

PERSPEKTIVA MALÉHO MODULÁRNÍHO REAKTORU CHLAZENÉHO SUPERKRITICKOU VODOU

PERSPECTIVE OF A SMALL MODULAR REACTOR COOLED BY SUPERCRITICAL WATER

Monika Šípová a Daniela Marušáková

Centrum Výzkumu Řež, s.r.o., Hlavní 130, Řež, 250 68 Husinec

Abstrakt

Poptávka po energii neustále roste, proto se hledají zdroje, které by ji pokryly i s přihlédnutím na minimální stopu pro životní prostředí. Jednou z možností jsou malé modulární reaktory s maximálním výkonem do 300 MWe. Nastavení požadavků na malý modulární reaktor chlazený superkritickou vodou (SCW-SMR) je hlavním cílem mezinárodního projektu ECC-SMART, na jehož řešení se podílí nejen země Evropské unie, ale také zástupci z Kanady a Číny. Jedním z klíčových úkolů je najít vhodný materiál pro pokrytí paliva, které je v rámci navrhovaného konceptu vystaveno nejnáročnějším provozním podmínkám superkritické vody. Příspěvek bude prezentovat první výsledky a představí výhody a otevřené otázky spojené s budoucností SCW-SMR.

Abstract

The energy demand is constantly growing. Therefore, resources are being sought that would cover it, even taking into account the minimal footprint for the environment. One option is small modular reactors with a maximum output of up to 300 MWe. Setting the requirements for a small modular reactor cooled by supercritical water (SCW-SMR) is the primary goal of the international project ECC-SMART, the solution of which involves not only the countries of the European Union, but also representatives from Canada and China. One of the critical tasks is to find a suitable material for covering the fuel, which is exposed to the most demanding operating conditions of supercritical water within the proposed concept. The paper will present the first results and the advantages and open questions associated with the future of SCW-SMR.

Úvod

Malé modulární reaktory (Small Modular Reactors, SMRs) jsou obecně definovány jako reaktory do výkonu 300 MWe¹. Podle mezinárodní agentury pro atomovou energii (Atomic Energy Agency, IAEA) existuje na 70 konceptů SMR. Nicméně tyto mohou používat různé druhy chladiva a paliv, a liší se i úrovní připravenosti technologie, úrovní připravenosti pro licencování i mírou modularity. Zároveň asi 50 % zmíněných a vyvíjených konceptů spadá do kategorie reaktorů IV. Generace [1], kam patří i malý modulární reaktor chlazený superkritickou vodou, jehož vývoj, a především nastavení požadavků na něj zajišťuje projekt ECC-SMART [2].

Myšlenka využití superkritické vody, resp. páry sahá až do 50. let minulého století. Tlakovodní reaktor s uzavřenou smyčkou primárního okruhu při superkritickém tlaku byl navržen již v roce 1966 [3]. Vzhledem k omezeným výpočetním možnostem v té době, byly tyto myšlenky a plány na čas utlumeny. Lze říci, že renesanci zažívá myšlenka použití superkritické vody pro jaderné technologie na přelomu tisíciletí, kdy je v rámci Evropy rozvíjena především v Německu. Díky podpoře EU tak vznikl projekt HPLWR, HPLWR Phase2 a FQT-SCW [4]. Dalším podpořeným projektem v řadě je zmíněný ECC-SMART. Projekt je rozdělen na 4 hlavní oblasti

¹ Konstrukce s výstupním výkonem pod 10 MWe jsou označovány jako mikro-modulární reaktory – micro modular reactors (MMRs).

se zaměřením na (1) materiálové testování, (2) termo-hydrauliku a bezpečnost, (3) neutronovou fyziku a (4) legislativu.

Cíle a kritéria návrhu SCW-SMR

Základní požadavky na SCW-SMR vycházejí z požadavků na IV. generaci jaderných reaktorů. Jedním z cílů je dosažení efektivity přeměny energie kolem 44 % [5]. Dalším cílem je dosažení nižších provozních nákladů v porovnání s technologiemi na bázi PWR, což by mělo být dáno právě vyšší účinností a zjednodušením technologie, kdy je uvažován jen primární okruh apod. [4]. Vyšší entalpie páry by mohla umožnit přímý, jednorázový parní cyklus, takže by nebyly potřeba ani parní generátory, ani parní separátory a sušičky, a dokonce by bylo možné vynechat čerpadla primárního chladiva. Parní turbíny a přehříváky by navíc mohly být výrazně menší než dnes [3]. Další výhodou je zmenšení velikosti aktivní zóny, což se promítne do požadavků na palivo, např. na jeho obohacení při dosažení cílové délky provozního cyklu (vyhoření paliva).

