

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Czech Technical University in Prague
Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering

Ing. Lubomír Sklenka, Ph.D.

Malé a modulární jaderné reaktory
a jejich potenciální využití v České Republice

Small and Modular Reactors
and its potential use in the Czech Republic

Summary

This habitation lecture is focused on small and modular nuclear reactors and its potential use in the Czech Republic. Small and modular reactors, which have been widely discussed since the last decade over the world, can bring new potential to nuclear power programmes in both developing and developed countries. The main reasons for construction of small and modular reactors are increasing demand for sources of electricity and heating for remote, isolated or local electricity supply, the district heating and for the industrial applications heating.

Small and modular reactors can be used in the energy mix of the Czech Republic as small local cogeneration sources of electricity and heating for industrial applications heating and for district heating as well as for potential new unit in of the Dukovany nuclear power plant or small and modular reactors can replace its old units. The first analysis show that for the Czech Republic from more than 30 concepts of small and modular reactors are the most suitable the US-origin light water reactors mPower Reactor, NuScale Reactor or the Russian-origin liquid metal cooled reactor SVBR-100 Reactor.

Souhrn

Tato habilitační přednáška se zabývá malými a modulárními reaktory a jejich potenciálním využití v České Republice. Malé a modulární reaktory, o kterých se ve světě mluví v posledním desetiletí, mohou přinést nové možnosti pro další rozvoj jaderné energetiky jak v rozvojových, tak i v rozvinutých zemích. Mezi hlavní důvody zavedení malých a modulárních reaktorů patří zejména rostoucí poptávka po lokálních zdrojích elektrické energie a tepla pro regionální energetiku, teplárenství a pro průmyslové aplikace.

Malé a modulární reaktory by mohly začleněny do české energetiky jako malé lokální kombinované zdroje elektrické energie a tepla pro průmyslové použití a vytápění, nebo by mohly být použity pro potenciální 5. blok Jaderné elektrárny Dukovany, příp. jako postupná náhrada za stávající bloky této elektrárny. Z předběžných analýz vychází, že z více než 30 různých konceptů malých a modulárních reaktorů by pro českou energetiku byly vhodné zejména tlakovodní reaktory jako např. americké reaktory mPower, NuScale nebo ruský reaktor chlazený tekutými kovy SVBR-100.

Klíčová slova

energetika, jaderná energetika, jaderný reaktor, jaderná elektrárna, teplárenství, malé reaktory, malé a střední reaktory, malé modulární reaktory, modulární reaktory malého a středního výkonu, mini-reaktory, reaktor mPower, reaktor NuScale, reaktor SVBR-100, Česká republika

Keywords

energy, nuclear energy, nuclear reactor, nuclear power plant, district heating, SMR, Small and Medium sized Reactors, Small Modular Reactors, Small-medium Modular Reactors, SMART, Small Modular Advanced Reactor Technology, Mini-reactors, mPower, NuScale, mPower Reactor, NuScale Reactor, SVBR-100 Reactor, Czech Republic

Obsah

1. Úvod.....	6
2. Malé a modulární reaktory	7
3. Potenciální nasazení malých reaktorů v České republice	16
4. Závěr	20
Literatura	21
Ing. Lubomír Sklenka, Ph.D. - odborný životopis.....	23

1. Úvod

V posledních letech lze ve vývoji nových jaderných energetických reaktorů ve světě vysledovat několik zřetelných trendů. Jaderné reaktory druhé generace, které jsou v současnosti v provozu, prochází postupnou inovací v souladu s postupným zvyšováním požadavků na jadernou bezpečnost a s rozvojem poznání a techniky. Kromě toho se mnoho provozovatelů snaží programy řízeného stárnutí využít potenciál existujících jaderných bloků a postupně prodloužit jejich životnosti.

Nové jaderné reaktory třetí generace a generace III+ jsou již ve výstavbě v několika zemích a lze očekávat, že postupně budou nahrazovat stávající reaktory druhé generace. Výzkumné a vývojové práce již teď probíhají na reaktorech čtvrté generace, které budou svým velkým důrazem na dlouhodobou udržitelnost v oblasti zásobování energií, minimalizací jaderných a radioaktivních odpadů, zlepšenou ekonomikou provozu, bezpečností, spolehlivostí a ochranou před zneužitím jaderných materiálů představovat zásadní změnu ve vývoji jaderných energetických reaktorů.

Malé a modulární jaderné reaktory, o kterých se v posledních letech hodně mluví, mohou také významně zasáhnout do budoucího rozvoje jaderné energetiky ve světě. Mají tyto malé jaderné bloky naději na to prosadit se v konkurenci stávajících reaktorů druhé generace nebo reaktorů třetí, III+ a čtvrté generace? Opravdu přinášejí zásadní posun v konstrukci, jaderné bezpečnosti nebo v ekonomice jejich provozu tak, aby se mohly stát jedním z pilířů budoucího rozvoje jaderné energetiky ve světě, případně i v České Republice?

