného paliva – když vzroste výkon za současného zachování průtoku chladiva reaktorem, dojde logicky ke zvýšení teploty paliva. To má za následek, kvůli tepelné roztažnosti materiálů, zvýšení objemu palivových elementů, což při jejich konstantní hmotnosti znamená snížení hustoty paliva. Snížení hustoty paliva však logicky vede k tomu, že v daném objemu se nachází méně atomů štěpného materiálu než předtím, a pravděpodobnost, že dojde ke štěpení, klesne. A tak celá tato kaskáda jeví se jako negativní – zvýšení výkonu vede v konečném důsledku k jeho opětovnému snížení. Takovýchto zpětnovazebních mechanismů existuje ve fyzice jaderných reaktorů celá řada. Negativní výkonové zpětné vazby jsou v jaderných reaktorech samozřejmě žádané, nicméně nelze prakticky dosáhnout toho, aby každá jednotlivá zpětná vazba byla za všech provozních a havarijních stavů negativní. Striktní požadavek na jakýkoliv jaderný reaktor v provozu je však kladen na celkový záporný součet efektů všech zpětných vazeb v každém stavu, který může teoreticky nastat.

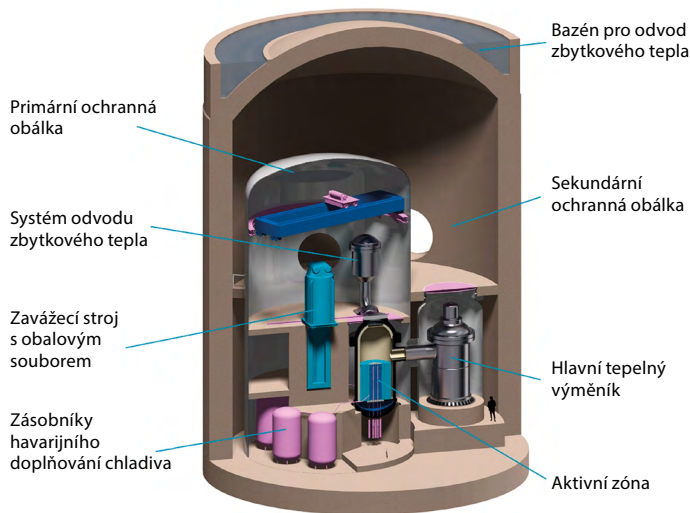
Co se týče rozdílu zpětných vazeb mezi tepelnými a rychlými reaktory, kvalitativně se příliš neliší, s výjimkou zpětných vazeb spojených s (ne)přítomností

moderátoru. Kvantitativně je součet efektů zpětných vazeb v tepelných reaktorech obecně zápornější a jejich odezva na havarijní situace je tedy příznivější. Havárie spojené se změnami reaktivity (jako je například nechtěné vytažení regulačních tyčí, selhání odstavení reaktoru v havarijních podmínkách apod.) představují v rychlých reaktorech nejzávažnější druh havárií, které mohou velmi rychle vést až k těžké havárii, a jejich předcházení a zvládnutí je třeba věnovat velkou pozornost již ve fázi koncepčního návrhu.

Typy rychlých reaktorů

Konceptů rychlých reaktorů v historii vznikla celá řada, nejvýznamnějším rozdílem mezi nimi je použité chladivo primárního okruhu, na němž v konečném důsledku závisí velká část konkrétního designu. Vzhledem k tomu, aby bylo možné vůbec uvažovat o provozu rychlého reaktoru, nesmí být jeho chladivo zároveň moderátorem, ani nesmí ve zvýšené míře pohlcovat neutrony – proto je výběr prakticky použitelných látek poměrně úzký. Historicky se nejvíce prosadily roztažené kovy, konkrétně sodík (příklad sodíkem chlazeného reaktoru je na obr. 4) a olovo, nicméně existují i koncepty rychlých reaktorů chlazených různými plyny (helium, oxid uhličitý) nebo tekutými solemi [5].

