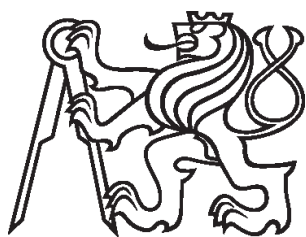


Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

Fakulta elektrotechnická

Malé modulární reaktory

Marek HOLEČEK

Vedoucí práce: Mgr. Ing. Vít Klein, Ph.D.
2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Holeček** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **491873**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Malé modulární reaktory

Název bakalářské práce anglicky:

Small modular reactors

Pokyny pro vypracování:

- 1) Konstrukce malých modulárních reaktorů.
- 2) Hlavní parametry malých modulárních reaktorů.
- 3) Možnosti použití malých modulárních reaktorů.
- 4) Závěrečná doporučení.

Seznam doporučené literatury:

- 1) Malé jaderné reaktory. [Online] <http://malereaktory.cz/smr-ve-svete>
- 2) Small Nuclear Power Reactors. [Online], <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
- 3) Advanced Small Modular Reactors. [Online] <https://www.energy.gov/ne/advanced-small-modular-reactors-smrs>
- 4) Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities. [Online] https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D. katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **08.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 20. 5. 2022

Marek Holeček

Poděkování

Mé poděkování patří především vedoucímu práce Mgr. Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D., za vedení práce, věcné připomínky k práci a zprostředkování schůzek s Ing. Viktorem Černým, místopředsdou představenstva a výkonným ředitelem Elektrárny Temelín II, a. s. Dále bych chtěl poděkovat právě jmenovanému Ing. Viktorovi Černému za cenné informace a jeho čas. V neposlední řadě děkuji také své rodině a přátelům, kteří mě při vytváření této práce podpořili.

Marek Holeček

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá technologií malých modulárních reaktorů. V práci jsou nejprve shrnuty typy konstrukcí malých modulárních reaktorů a jejich dělení. Jsou představeny hlavní parametry malých modulárních reaktorů jako pasivní bezpečnost, ochrana do hloubky či integrální uspořádání primárního okruhu. V druhé části práce je představeno jejich možné využití s důrazem na možnosti uplatnění v České republice. V této části je také nastíněna problematika legislativy a procesů s tím spojená. Je popsán současný stav této technologie a aktivity prováděné na našem území. Na základě těchto poznatků je naznačen mechanismus výběru varianty malého modulárního reaktoru pro ČR, zhodnocena aktuální situace České republiky, možný budoucí vývoj a uplatnitelnost této technologie.

Klíčová slova

Česká energetika, ČEZ, malý reaktor, malý modulární reaktor, reaktor, SMR.

Abstract

This thesis deals with the technology of small modular reactors. Firstly, the work here summarizes the types of construction of small modular reactors and their classifications. The main parameters of small modular reactors are introduced - such as passive safety, defence in depth or integral configuration of the primary components. Secondly, the possible uses of small modular reactors are explored, with emphasis on the prospects of their applications in the Czech Republic. This section also outlines issues with legislation and related processes. Finally, the current state of this technology and the activities carried out regarding small modular reactors are described. Based on the findings explored, the mechanisms for selecting the appropriate small modular reactor variant for the Czech Republic is discussed, possible future developments and the applications of this technology are evaluated.

Keywords

Czech energetics, ČEZ, Small Reactor, Small Modular Reactor, Reactor, SMR.

Obsah

1	Úvod	1
2	Konstrukce malých modulárních reaktorů	3
2.1	Definice SMR.....	3
2.2	Dělení technologií SMR.....	4
2.3	Princip fungování lehkovodních SMR.....	4
2.3.1	Tlakovodní reaktory.....	4
2.3.2	Varné reaktory	6
2.4	Princip fungování nelehkovodních SMR	7
2.4.1	Vysokoteplotní reaktory.....	7
2.4.2	Reaktory s roztavenými solemi.....	8
2.4.3	Rychlé reaktory	9
3	Hlavní parametry malých modulárních reaktorů.....	11
3.1	Pasivní bezpečnost	11
3.2	Ochrana do hloubky	11
3.3	Integrální uspořádání primárního okruhu.....	12
3.4	Tepelný a elektrický výkon.....	13
3.5	Flexibilita	13
3.6	Výroba vodíku.....	14
3.6.1	Vysokoteplotní elektrolýza	14
3.6.2	Power 2 gas	15
4	Možnosti použití malých modulárních reaktorů.....	17
4.1	Výhody a nevýhody SMR	17
4.2	Typy SMR vhodné pro výrobu elektrické energie v ČR.....	19
4.2.1	Reaktor SMART	20
4.2.2	Reaktor NuScale	21