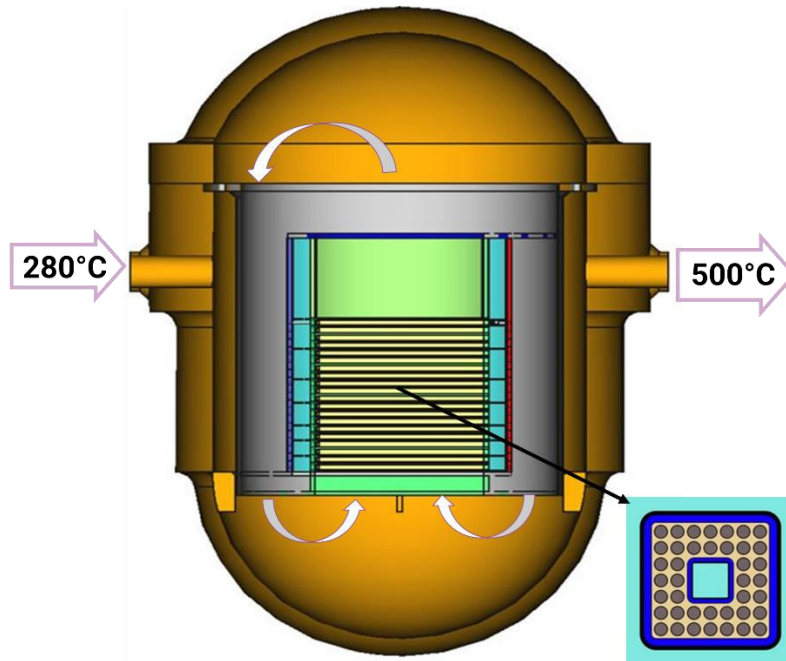
Návrh reaktoru počítá i s vysokým důrazem na bezpečnost, která bude mimo jiné podpořena pasivními bezpečnostními systémy, které fungují výhradně na základě fyzikálních jevů. Dalším požadavkem je možnost odvodu zbytkového tepla nezávisle na vnějším zdroji energie, a to v časovém intervalu 3 dnů (tady samo-uchlazení reaktoru).

Moderátorem a chladivem bude superkritická voda (SCW), u níž nebude docházet k fázové přeměně i přes velké změny teploty a hustoty. Právě významná změna hustoty SCW bude využita pro moderaci štěpné reakce. Předností SCW–SMR je jeho nulová toxicita, a i z hlediska bezpečnosti provozu, např. v případě úniku primárního chladiva či mimořádné události, převyšuje technologie využívající ke chlazení tekuté soli či kovy (např. olovo-bismut, sodík).

Pokrok SCW-SMR v rámci ECC-SMART

V rámci testování materiálů je pozornost věnována pokrytí paliva, kdy nelze vzhledem k vysokým pracovním parametrům použít zirkoniové slitiny, jak je běžné u vodou chlazených reaktorů stávající generace. Na začátku projektu tak byla vytvořena testovací matrice obsahující více než 700 vzorků. Na základě výsledků předchozích výzkumných prací zaměřených na korozní odolnost strukturních materiálů v prostředí SCW, byly vybrány austenitická ocel 310S a niklová slitina 800H. Pro kompletnost testů a podporu mezinárodní spolupráce byl kolegy z Číny dodán experimentální materiál – AFA (Alumina Forming Austenitic slitin). Jedná se o austenitickou ocel o složení blízké 310S s vyšším obsahem Al, který by měl vést k lepší korozní odolnosti v prostředí SCW. Většina výše zmíněných testovaných vzorků byla vyrobena z trubek, aby se výsledky/výzkum více přiblížil reálným podmínkám, jelikož korozní odolnost pokrytí paliva byla označena jako klíčovou pro další vývoj reaktorů chlazených SCW. Podmínky zkoušek vycházely z výpočtů a zkušeností kolegů z Kanady. Expoziční testy, včetně těch zaměřených na elektrochemii, byly zahájeny a první výsledky se aktuálně vyhodnocují. Kromě vlivu prostředí SCW na korozní odolnost vybraných materiálů, bude věnována pozornost také radiolýze vody a vlivu ozáření neutrony na jejich chování.

Další pracovní balíček je zaměřen na termohydrauliku, bezpečnost a taky konstrukční návrh SCW-SMR, který je ukázán na obr. 1. Tento inovativní návrh vychází z předchozího návrhu vysoko-výkonného lehkovodního reaktoru (High Performance Light Water Reactor, HPLWR [3]) a promítnutí zkušeností od kolegů z Kanady a Číny. Uvedený návrh počítá s horizontálním umístěním palivových souborů. Jedním z cílů toho pracovního balíčku je zahrnutí/promítnutí vlivu stavu povrchu pokrytí paliva na přestup tepla.