Rychlé reaktory využívající tekuté kovy s sebou přinášejí další řadu technologických výzev. První z nich je nutnost udržovat chladivo v tekutém stavu, k čemuž bývá potrubí vybaveno systémem elektrického ohřevu, který brání zatuhnutí, když není reaktor v provozu. Další komplikací je fakt, že tekuté kovy nejsou průhledné, a tedy každá manipulace s palivovými články „pod hladinou“ neumožňuje vizuální kontrolu a musí spoléhat na přesnou práci manipulační techniky. Použití olova komplikuje jeho vysoká hustota, reaktor je potom velmi hmotný, náchylný na seismické události a dochází ke kuriozním situacím, kdy například palivové soubory s tradičním palivem ve formě oxidu uraničitého mají tendenci v chladivu plavat, takže je třeba je ukotvit zespolu. U rychlých reaktorů chlazených sodíkem pak hrozí riziko výbuchů při kontaktu sodíku s vodou nebo vzdušnou vlhkostí (například při případné netěsnosti v tepelném výměníku). Rychlé reaktory chlazené plynem zase trpí nízkou tepelnou setrvačností chladiva, a tudíž jsou velmi náchylné k nehodám v důsledku dysbalance mezi vývinem a odvodem tepla



Obr. 5 Řez kompletní jadernou částí reaktoru HeFASTo.

v aktivní zóně, a konečně reaktory chlazené tekutými solemi trpí výrazně zvýšenou korozí materiálů. Žádné ideální chladivo tedy zatím nebylo nalezeno, sodík se nejvíce rozšířil proto, že (dokud zůstane uzavřen v systému bez přístupu vzduchu a vody) disponuje kladnými vlastnosti ve všech výše zmiňovaných kategoriích.

Koncept reaktoru HeFASTo

HeFASTo je český koncept rychlého jaderného reaktoru zaměřený na maximální univerzálnost využití produkovaného tepla a minimalizaci nově vznikajícího vyhořelého jaderného paliva. Vyvíjí ho od roku 2021 společnost ÚJV Řež, a. s., [8] a jedná se svým způsobem o dosavadní vyvrcholení výzkumného a vývojového programu reaktorů typu GFR (Gas-cooled Fast Reactor, rychlý reaktor chlazený plynem), který v ČR se státní i evropskou podporou probíhá již více než deset let a na kterém se v současné době podílí více než 20 soukromých společností, včetně průmyslových podniků, univerzit i několika ústavů Akademie věd [9].

Technologie GFR je exotická i na poměry rychlých reaktorů a její vývoj znamená překonávání řady překážek, které u jiných typů jaderných reaktorů vůbec neexistují. Na druhou stranu její teoretický potenciál je bezpochyby největší – kombinuje v sobě výhody vysokoteplotního jaderného reaktoru s možnostmi uzavření palivového cyklu typickými pro rychlé reaktory. Z tohoto důvodu je aktivně zkoumána od 60. let dvacátého století [10, 11]. Koncepty GFR vznikaly v Evropě, Sovětském svazu, USA i Japonsku. Vývoj každého z nich se však zasekl na otázce materiálů – najít takový, který vydrží spolehlivě pracovat ve velmi náročných podmínkách (vysoká teplota a tlak, vibrace) po dobu desítek let, představuje výzvu. Když se však přidá navíc silná radiace přímo v aktivní zóně, jedná se o problém na hraně možností dnešního materiálového inženýrství a před 50 lety o problém neřešitelný. Tento fakt, umocněný úspěšným otestováním sodíkem chlazených jaderných reaktorů, vedl postupně takřka k zániku zájmu o technologii GFR. Ten byl obnoven až po roce 2000, kdy mezinárodní organizace GIF (*Generation IV International Forum* – Mezinárodní fórum pro 4. generaci) vybrala z mnoha desítek konceptů šest nejperspektivnějších pro 21. století a mezi nimi i GFR [12]. Vývoj byl obnoven v Evropě (převážně Francii), USA i Japonsku. V současnosti je aktivně vyvíjen demonstrační reaktor ALLEGRO v Evropě (vedoucí orga-

nizací vývoje tohoto konceptu je ÚJV Řež), FMR v USA a koncept HeFASTo, jehož popis je předmětem tohoto článku (celkový pohled je na obr. 5).