4.2.3	Reaktor ROLLS ROYCE	23
4.3	Legislativa pro SMR.....	25
4.4	Vhodná uplatnění pro SMR.....	25
4.5	Výběr lokalit pro SMR	28
4.6	Aktivity ČR.....	28
4.7	Pilotní projekty	29
4.8	Výzkum SMR v ČR.....	31
4.8.1	Reaktor Energy Well	31
4.8.2	Reaktor HeFASTo	32
5	Závěrečná doporučení	33
5.1	Výběr varianty SMR v ČR	33
5.1.1	Kritérium dle typu reaktoru	33
5.1.2	Kritérium instalovaného výkonu	34
5.1.3	Kritérium připravenosti SMR.....	34
5.1.4	Kritérium plánovaného termínu uvedení do provozu.....	34
5.1.5	Kritérium lokality výrobce	34
5.1.6	Kritérium ceny investice	35
5.1.7	Výsledek výběru.....	35
5.2	Doporučení pro ČR.....	36
5.3	Doporučení pro zbytek světa	38
6	Závěr	39
7	Seznam literatury	41

Obrázky

Obr. 2.1: Schéma technologie tlakovodního reaktoru	5
Obr. 2.2: Schéma technologie varného reaktoru.....	6
Obr. 2.3: Schéma technologie rychlého reaktoru (chlazeného olovem).....	10
Obr. 3.1: Příklad ochrany do hloubky	12
Obr. 3.2: Způsoby akumulace el. energie	16
Obr. 4.1: Porovnání SMART reaktoru s konvenčním neintegrálním typem	20
Obr. 4.2: NuScale budova reaktoru	22
Obr. 4.3: Rolls-Royce budova reaktoru	24

Tabulky

Tab. 2.1: Význam zkratk typů SMR.....	4
Tab. 4.1: Typy zvažovaných SMR v ČR.....	19
Tab. 5.1: Přehled předpokládaných milníků zvažovaných SMR	34
Tab. 5.2: Výběr varianty SMR v ČR.....	35

Seznam zkratek

BWR	Boiling water reactor
ČEZ	ČEZ, a. s.
ČR	Česká republika
EIA	Environmental impact assessment
FOAK	First of a Kind
GFR	Gas-cooled fast reactor
HTGR	High-temperature Gas-cooled reactor
iPWR	Integral pressurized water reactor
LFR	Lead-cooled fast reactor
LR	Large Reactor
LWR	Light-water reactor
MMR	Medium Modular Reactors
MOX	Mixed OXide fuel
MSR	Molten salt reactor
MWe	Megawatt elektrický
MWt	Megawatt tepelný
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PR	Public relations
PWR	Pressurized water reactor
SFR	Sodium-cooled fast reactor
SMR	Malý modulární reaktor
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
ÚJV Řež	ÚJV Řež, a. s.

1 Úvod

Bez elektrické energie si život asi těžko dokážeme představit. Nároky na kvalitu i výkon elektrické sítě roste, vznikají nařízení o omezování některých emisních zdrojů, a tak vznikají návrhy a myšlenky, jakým směrem se bude energetika ubírat. Jednou takovou myšlenkou jsou malé modulární reaktory, které by mohly vhodně doplnit energetický mix a zajistit nezávislost na ropě či uhlí jako bezemisní zdroj. Zároveň by přispěly k energetické nezávislosti některých států či států s nedostatečnou elektrickou sítí jako lokální zdroj. Z druhého pohledu je ale otázka, jestli zajištění energetické nezávislosti států je politicky výhodné a jestli není výhodnější naopak zajistit závislost právě ropou nebo uhlím.