2. Malé a modulární reaktory

Situace v oblasti vývoje malých a modulární reaktorů ve světě je velmi dynamická, často i nepřehledná, protože nejenže se neustále objevují nové koncepty malých reaktorů, ale stávající se často mění, někdy i zásadně, a ani terminologie a klasifikace malých reaktorů zatím není jednotná.

V literatuře běžně používána zkratka pro malé reaktory SMR se buď používá pro *malé a střední reaktory* (Small and Medium sized Reactors) nebo pro *malé modulární reaktory* (Small Modular Reactors), ale také i pro *modulární reaktory malého a středního výkonu* (Small-medium Modular Reactors). V amerických zdrojích se pro malé a modulární reaktory často používá i zkratka SMART (Small Modular Advanced Reactor Technology).

Pro klasifikaci malých a modulárních reaktorů se ve světě nejčastěji používá členění Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA - International Atomic Energy Agency) nebo členění Ministerstva energetiky USA (US DOE - United States Department of Energy). Podle klasifikace IAEA (např. [7]) patří mezi malé reaktory (Small sized Reactors) ty, které mají elektrický výkon maximálně 300 MWe, mezi střední reaktory (Medium sized Reactors) patří reaktory s výkonem mezi 300 a 700 MWe (včetně) a reaktory s výkonem nad 700 MWe již patří do skupiny reaktorů velkého výkonu (Large sized Reactors). Americká klasifikace (např. [10]) používá dělení podle tepelného výkonu s hranicemi 1000 MWt a 2000 MWt, které při účinnosti energetického reaktoru přibližně 1/3 zhruba odpovídají výkonovým hranicím IAEA. Americká klasifikace zahrnuje do kategorie malých reaktorů i zvláštní skupinu tzv. *mini-reaktorů* s výkonem do 50 MWe nebo do 250 MWt. V následujícím textu se termínem *malé a modulární reaktory* rozumí malé i střední reaktory, které mohou, ale nemusí být modulární.

Trend zvyšovat výkon energetických reaktorů se objevil již u druhé generace reaktorů. Reaktory s nominálním výkonem několik málo stovek MWe v 70. a 80. letech minulého století jsou dnes často nahrazovány reaktory o výkonech překračující 1000 MWe a dosahují až 1700 MWe. I přesto podle IAEA (k 31. 12. 2012 [5]) mělo

124 energetických reaktorů v provozu z celkového počtu 437 výkon maximálně 700 MWe, což představuje 28 % reaktorů, které patří do kategorie malých a středních reaktorů. Podle stejné databáze bylo ve výstavbě 67 energetických reaktorů, z nichž 12 patří mezi malé a střední reaktory, tj. 18 %.

Pro zavedení jakýchkoliv nových typů energetických reaktorů včetně malých a modulárních reaktorů je nutné zvažovat jak důvody společenské, tak i důvody technické, bezpečnostní a ekonomické [1], [7]. Mezi hlavní důvody zavedení malých a modulárních reaktorů patří rostoucí poptávka po elektrické energii způsobená růstem populace a ekonomickým vývojem v zemích s nedostatečně rozvinutou infrastrukturou a přenosovou soustavou, pro které malý modulární reaktor může být jedinou možností jak začít využívat jadernou energetiku pro zásobování obyvatelstva elektřinou nebo technologickým teplem buď pro vytápění domácností, nebo pro průmyslové využití, např. odsolování mořské vody, výrobu vodíku, zkapaňování uhlí [6], [10]. Malý reaktor někdy může být jediným zdrojem, který lze rozumně připojit do přenosové soustavy tak, aby byla dodržena zásada, že pro síť není vhodné připojovat zdroj a kapacitou větší než 10% kapacity sítě. Rozsáhlá, odlehlá nebo izolovaná území, která jsou buď těžko dostupná, nebo které nelze možné jednoduše připojit k hlavní rozvodní soustavě v zemi, jsou vhodnými pro malé modulární reaktory a některé velmi řídké obydlené oblasti dokonce pro mini-reaktory.

Bezpečnostní a technické parametry malých a modulárních reaktorů jsou většinou srovnatelné s reaktory generace III a III+, mnohé z konceptů malých reaktorů mají progresivní integrální provedení, které může výrazně posunout bezpečnostní parametry těchto reaktorů. K hlavním nevýhodám malých a modulárních reaktorů v této oblasti patří argument, že reaktory nastupující generace III a III+ jsou již vyvinuté a již se staví a není nutné vyvíjet jiné typy reaktorů a spíše se zaměřit na vývoj reaktorů čtvrté generace. Také lze u některých mini-reaktorů nebo reaktorů malého výkonu očekávat složitější řešení zárukového procesu v rámci ochrany před zneužitím jaderných materiálů.

Jedním ze základních problémů výstavby nových energetických reaktorů velkého výkonu je nejistota a riziko investorů vložit peníze do velmi nákladného projektu výstavby reaktoru s tím, že investice se začne splácet až po velmi dlouhé době výstavby a v současné době i velká volatilita ceny elektrické energie, kterou lze na dlouhá desetiletí jen těžko předvídat. Prodlužování doby výstavby a překročení nákladů u velkých reaktorů ve výstavbě provázela mnoho projektů ve světě, i u nás a nevyhnula se ani reaktorům třetí generace III a III+, které se právě staví. V Tab. 1 jsou uvedeny některé ekonomické parametry tří reaktorů ve výstavbě, které dokumentují zpoždění ve výstavbě a překračování nákladů.