Proč GFR

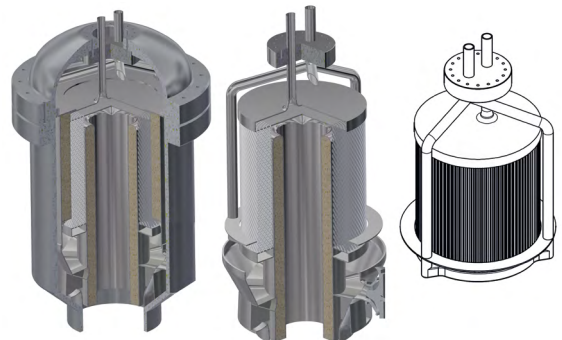
Na první pohled by se mohlo zdát zvláštní, proč zrovna Česká republika s omezenou velikostí trhu a nulovými zkušenostmi s výstavbou a provozem rychlých reaktorů usiluje o vývoj nejsložitější technologie rychlých reaktorů. Při bližším pohledu se však ukáže, že mnoho jiných možností, jak mít alespoň teoretickou šanci v současném světě prorazit na poli vývoje nových jaderných technologií, neexistuje. Trh s lehkovodními reaktory ovládají společnosti, které mají s vývojem a výstavbou svých konceptů desítky let zkušeností, a jedná se většinou o globální společnosti s možnostmi dalece přesahujícími kohokoliv v tuzemsku. Tyto společnosti dnes patří mezi světové lídry i ve vývoji malých modulárních reaktorů. Možnost prorazit na tento trh s vlastními technologiemi je tak velice omezená, a to i v případě, že daný hypotetický koncept přináší zásadní inovace.

Další přidanou hodnotou volby technologie GFR je i omezené množství států, které se jejímu vývoji věnují. Na jednu stranu tento fakt zpomaluje celý proces vývoje, na druhou dává možnost českým vědcům stát na špičce vývoje jedné z perspektivních technologií a otevírá možnosti spolupráce, které by jinak byly velmi složitě realizovatelné. I z pohledu čistě vědeckého a nekomerčního se tak jedná o dobrou volbu.

Základní filozofie designu

Jak je vidět z nekonečně protahovaných projektů výstavby velkých reaktorů GEN III v Evropě i jinde ve světě, historický přístup, kdy je každá elektrárna do jisté míry prototypem, většina systémů se staví, svařuje a spojuje dohromady až na místě stavby, je již nepřekonatelně zastaralá a v současné době neobstojí. Uvědomují si to i výrobci jaderných zařízení a celkový trend směřuje k modularizaci – většina systémů a komponent je vyráběna v kontrolovaném prostředí tovární haly, projekt elektrárny je v maximální míře unifikovaný a na místě stavby jsou po přípravě betonových struktur už pouze rychle umístěny a k sobě spojeny předpřipravené moduly.

Tato filozofie byla použita i při návrhu konceptu reaktoru HeFASTo. Všechny hlavní systémy i jejich umístění jsou navrženy tak, aby je bylo možné nejen snadno nainstalovat, ale i provádět inspekci a v případě nutnosti vyměnit vadný modul bez nutnosti složité demontáže velkých částí zařízení. Příklad ve formě tepelného výměníku systému pro odvod zbytkového tepla je zobrazen níže na obr. 6.



Obr. 6 Vysoce modulární výměník pro odvod zbytkového tepla.

parametr	hodnota	jednotka
tepelný výkon	200	MW _t
vstupní/výstupní teplota	450/900	°C
primární chladivo	He	–
primární tlak	7,5	MPa
sekundární chladivo	N ₂ + He	–
sekundární tlak	8,0	MPa
typ paliva	UC nebo (U,Pu)C	–
obohacení paliva	UC – 19,5 (U,Pu) C – 30	%
doba provozu bez odstávky	5	let
koeficient využití	>95	%

Obr. 7 Hlavní parametry reaktoru HeFASTo.

Druhou úroveň modularizace v konceptu HeFASTo představuje sekundární okruh. Většina konceptů GFR počítá s přímým cyklem, tedy s plynovou turbínou přímo v primárním okruhu, a dalším využitím odpadního tepla o stále poměrně vysokých parametrech. V takovém uspořádání však není jednoduše možné využívat vznikající teplo přímo například pro průmyslové aplikace. HeFASTo oproti tomu počítá s hlavním tepelným výměníkem plyn/plyn, který umožní teplo dále volně využívat. Současný koncept obsahuje tři moduly, které je možné kombinovat:

- modul pro výrobu elektřiny (kombinovaný plynový a parní cyklus)
- modul pro výrobu vodíku
- modul pro přímé vyvedení tepla a jeho další využití

Spolu s možností využívat přepracované jaderné palivo tak dané řešení poskytuje maximální možnou míru flexibility využití výkonu.