Obr. 1: Výchozí návrh reaktoru SCW-SMR [6] včetně průřezu palivovým článkem, jehož optimalizace je jedním z klíčových aktivit projektu ECC-SMART

Další pracovní skupina se zabývá optimalizací palivových souborů a jádra z pohledu neutronů. Jedním z hlavních cílů je dosáhnout 2letého cyklu vyhoření paliva. Za tímto účelem byl upraven návrh palivových souborů včetně geometrie a počtu palivových proutků. Do návrhu palivových souborů se promítá i typ (UO_2 a MOX) a obohacení paliva. První výsledky ukázaly, že palivo MOX lze úspěšně použít v kombinaci s vyšším obohacením UO_2 . Plánují se však další analýzy pro dosažení vhodného rozvržení jádra. Ne všechny změny navrhované na základě neutronové fyziky jsou však proveditelné z hlediska termo-hydrauliky a materiálů. Základní parametry SCW-SMR jsou shrnuty v tab. 1 a jsou předmětem optimalizace v rámci zmíněného projektu ECC-SMART.

Tab. 1: Vybrané základní parametry konceptu SCW-SMR [7]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon	300	MWe
Chladivo	Superkritická voda	
Vstupní teplota	280	°C
Výstupní teplota	500	°C
Maximální teplota na pokrytí paliva	570	°C
Průměrná teplota chladiva	380	°C
Pracovní tlak	25	MPa
Palivo	UO_2 , MOX	–
Vyhoření paliva	720	den

Výstupy a pokrok dosažený v technických pracovních skupinách by měl vést k návrhu shrnující hlavní požadavky související se zajištěním bezpečnosti provozu SCW-SMR. Vzájemná spolupráce v rámci řešení projektu by také měla pomoci sestavit požadavky na budoucí licenční proces, čemuž se věnuje další vyčleněná pracovní skupina.

Závěr

Obecně lze říci, že malé modulární reaktory se jeví jako vhodný a možný způsob pro zajištění dodávek energie v budoucnu, kdy se převážně mluví o jejich využití při nahrazování elektrárén na fosilní paliva. V případě konceptů orientovaných na budoucí generaci IV. je však ještě potřeba ujit kus cesty před uvedením do praxe. V prezentovaném případě patří mezi klíčové výzkumné aktivity především nalezení vhodného materiálu pro pokrytí paliva, u kterého by byla zachována vysoká pevnost při dlouhodobém vystavení vysokým provozním teplotám a tlakům a vysoká korozní odolnost. Zároveň by tento materiál měl obsahovat co nejméně prvků s velkým účinným průřezem pro záchyt neutronů. Z pohledu bezpečnosti a konstrukce bude nutné věnovat ještě mnoho úsilí k navržení a umístění regulačních tyčí v rámci plánovaného konceptu SCW-SMR s horizontálně instalovanými palivovými články. Tím pádem bude nutné více optimalizovat velikost a počet palivových článků, včetně jejich originální geometrie. V neposlední řadě je předmětem diskuze výměna vyhořelého paliva a nastavení cílené modularity systému na bázi SCW.

Na závěr je však nutné znovu zmínit výhody konceptů SMR, ke kterým patří především předpokládané nižší počáteční investiční náklady (včetně časové náročnosti), modularita, předpokládaný jednodušší provoz a vysoký důraz na bezpečnost provozu. Koncept SCW-SMR se navíc opírá o bohaté zkušenosti z provozů lehkovodních reaktorů po celém světě.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci řešení projektu, který získal finanční prostředky z výzkumného a školícího programu Euratomu na období 2019–2020 na základě grantové dohody č. 945234.

Reference

- [1] IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*, Austria, 2020.
- [2] <https://ecc-smart.eu/>
- [3] T. SCHULENBERG, J. STAFINGER, *HPLWR-Design and Analysis*, Germany, 2014
- [4] M. KRYKOVÁ, M. ARNOULT RŮŽIČKOVÁ, M. ŠÍPOVÁ, Vývoj superkritickou vodou chlazeného reaktoru v Evropě, *Jad. Energ.*, 2021, č. 3, str. 42-49.
- [5] K. UCHIMURA, A. YAMAJI, Preliminary Core Design Study of Small Supercritical Fast Reactor with Single-Pass Cooling, *J. Nucl. Eng.* 1 (2020) 46–53. <https://doi.org/10.3390/jne1010004>
- [6] T. SCHULENBERG, O. IVAN, Suggestion for design of a small modular SCWR, *Conf. Proc. ISSCWR-10*. (2021). <https://doi.org/10.1115/1.4052191>
- [7] T. SCHULENBERG, I. OTIC, Concept of a small modular SCWR with horizontal fuel assemblies, *ASME J. Nucl. Rad Sci.* 8 (2022). <https://doi.org/10.1115/1.4052191>