Tab. 1 Zpoždění a překračování nákladů ve výstavbě reaktorů [11]

	Olkiluoto	Flamanville	Vogtle
země	Finsko	Francie	USA
reaktor	1xEPR	1xEPR	2xAP-1000
Začátek výstavby	2005	2006	březen 2013
Plánované spuštění	2009	2012	2016/17
Zpoždění ve výstavbě	7 let (2016)	4 roky (2016)	Min. 1 rok
Původní rozpočet	3,2 mld. EUR	3,3 mld. EUR	14 mld. USD
Odhadovaná cena	10,7 mld. EUR	8,5 mld. EUR	15,6 mld. USD
Překročení nákladů	7,5 mld. EUR (234 %)	5,2 mld. EUR (158 %)	1,6 mld. USD (237 %)

Hlavním ekonomický důvodem proti výstavbě a provozu malých a modulárních reaktorů je jejich dražší provoz ve srovnání s velkými reaktory a s tím spojené vyšší jednotkové náklady na výrobu jednotky elektrické energie. Pokud by malé a modulární reaktory byly pouze zmenšeninou velkých reaktorů, tak by určitě nebyly schopny konkurovat velkým energetickým reaktorům. Potenciální

nepříznivé vyšší jednotkové náklady na výrobu jednotky elektrické energie lze kompenzovat výhodami, které nabízí malé a modulární reaktory, např. modularizací a zjednodušením technologie těchto reaktorů a tím i nižšími investičními náklady, výstavbou více reaktorů v jedné lokalitě, sdílením některých technologických celků více reaktory, využití zkušeností z výstavby předcházejících stejných reaktorů a tím vytvoření levnějších postupů a harmonogramů výstavby, apod. Sériová výroba mnoha stejných reaktorových modulů (na jedné lokalitě lze postavit až 10-12 modulů) výrazně snižuje jejich cenu, která klesá s množstvím vyrobených kusů. Menší komponenty lze také snadno přepravovat.

Malé a modulární reaktory mohou být jedinou rozumnou možností jak vybudovat jadernou energetiku v rozvojových zemích třetího světa, protože tyto země mají často velmi omezené investiční možnosti, zejména možnosti plateb v „tvrdé světové“ měně. Podobně mohou být malé a modulární reaktory alternativou k velkým reaktorovým blokům ve vyspělých zemích, ve kterých došlo nebo dochází k deregulaci energetického trhu, který vyžaduje větší variabilitu v produkci elektrické energie. Modulární konstrukce reaktoru umožňuje postupné zvyšování kapacity elektrárny, rozložení investičních nákladů v čase a s tím spojeného snížení finančního rizika.

Výměna paliva u malých a modulárních reaktorů se provádí podstatně méně často, než u současných energetických reaktorů. V současnosti se palivo mění po 12, 18 nebo 24 měsících, u malých a modulárních reaktorů je interval výměny nejméně 3 - 4 roky, často 8 až 10 let a u některých konceptů až 20 let. Prodloužená výměna paliva umožňuje snížit počet zaměstnanců elektrárny a tím i náklady na tyto vysoce specializované a kvalifikované pracovníky. Některé koncepty velmi malých reaktorů jsou dokonce navrženy jako bezobslužné nebo jen s minimálním provozním personálem.

I když se malé a modulární reaktory od reaktorů velkého výkonu liší velikostí i konkrétním technickým provedením reaktoru, v naprosté většině se využívají koncepce energetických reaktorů ověřené v minulých desetiletích, např. lehkododního reaktory,

těžkovodní reaktory, rychlé reaktory chlazené plynem nebo tekutými kovy. Podle databáze IAEA ARIS [8] se v současnosti v 11 zemích (Argentina, Brazílie, Čína, Francie, Indie, Japonsko, JAR, Kanada, Korea, Rusko a USA) vyvíjí celkem 32 modulárních reaktorů malého a středního výkonu (viz. Tab. 2.), z nichž 18 je lehkovodních reaktorů, 3 těžkovodní, 4 plynem chlazené a 7 reaktorů chlazených tekutými kovy.

Tab. 2 Malé a modulární reaktory [8]

země	název	výrobce	výkon (MWe/MWt)
Lehkovodní reaktory			
Argentina	CAREM	CNEA	25 / 100
Brazílie	FBNR	FURGS	72 / 218
Čína	CNP-300	CNNC	325 / 999
Francie	Flexblue	DCNS	160 / 600
Japonsko	IMR	Mitsubishi	350 / 1000
Korea	SMART	KAERI	100 / 330
Rusko	ABV-6M	OKBM Afrikantov	8,3 / 38
	SHELF	NIKIET	6 / 28
	RITM-200	OKBM Afrikantov	50 / 175
	VK-300	RDIPE	250 / 750
	VBER-300	OKBM Afrikantov	325 / 917
	WWER-300	OKBM Hidropress	300 / 850
	KLT-40S	OKBM Afrikantov	35 / 150
	UNITHERM	RDIPE	2,5 / 20
USA	mPower	Babcock & Wilcox	180 / 530
	NuScale	NuScale Power	45 / 160
	Westinghouse SMR	Westinghouse	225 / 800
-----	IRIS	konsorcium IRIS	335 / 1000