Technická data

Reaktor HeFASTo je smyčkového typu, s jednou hlavní smyčkou pro odvod tepla, s krátkým koaxiálním potrubím (horká větev je uvnitř, studená větev nese většinu přetlaku) a dvěma dedikovanými smyčkami systému odvodu zbytkového tepla (více v odstavci Bezpečnostní filozofie). Nejdůležitější parametry primárního okruhu jsou shrnuty v tabulce na obr. 7.

Celý primární okruh je navržen s ohledem na trvanlivost materiálů v náročných podmínkách, výstup z aktivní zóny je uzavřen do vestavby opatřené tepelným stíněním, takže stejně jako pro hlavní potrubí nejsou nikde namáhány konstrukční součásti zároveň vysokou teplotou a tlakem, což umožňuje použití pro reaktorovou nádobu, hlavní potrubí i většinu výměníku standardní reaktorové oceli a značně tak snížit náročnost výroby i finanční nákladnost.

V souladu s moderními trendy jsou navrženy dvě ochranné obálky reaktoru. Primární okruh se nachází uvnitř primární ocelové obálky a ta se spolu s dalšími systémy nachází uvnitř betonového kontejnmentu, sloužícího jako ochrana před vnějšími vlivy. Řez kompletní sestavou je na obr. 5.

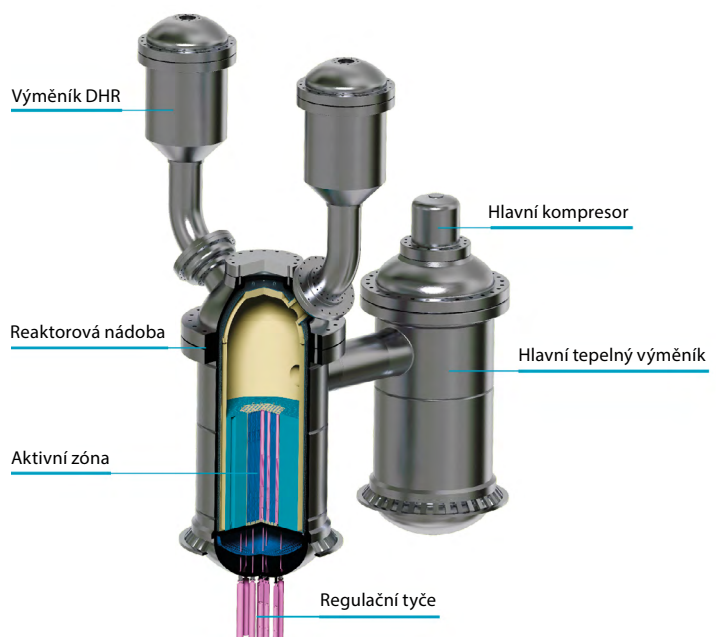
Reaktor je umístěn částečně pod zemí, nadzemní část má výšku 18 m a průměr 30 m, svou velikostí tak odpovídá většímu činžovnímu domu, i fyzicky se tak jedná spíše o malý reaktor. Na obr. 5 je pro zachycení měřítky ve spodní pravé části i silueta člověka. Detail primárního okruhu je na obr. 8.

Aktivní zóna

Největší výzvu v návrhu jakéhokoliv GFR představuje aktivní zóna. Oproti návrhům z 60. a 70. let 20. století navíc vzrostla jak cílová výstupní teplota chladiva, tak požadavky na bezpečnost. Z těchto důvodů je masivní použití kovových materiálů, běžné ve všech dosud provozovaných reaktorech, nereálné, a to nejen v případě povlakových trubek paliva, ale i v ostatních konstrukčních částech reaktoru aktivní zóny. Do vývoje kompozitních materiálů jsou v dnešní době investovány velké prostředky nejen pro účely pokročilých konceptů jaderných reaktorů, ale i pro zlepšení provozních parametrů a zvýšení bezpečnosti lehkovodních reaktorů [13].