Těžkovodní reaktory			
Kanada	EC6	AECL	740 / 2084
Indie	PHWR-220	NPCIL	236 / 755
	AHWR300-LEU	BARC	304 / 920
Plynem chlazené reaktory			
Čína	HTR-PM	Tsinghua Univ.	200 / 500
JAR	PBMR ¹	PBMR	164 / 400
USA	GT-MHR	General Atomics	150 / 350
	EM2	General Atomics	240 / 500
Reaktory chlazené tekutými kovy			
Čína	CEFR	CNEIC	20 / 65
Japonsko	4S	Toshiba	10 / 30
Indie	PFBR-500	IGCAR	500 / 1250
Rusko	BREST-OD-300	RDIPE	300 / 700
	SVBR-100	AKME	101 / 280
USA	PRISM	GE-Hitachi	311 / 840
	G4M	Gen4 Energy	25 / 70

¹ projekt pozastaven

Vzhledem k tomu, že až na výjimky u malých a modulární reaktorů zatím ještě neprobíhá licencování, tak společnosti, které je vyvíjí, poměrně často provádí větší nebo menší změny ve svých projektech a často mění i základní reaktorové parametry, např. tepelný a elektrický výkon reaktoru v rozsahu od několika jednotek až do několika desítek MW. Proto je v současnosti poměrně obtížné pro některé koncepty získat aktuální hodnoty těchto parametrů.

Z širokého spektra různých konceptů malých a modulární reaktorů, které by mohly přicházet v úvahu pro potenciální nasazení v České republice, lze uvažovat zejména o tlakovodních reaktorech jako např. americký reaktor mPower nebo NuScale nebo ruský reaktor chlazený tekutými kovy SVBR-100 [1].

Reaktor mPower

Reaktor mPower je malý modulární lehkovodní reaktor integrálního provedení, kdy v jedné tlakové nádobě jsou kromě aktivní zóny a regulačních orgánů umístěny i další části primárního okruhu jako např. výměníky (parogenerátory) nebo čerpadla. Reaktor mPower, který vyvíjí společnost Babcock & Wilcox, má tepelný výkon 530 MWt a elektrický výkon 180 MWe.

Aktivní zóna reaktoru se skládá z 69 palivových souborů klasických tlakovodních reaktorů západního typu s mříží 17x17, ale se zkrácenou délkou na dva metry. V palivu s obohacením do 5 % se používají gadoliniové vyhořívající absorbatory. Absorbátory ve formě kyseliny borité se nepoužívají. Předpokládaný palivový cyklus reaktoru je standardně čtyřletý (48 měsíců) s tím, že jej bude možné měnit podle požadavků provozovatele, např. zkrácením na 30 měsíců nebo prodloužením až na 60 měsíců.

Reaktor, který je umístěn pod zemí a který využívá pasivní bezpečnostní systémy, je navržen tak, aby jeho integrální konstrukce znemožnila vznik havárie spojené se ztrátou chladiva. Čerpadla jsou umístěna uvnitř integrální reaktorové nádoby stejně tak jako i výměníky tvořené trubkovými spirálami, které nahrazují parogenerátory. Kompenzátor objemu je u reaktoru mPower nahrazen parním prostorem pod víkem reaktoru. Pohony řídicích tyčí neprocházejí víkem reaktoru, ale jsou umístěny uvnitř reaktoru. Společnost Babcock & Wilcox vyvíjí reaktor mPower jako modulární s možností postupného rozšiřování kapacity na lokalitě v závislosti na místních potřebách. Reaktor bude vyroben a sestaven ve výrobním závodu společnosti Babcock & Wilcox, poté přepraven na místo stavby, kde bude usazen do podzemního kontejnmentu.

Na konci roku 2012 získal projekt reaktoru mPower finanční podporu z rozpočtu US DOE, které má pomoci jeho dalšímu vývoji a licencování tak, aby první reaktor, který je plánován v lokalitě Clinch River v Tennessee pro elektrárenskou společnost Tennessee Valley Authority, mohl být spuštěn do roku 2022.

Další informace o reaktoru mPower včetně popisu konstrukce reaktoru lze nalézt např. v [1],[8].

Reaktor NuScale

Podobně jako reaktor mPower, je i reaktor NuScale malý modulární lehkovodní reaktor integrálního provedení, ale s nižším výkonem - tepelným 160 MWt a elektrickým 45 MWe. Původní projekt reaktoru nazvaný MASLWR (Multi-Application Small Light Water Reactor) vyvíjený konsorciem amerických univerzit a výzkumných organizací byl převzat společností NuScale Power Inc. s cílem přivést projekt ke komerčnímu využití.

Aktivní zóna reaktoru se skládá z 37 palivových souborů klasických tlakovodních reaktorů západního typu s mříží 17x17, ale se zkrácenou délkou na dva metry. Předpokládaný palivový cyklus reaktoru je standardně dvouletý (24 měsíců) s tím, že jej bude možné prodloužit až na čtyř až pětiletý (48 nebo 60 měsíců). Palivo má standardně obohacení do 5 %, s tím, že pro pětiletý cyklus bude nutné jeho zvýšení nad 5 %, uvažuje se až o horní hranici 8 %.

Stejně jako reaktor mPower i reaktor NuScale je vyvíjen jako modulární systému s možností postupného rozšiřování kapacity na lokalitě. Reaktor bude vyroben a sestaven ve výrobním závodu společnosti, poté umístěn do vlastního vysokotlakého kontejnmentu, přepraven na místo stavby, kde bude usazen do betonového bazénu naplněného vodou. Při výměně paliva se celý reaktor odveze do místa výměny paliva. Na jednu lokalitu lze umístit jeden až dvanáct nezávislých modulů o jmenovitém výkonu 45 MWe.

Reaktor NuScale využívá pro chlazení přirozenou cirkulaci chladiva primárního okruhu. V integrální tlakové nádobě jsou kromě aktivní zóny a řídicích tyčí s regulačními klastry umístěny i dva parogenerátory a kompenzátor objemu. Každý reaktor má vlastní turbínu a generátor. Hlavní bezpečnostní funkce reaktoru jsou zajištěny zejména vysokotlakým kontejnmentem, dvěma pasivními systémy odvodu zbytkového tepla a chlazení kontejnmentu, havarijním akumulátorem, jejichž hlavním cílem je dlouhodobé zajištění stabilního chlazení aktivní zóny a zmírnění těžkých havárií.

Další informace o reaktoru NuScale včetně popisu konstrukce reaktoru lze nalézt např. v [1], [7],[8].

Reaktor SVBR-100

Reaktor SVBR-100 je malý modulární rychlý reaktor chlazený tekutými kovy, slitinou olovo-vizmut, který byl vyvinut konsorciem AKME, kterou tvoří společnosti OKB Hidropress, NIKIET a Atomenergoprojekt. Návrh reaktoru SVBR-100 vychází z padesátileté zkušenosti s návrhem a provozem reaktorů s tímto chladivem pro sovětské a ruské jaderné ponorky. Reaktor má nominální tepelný výkon 280 MWt a elektrický výkon 101 MWe. Vzhledem k tomu, že elektrický výkon reaktoru se může pohybovat v závislosti na parametrech páry mezi 75 - 100 MWe je tento reaktor často označován jako SVBR-75/100.

Aktivní zóna reaktoru se skládá z 55 hexagonálních palivových souborů. V každém palivovém souboru je 220 palivových proutků obsahující UO_2 s obohacením do 16,4 % nebo palivo typu MOX. Předpokládaný palivový cyklus reaktoru je 7 – 8 let. Předpokládané spuštění prvního reaktoru v lokalitě Dimitrovgrad je plánováno na rok 2017. Další informace o reaktoru SVBR-100 včetně popisu konstrukce reaktoru lze nalézt např. v [1],[6], [7],[8].

3. Potenciální nasazení malých reaktorů v České republice

V posledních letech se také v České republice čím dál, tím více mluví o malých a modulárních reaktorech jako o potenciálních lokálních zdrojích elektrické energie a tepla. O tyto malé lokální zdroje kromě pracovníků z oboru projevují zájem i politici na komunální i celostátní úrovni a také lidé, do jejichž působnosti patří lokální zásobování teplem. Například již v roce 2009 projevilo předběžný zájem o reaktor Hyperion (později přejmenovaný na reaktor G4M) město Jablonec nad Nisou [12], kde hlavní motivací pro jeho stavbu měla být i kogenerace tepla, jelikož náklady na teplo pro domácnosti v minulosti značně rychle rostly a domácnosti hromadně požadovaly odpojení od centrálního zásobování teplem.

Jaderná energetika patří v České republice ke klíčovým průmyslovým odvětvím s dlouhou tradicí. Obě české jaderné elektrárny v Dukovanech a Temelíně v roce 2012 dodaly do sítě 28,6 TWh elektrické energie [9], což představovalo 35,27 % veškeré dodané elektrické energie [9]. Plánovaná dostavba a provoz dalších dvou bloků Jaderné elektrárny Temelín spolu s postupným odstavováním dosluhujících uhelných elektráren by zvýšila podíl jaderných elektráren na výrobě elektrické energie v ČR přes hranici 50 %, což je v souladu s návrhem aktualizované státní energetické koncepce ČR, ve které je uvedeno [13]: „Podporovat rozvoj jaderné energetiky jako jednoho z pilířů výroby elektrické energie. S cílovým podílem jaderné energetiky na výrobě elektrické energie nad 50% a s maximalizací dodávek tepla z jaderných elektráren.“

Výstavba nových bloků Jaderné elektrárny Temelín, každého s elektrickým výkonem před 1000 MWe, ještě pořád není definitivně potvrzena a vyhlášení vítěze právě probíhajícího výběrového řízení na dodavatele se neustále posouvá. Jedním z důvodů posunu je i nejistota na evropských energetických trzích spojená s těžko předvídatelným vývojem cen elektrické energie v budoucích letech. Jednoznačná politická podpora dostavbě je čím dál, tím častěji podmiňována právě ekonomickou výhodností nových jaderných bloků v Temelíně. V tomto trendu pokračuje i nastupující vláda, která ve své koaliční smlouvě jednoznačně deklaruje, že „pokud to

bude hospodářsky výhodné pro ČR, podpoříme dostavbu Jaderné elektrárny Temelín“ [14]. Ve stejném dokumentu lze také nalézt „za důležité rovněž považujeme zajištění provozu Jaderné elektrárny Dukovany i po roce 2025 (i s alternativou eventuální dostavby nového bloku)“ [14].