Další otázkou k řešení je u plynem chlazených reaktorů výměna paliva. Reaktory s kapalnými chladivy (ať už se jedná o vodu, roztavené kovy, či soli) využívají tepelné kapacity chladiva k překládce paliva s plně otevřenou reaktorovou nádobou, tedy při atmosférickém tlaku. V plynem chlazeném reaktoru by však bylo nutné čekat neúměrně dlouho (řádově měsíce), než by zbytkový výkon paliva dostatečně poklesl, proto se palivo vyměňuje v natlakované reaktorové nádobě pomocí speciálních otvorů v jejím vrchním víku. Tento koncept lze využít pro tepelné reaktory HTR (*High-Temperature Reactor*), kde palivové elementy tvoří relativně velké bloky grafitu s malou výkonovou hustotou. Pro GFR, kde je výkonová hustota aktivní zóny přibližně desetinásobná a jednotlivé palivové elementy mnohem menší, je třeba využít sofistikovanějších metod využívajících robotická ramena umístěná dovnitř reaktorové nádoby apod.

Koncept aktivní zóny HeFASTo jde však ještě o krok dále. Vzhledem ke své kompaktnosti a použitým kompozitním materiálům na bázi karbidu křemíku s ní bude moct být zacházeno vcelku a nebude nutné pracovat s jednotlivými palivovými kazetami. Aktivní zóna je do reaktorové nádoby vkládána i z ní vyjímána včetně regulačních kazet speciálním zavazacím strojem, který se připojí na otvor v horním víku reaktorové nádoby a aktivní zónu umístí do/vyjme ze speciálního skladovacího/přepravního kontejneru, který je následně dochlazován v šachtě uvnitř kontejneru



Obr. 8 Primární okruh reaktoru HeFASTo

mentu, než je možné ho transportovat mimo prostor elektrárny. Aktivní zóna uzavřená ve speciálním koši je na obr. 9.

Tento koncept přináší několik výrazných pozitiv – například zásadně omezuje manipulaci s palivem při odstávce, a to ve formě ušetřeného času i počtu úkonů, a tím snižuje riziko havárie během manipulace s palivem. Nesporným pozitivem je i vysoká ochrana proti proliferaci jaderného materiálu – provozovatel elektrárny se nikdy fyzicky nesetká s palivem ve formě vhodné ke zneužití.

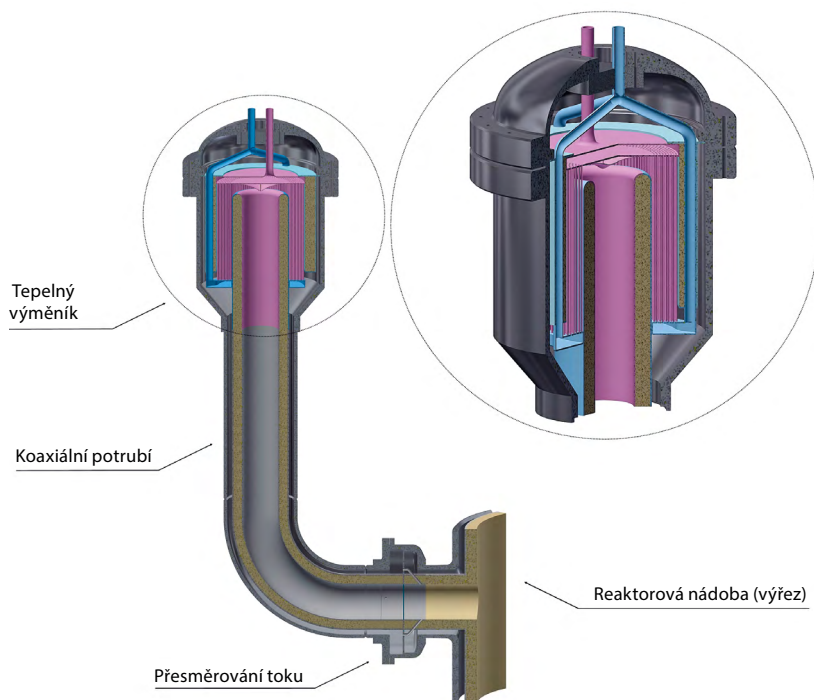
Bezpečnostní filozofie

Velká pozornost byla při návrhu konceptu HeFASTo samozřejmě věnována i bezpečnosti provozu. Moderním trendem jsou pasivní bezpečnostní systémy – tedy takové, které fungují pouze působením přírodních zákonů (gravitace, rozdíl tlaků apod.) a nespolehají na aktivní spuštění ani na aktivní prvky typu čerpadel a elektrických pohonů.