Malé a modulární reaktory by mohly v České republice buď hrát roli malých lokálních kombinovaných zdrojů elektrické energie a tepla pro průmyslové i neprůmyslová použití, nebo by mohly být použity pro potenciální 5. blok Jaderné elektrárny Dukovany, příp. jako postupná náhrada za stávající bloky této elektrárny. V případě malých lokálních zdrojů by mohly být nasazeny malé a mini-reaktory o výkonu několika málo desítek MWe, v případě větších aglomerací nebo větších průmyslových oblastí, s výkonem přes 100 MWe. Mnoho malých a modulárních reaktorů počítá s podzemní konstrukcí a umístěním reaktoru do nádoby s více pláští, proto mohou být tyto reaktory provozovány blízko obydlených oblastí a měst a jiných lokalit, které nejsou vhodné pro stavbu reaktorů velkých výkonů. V tomto případě by malé reaktory nahrazovaly stávající konvenční zdroje tepla a elektrické energie a ekonomická výhodnost příp. nevýhodnost je nutné posuzovat právě srovnání se současnými malými lokálními konvenčními zdroji a zde by mohly malé reaktory prokázat i svoji ekonomickou životaschopnost.

V případě Jaderné elektrárny Dukovany, kde jsou v provozu reaktory středního výkonu typu VVER-440, by bylo možné vybrat malý modulární reaktor o výkonu několika málo stovek MWe. Nový reaktor (příp. reaktory), by mohl být využit nejen pro dodávky elektrické energie a tepla mimo areál elektrárny, ale mohl by být využit v době po ukončení provozu původních blocích dodávkami tepla a elektrické energie pro vyřazovací těchto bloků. Výhodou tohoto řešení by bylo i jednodušší posuzování lokality pro umísťování nového reaktoru, protože lokalita Dukovany je již teď dostatečně prozkoumána a prověřena dlouholetým a spolehlivým provozem stávajících reaktorů VVE-440. Druhou výhodou by byla možnost maximálně využít stávající infrastrukturu elektrárny.

Obecně je snaha navrhovat malé a modulární reaktory tak, aby byly co nejjednodušší a aby obsahovaly co nejméně komponent, což umožňuje větší potenciální zapojení i menších domácích dodavatelů do výstavby těchto reaktorů ve větší míře, než je tomu při výstavbě velkých energetických reaktorů. I když výběr jakéhokoli jaderného energetického zdroje je v konečném důsledku ekonomicko-strategické rozhodnutí budoucího provozovatele, je vždy při tomto rozhodnutí brát v úvahu i mnoho dalších faktorů jako např. bezpečnost, vliv na životní prostředí, kvalitu a kvantitu potřebných lidských zdrojů, zapojení domácího průmyslu do výstavby, socioekonomické podmínky v potenciální lokalitě, apod. Studie proveditelnosti pro různé scénáře vývoje jaderné energetiky a pro různé typy reaktorů si dělají nejen samotné elektrárenské společnosti, ale často i orgány státní správy. V České republice má v energetickou politiku v gesci Ministerstvo průmyslu a obchodu, které svůj zájem o situaci v oblasti malých a modulárních reaktorů jako potenciálních energetických zdrojů, vyjádřilo udělením tříletého projektu (2012 - 2014) č. FR-TI4/280 řešitelům ze skupiny ÚJV Řež a Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze nazvaný „Jaderný reaktor malého výkonu pro výrobu tepla a elektrické energie v České republice“. Cílem projektu je předběžný výběr koncepce malého reaktoru pro vývoj a využití v České republice s uvážením základních technických, bezpečnostních a ekonomických požadavků na malé a modulární reaktory a jejich vliv na životní prostředí podle současných i výhledových legislativních požadavků. Projekt zahrnuje i vytvoření studií o možnostech výstavby malých a modulárních reaktorů pro střednědobý a dlouhodobý výhled potřeb České republiky, zejména pro regionální energetiku a teplárenství, průmyslové aplikace a výrobu vodíku. Součástí projektu jsou i analýzy možností zapojení českých firem do přípravy a výstavby malých a modulárních reaktorů v ČR [1], [2], [3], [4].

Jedním z konkrétních výstupů první části řešení projektu MPO je i výběr tří perspektivních typů malých a modulárních reaktorů, vhodných pro Českou republiku [1]. Po analýze současného stavu a vývoje malých a modulárních reaktorů pro výrobu tepla

a elektrické energie, po zvážení reálných možností výstavby v nejbližších letech a po zvážení možnosti zapojení českých průmyslových podniků a výzkumných organizací do vývoje a výroby malých reaktorů řešitelé vybrali z více než 30 projektů dva americké lehkovodní reaktory mPower a NuScale a jeden ruský rychlý reaktor chlazený tekutými kovy - reaktor SVBR-100, které v současnosti prochází podrobnějším studiem.

Reaktor mPower s výkonem 180 MWe byl jednoznačně první volbou zejména proto, že se jedná o technologii lehkovodního reaktoru, která má v České republice tradici, projekt reaktoru je v současnosti jedním z nejvíce rozpracovaných, již začalo jeho licencování v USA a reaktor má již předběžnou poptávku prvního zákazníka v Tennessee [1]. Společnost Babcock & Wilcox získal na pomoc při dalším vývoji a licencování mPower finanční podporu z rozpočtu US DOE. Je velká šance, že reaktor mPower bude prvním malým modulárním reaktorem postaveným na území USA. Reaktor by mohl být postaven v lokalitě Jaderné elektrárny Dukovany nebo v oblasti velké městské nebo průmyslové aglomerace.

Menší výkonovou alternativou k reaktoru mPower byl zvolen opět lehkovodní reaktor NuScale s výkonem 45 MWe jako reaktor vhodný pro menší městské nebo průmyslové aglomerace jako lokální zdroj elektrické energie a tepla pro průmysl i pro vytápění [1]. Reaktor je v pokročilém stádiu vývoje a lze o něm získat z otevřených zdrojů poměrně velké množství informací.

Ruský reaktor SVBR-100 o výkonu 100 MWe byl vybrán zejména díky potenciální možnosti zapojení českých průmyslových podniků a výzkumných organizací do vývoje a výroby malých reaktorů [1]. Na mezinárodním fóru pro jaderný průmysl v Praze byla v roce 2012 podepsána dohoda mezi ruskou firmou Rosatom a 13 českými firmami o spolupráci v oblasti vývoje reaktoru SVBR-100 a zavedení technologie malého rychlého reaktoru chlazeného slitinou olova a bismutu do České republiky. I když se v současnosti zdá tato možnost vzhledem k dlouholeté tradici provozu tlakovodních reaktorů u nás málo realistická, stojí za to se i tímto reaktorem podrobně zabývat.

4. Závěr

Malé a modulární jaderné reaktory, o kterých se v posledních letech hodně mluví, i přesto, že nepřinášejí zásadní posun v konstrukci samotných reaktorů většinou vycházející z osvědčených konceptů lehkovodních, těžkovodních reaktory nebo rychlých reaktorů chlazené tekutými kovy nebo plynem, mohou významně zasáhnout do budoucího rozvoje jaderné energetiky ve světě, a také v České Republice.

Malé a modulární reaktory by mohly začleněny do české energetiky jako malé lokální kombinované zdroje elektrické energie a tepla pro průmyslové použití a vytápění, nebo by mohly být použity pro potenciální 5. blok Jaderné elektrárny Dukovany, příp. jako postupná náhrada za stávající bloky této elektrárny. Z předběžných analýz vychází, že z více než 30 různých konceptů malých a modulární reaktorů by pro českou energetiku byly vhodné zejména tlakovodní reaktory jako např. americké reaktory mPower nebo NuScale nebo ruský reaktor chlazený tekutými kovy SVBR-100.

Budou-li malé a modulární reaktory vhodně nasazeny jako malé lokální lokálních zdrojích elektrické energie a tepla pro regionální energetiku, teplárenství a pro průmyslové aplikace, mohou obstát v konkurenci ostatních energetických zdrojů a stát se pevnou součástí v energetickém mixu České republiky.

Literatura

- [1] Sklenka, L. - Losa, E. - Harutyunyan, D. - Huml, O. - Rataj, J.: Současný stav a vývoj malých reaktorů pro výrobu tepla a elektřiny, ČVUT FJFI Praha, prosinec 2012
- [2] Sklenka, L. - Losa, E. - Kobyłka, D. - Harutyunyan, D.: Studium základních neutronických a termomechanických charakteristik a palivových cyklů malých a modulárních reaktorů, ČVUT FJFI Praha, prosinec 2013
- [3] Sklenka, L. - Rataj, J. - Losa, E.: Využití zkušeností z provozu výzkumných reaktorů pro stavbu a provoz malých a modulárních reaktorů, ČVUT FJFI Praha, prosinec 2013
- [4] Losa, E. - Rataj, J. - Sklenka, L.: Legislativní aspekty výstavby a provozu malých a modulárních reaktorů, ČVUT FJFI Praha, srpen 2013
- [5] Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series No. 2, 2013 Edition, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, June 2013, ISBN 978-92-0-144110-2
- [6] Innovative small and medium sized reactors: Design features, safety approaches and R&D trends, IAEA TecDoc-1451, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, May 2005, ISBN 92-0-103205-6
- [7] Status of Small Reactor Designs Without On-Site Refuelling, IAEA TecDoc-1536, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, January 2007, ISBN 92-0-115606-5
- [8] Status of Small and Medium Sized Reactor Designs, A Supplement to the IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), International Atomic Energy Agency, Vienna, <http://aris.iaea.org>, September 2012
- [9] Power Reactor Information System (PRIS), Database on Nuclear Power Reactors, International Atomic Energy Agency, Vienna, <http://www.iaea.org/pris>, December 2013
- [10] Interim Report of the American Nuclear Society President's Special Committee on Small and Medium Sized Reactor (SMR) Generic Licensing Issues, American Nuclear Society, July 2010