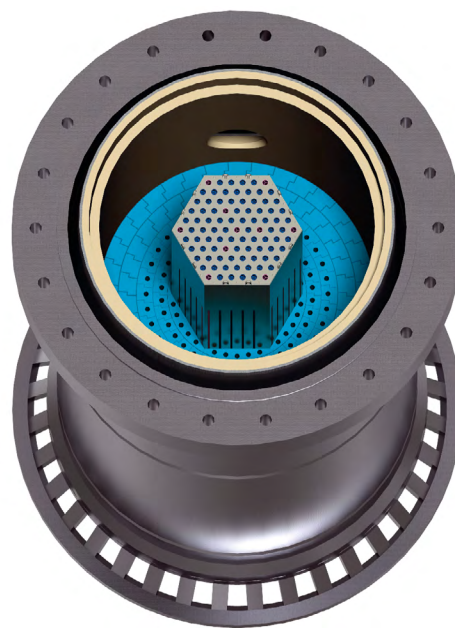
Bezpečnostní koncept HeFASTo je plně založen na třech pasivních systémech:

- systému odvodu zbytkového tepla
- systému havarijního doplňování chladiva
- plynotěsné primární obálce

Smyčky systému odvodu zbytkového tepla fungují na principu přirozené konvekce, tedy jevu, při kterém má horké médium přirozeně tendenci stoupat vzhůru, a chladné naopak klesat. Navíc je díky unikátnímu patentovanému řešení [14] (obr. 10) neustále udržován v pohotovosti i při provozu reaktoru, čímž celý systém získal výrazně zvýšenou spolehlivost. Systém havarijního doplňování chladiva je při provozu reaktoru oddělen pouze tržnou membránou, která je nastavena na určitý přetlak. V případě, že tlak v primárním okruhu prudce poklesne v důsledku trhliny, membrána se roztrhne a havarijní chladivo začne proudit do aktivní zóny, čímž jednak přímo přispívá k jejímu chlazení, a dále také k rychlejšímu nastavení oběhu skrze smyčky odvodu zbytkového tepla. Třetím systémem je samotná



Obr. 10 Koncept pasivního systému odvodu zbytkového tepla se zvýšenou spolehlivostí.



Obr. 9 Aktivní zóna ve speciálním koši držícím ji v celku.

primární ocelová obálka primárního okruhu, která je navržena jako plynotěsná, a v případě havárie s únikem chladiva (LOCA) zajistí, že zbytkový tlak v primárním okruhu neklesne až na atmosférický, ale udrží se přibližně na úrovni 5 bar. Při zvýšeném tlaku má chladivo mnohem vyšší hustotu a tím roste i jeho schopnost odvádět zbytkové teplo.

Při použití těchto tří systémů je prakticky eliminováno riziko těžké havárie s rozsáhlým tavením/destrukcí aktivní zóny, navíc fakt, že se jedná o systémy plně pasivní, eliminuje i riziko spojené s lidským faktorem – k jejich spuštění není třeba žádného zásahu operátora.

Potenciál uplatnění v ČR a Evropě

Svémi parametry je HeFASTo stejně jako jakýkoliv jiný rychlý nebo vysokoteplotní reaktor nevyhnutelně poměrně komplexní zařízení. Jeho cílem nikdy nebude konkurovat lehkovodním malým modulárním reaktorům zaměřeným výhradně na výrobu elektřiny nebo tepla pro vytápění, protože by to bylo nejen ekonomicky nevýhodné, ale hlavně ani zdaleka by to nevyužilo potenciál, který v sobě skrývá.