- [11] Workshop on Financing Structures and Financial Risk Management for Nuclear Power Plant Projects IAEA, 12-15 Dec 2011, Vienna
- [12] Problém s elektřinou vyřeší malým jaderným reaktorem, Zpravodajský server iDnes.cz, http://zpravy.idnes.cz/senatorka-chce-mini-temelin-ktery-by-vyrabel-proud-pro-jablonec-psv-/domaci.aspx?c=A090318_091632_domaci_abr, on-line 19.12.2013
- [13] Aktualizace státní energetické koncepce České republiky, Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky, Praha, Srpen 2012
- [14] Koaliční smlouva mezi ČSSD, hnutím ANO 2011 a KDU-ČSL na volební období 2013 - 2017, verze 3 ze dne 12. 12. 2013

Ing. Lubomír Sklenka, Ph.D. - odborný životopis

Narozen: 2. 5. 1961 v Kremnici
Email: lubomir.sklenka@fjfi.cvut.cz

Vzdělání

1980 - 1985 Inženýrské studium na FJFI ČVUT v Praze v oboru
Jaderné inženýrství
1998 - 2006 Kombinované doktorské studium na FJFI ČVUT
v Praze v oboru Jaderné inženýrství

Pracovní zkušenosti

Od roku 1985 pracovník FJFI ČVUT v Praze

pracovní zařazení:

1985 - 1988 studijní pobyt
1988 - 2000 odborný pracovník
od 2000 odborný asistent

manažerská a řídicí činnost:

1997 - 2007 vedoucí provozu reaktoru VR-1
2006 - 2007 zástupce vedoucího Katedry jaderných reaktorů
od 2008 vedoucí Katedry jaderných reaktorů

Pedagogická činnost

- aktuálně přednášené předměty pro studenty magisterského, bakalářského a doktorského studia: Provozní reaktorová fyzika, Využívání výzkumných reaktorů, Jaderný palivový cyklus, Provozní stavy jaderných reaktorů, Reaktorové praktikum, Metody Monte Carlo v pokročilé reaktorové fyzice, Bezpečnost a provoz výzkumných jaderných zařízení
- výuka na reaktoru v oblasti experimentální reaktorové fyziky, dynamiky reaktoru a provozu výzkumných reaktorů
- vedení doktorských, diplomových a bakalářských prací

Vědecko-výzkumná činnost a granty

- odborná činnost je zaměřena na experimentální reaktorovou fyziku, provozní reaktorovou fyziku jaderných elektráren, dynamiku výzkumných jaderných zařízení, jaderný palivový cyklus a na bezpečnost, provoz a využívání výzkumných jaderných zařízení

- řešitel mnoha projektů a grantů, např. v letech 2008 - 2013 řešitel výzkumného záměru Bezpečnost jaderných zařízení, 5 grantů MŠMT, 4 grantů MPO, jednoho grantu MV ČR nebo odborný garant projektu ESF OPPA

Funkce v odborných komisích a radách

- expert International Atomic Energy Agency v oblasti jaderného vzdělávání a metodologie výuky na výzkumných reaktorech
- člen vědecké rady Centra výzkumu Řež
- člen poradního orgánu jaderné bezpečnosti předsedkyně SÚJB (2008 - 2011)
- člen státní zkušební komise SÚJB pro ověřování zvláštní odborné způsobilosti vybraných pracovníků
- člen komise hodnotitelů Technologické agentury ČR výzkumného programu Beta a člen komise hodnotitelů Ministerstva průmyslu a obchodu ČR výzkumného programu TIP

Nejvýznamnější mezinárodní aktivity

- 12 expertních misí (IAEA Expert missions) v oblasti jaderného vzdělávání do Nigérie (2009), Bulharska (2010), Ghany (2011), Alžírsko (2012), Rakouska (dvakrát v roce 2012), Egypta (2012), Maroka (dvakrát v roce 2013), Jordánska (2013), Indonésie (2013) a Malajsie (2013)
- vědecká mise do Kuvajtu (2011)
- vyzvané přednášky na University of Tennessee, Knoxville, USA (2013), na Kyoto University, KURRI, Kumatori, Osaka, Japonsko (2008), v Centre national de l'énergie, des sciences et des techniques nucléaires (CNESTEN), Rabat, Maroko (2013) a v South African Nuclear Energy Corporation (NECSA), Pretoria, South Africa (2004)
- výuka pro studenty z technických universit z USA (University of Tennessee), z Velké Británie (University of Manchester a UK Defence Academy), Švédska (KTH Stockholm), Německa (TU Aachen) a Slovenska (STU Bratislava)