Primárním cílem musí být zúžitkování uzavřeného palivového cyklu, tedy zpracování vyhořelého paliva a produkce vlastního nového štěpného materiálu pomocí množení. Bez využití těchto výhod postrádá provoz rychlého reaktoru smysl a může být nahrazen vysokoteplotním grafitem moderovaným. V kombinaci s možností dodávat kombinaci elektřiny a vysokopotenciálního tepla tak HeFASTo jeho vlastnosti předurčují k nasazení ve střednědobém horizontu (20–30 let) v zemích, které:

- už jaderné reaktory provozují a potřebují vyřešit otázku vyhořelého jaderného paliva;
- mají rozvinutý průmysl vyžadující stabilní dodávky elektřiny a vysokopotenciálního tepla (ostatně i samotná velikost jednotky byla zvolena na základě požadavků průmyslu na dodávky tepla pro chemickou výrobu);
- mají připravený plán na přechod na vodíkovou energetiku/mobilitu.

Mezi tyto země patří i Česká republika, ze sousedních Polsko, které v současnosti sice jadernou energetiku nemá, ale plánuje ji v brzké budoucnosti, případně i Německo, pokud přehodnotí svůj postoj od „jádra“ odstoupit. HeFASTo tak potenciálně má sice poměrně úzkoprofilový, nicméně jednoznačně existující trh nejen ve střední Evropě.

Reference

- [1] J. R. Lamarsh, A. J. Baratta: *Introduction to Nuclear Engineering*. 3. vyd. Prentice-Hall, New Jersey 2001. ISBN 0-201-82498-1.
- [2] J. Kuruc, L. Mátel: *Thirtieth anniversary of reactor accident in A-1 Nuclear Power Plant Jaslovské Bohunice*. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/059/38059373.pdf
- [3] Z. Hrbek, J. Kott, V. Chlumsky: *Research and development of sodium-cooled fast power reactors*. Skoda Review 1982. ISSN 0374-4523.
- [4] J. Bečvář a kol.: *Jaderné elektrárny*. SNTL, Praha 1978.
- [5] U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum: *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. Ten Nations Preparing Today for Tomorrow's Energy Needs*. December 2002.
- [6] World Uranium Mining – World Nuclear Association. *World Uranium Mining Production* [online]. [cit. 9.5.2022]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>
- [7] Thorium – World Nuclear Association. *Thorium* [online]. [cit. 9.5.2022]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium.aspx>
- [8] ÚJV Řež, a.s.: *ÚJV Řež představila HeFASTo — druhý malý reaktor české provenience a první svého druhu v Evropě*. Tisková zpráva, 27. 5. 2021.
- [9] P. Vácha a kol.: *GFR Research and Development Programme in V4 countries. Proceeding of the IAEA Fast Reactor 22 conference*, paper no. 304, 2022.
- [10] V. B. Nestranenko et al.: *Problems of creating fuel elements for fast gas-cooled reactors working on N2O4-dissociating coolant. Proceedings of the IAEA Specialists' Meeting on Gas-Cooled Reactor Fuel Development and Spent Fuel Treatment*, 1983.
- [11] T. Mochizuki et al.: *Design study of He gas-cooled fast breeder reactor. Proceedings of the IAEA Study Group Meeting on Gas-Cooled Fast Reactors*, 1972.
- [12] U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum: *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. Ten Nations Preparing Today for Tomorrow's Energy Needs*. Prosinec 2002.
- [13] U.S. DOE Nuclear Technology Research and Development Advanced Fuels Campaign: *Handbook of LWR SiC/SiC Cladding Properties*. Revision 1, 2018.
- [14] P. Hájek: *Pasivní systém se zvýšenou spolehlivostí pro odvod zbytkového tepla z jaderného reaktoru a způsob na něm prováděný*. Patent č. 2020-656, 2020.



**Nakladatelství MFF UK
MatfyzPress**

Jiří Podolský, Pavel Cejnar,
Stanislav Daniš, Jan Valenta

Einstein opět v Praze fyzika v seriálu Génius

170 × 245 mm
176 barevných stran
Pevná vazba V8
ISBN 978-80-7378-445-4



**Edice popularizace
MatfyzPress**

e-shop: www.matfyzpress.cz

prodejna nakladatelství - budova MFF UK,
Sokolovská 83, Praha 8