Důvodem popularity konceptu malých modulárních reaktorů (dále také SMR) je menší ekonomické zatížení oproti klasickým velkým reaktorům. S konvenční jadernou elektrárnou se váží velké jednorázové investice, velmi zdlouhavé procesy, případně nutnost velkého vodního toku, velkého pečlivě vytipovaného areálu a železnice. Proto se výzkum a vývoj soustředí na koncept SMR. Odvětví jaderné energetiky je také spojeno s přísnými zásadami a požadavky na bezpečnost. Malé reaktory jsou už ale ve skutečnosti používány přes 60 let například jako pohon jaderných ponorek, letadlových lodí, raketových křižníků nebo třeba ledoborců. První ponorka vybavená jaderným pohonem byla ponorka Námořnictva Spojených států amerických USS Nautilus, která vstoupila do služby už v roce 1954.¹ Pokusy byly i u použití „stacionárních“ reaktorů v odlehlých oblastech vojenských základen. Projekty byly zcela funkční, ale ekonomicky nevýhodné, proto se od nich ve své době opustilo. Ze zkušeností z těchto projektů se ale čerpá i dnes, a proto jsou již v dnešní době v provozu první zkušební zařízení SMR a kromě nich se po celém světě urychluje vývoj nových designů.

¹ NAVAL HISTORY AND HERITAGE COMMAND. *Nautilus IV (SSN-571)* [online].

2 Konstrukce malých modulárních reaktorů

2.1 Definice SMR

Malý modulární reaktor je definován jako jaderný reaktor do výkonu 300 MWe. Malé modulární reaktory se také označují zkratkou SMR (z angličtiny Small Modular Reactor). Jak název napovídá, tento speciální typ reaktoru je složen z jednotlivých modulů. S tím se pojí jisté výhody i nevýhody, ale samotná modulárnost přináší i jisté problémy s definicí. Příkladem by mohl být koncept malého modulárního reaktoru, který je složen z více modulů. Jeho výkon by poté mohl dosahovat výkonu velkého konvenčního reaktoru jaderné elektrárny. Pak nastává otázka, jestli ho stále nazývat jako malý.

Pokud výkon SMR překročí 300 MWe, poté bychom měli mluvit o středních modulárních reaktorech (MMR) do výkonu 700 MWe, popřípadě reaktorech velkého výkonu (LR) nad touto hranicí. Aby byla definice ještě více nepřesná, lze se setkat s označením SMR ve významu Small and Medium Reactors, která sdružuje malé a střední reaktory do stejné skupiny. Proto je potřeba brát pojem malé modulární reaktory spíše jako obecnou myšlenku, než jako označení pro konkrétní skupinu reaktorů.

Myšlenkou za konceptem SMR je tedy samotná modularizace. Modularizace může ale nabývat dvou významů. Prvním význam modularizace u SMR spočívá v hromadné výrobě modulů ve výrobním závodě a poté rozvoz na místa určená zákazníkem. To zaručí jednodušší a rychlejší postavení reaktoru na dané lokalitě. Aby byla přeprava efektivní a jednoduchá, snažíme se, aby každý modul pojal co největší část technologií reaktoru, například že jeden modul bude tvořit celý primární okruh. Složené moduly poté vytvoří jeden reaktor.

Modularizace se ale také používá ve významu, jeden modul rovná se jeden reaktor, tedy že výsledná jaderná elektrárna obsahuje tolik modulů, kolik reaktorů. To nemusí být vždy pravda. Tento význam je historicky spojený s konvenčními jadernými elektrárnami a často se užívá při výpočtech, kolik modulů (reaktorů) je pro určitý výkon elektrárny potřeba. Bohužel se oba významy u malých modulárních reaktorů často používají a je potřeba si dávat pozor a definici modularizace hodnotit jednotlivě.

2.2 Dělení technologií SMR

Z hlediska použité technologie dělíme malé modulární reaktory na lehkovodní, vysokoteplotní, s roztavenými solemi a rychlé. Tabulka 2.1 shrnuje typy technologií s příslušnými zkratkami užívané dále v práci.

Český název	Zkratka	Anglický název
Lehkovodní	LWR	Light-water reactor
Vysokoteplotní	HTGR	High-temperature Gas-cooled reactor
S roztavenými solemi	MSR	Molten salt reactor
Rychlé	LFR/SFR/GFR	Lead/sodium/gas-cooled fast reactor

Tab. 2.1: Význam zkratek typů SMR

2.3 Princip fungování lehkovodních SMR

Lehkovodní reaktory dále dělíme na tlakovodní (PWR) a varné (BWR). Rozdíl mezi tlakovodními reaktory a varnými reaktory je, že u varných se oproti tlakovodním ohřívá voda v reaktoru až do jejího varu. Ve světě existuje přes 300 LWR reaktorů zajišťujících přes 80 % instalované kapacity jaderných elektráren.²

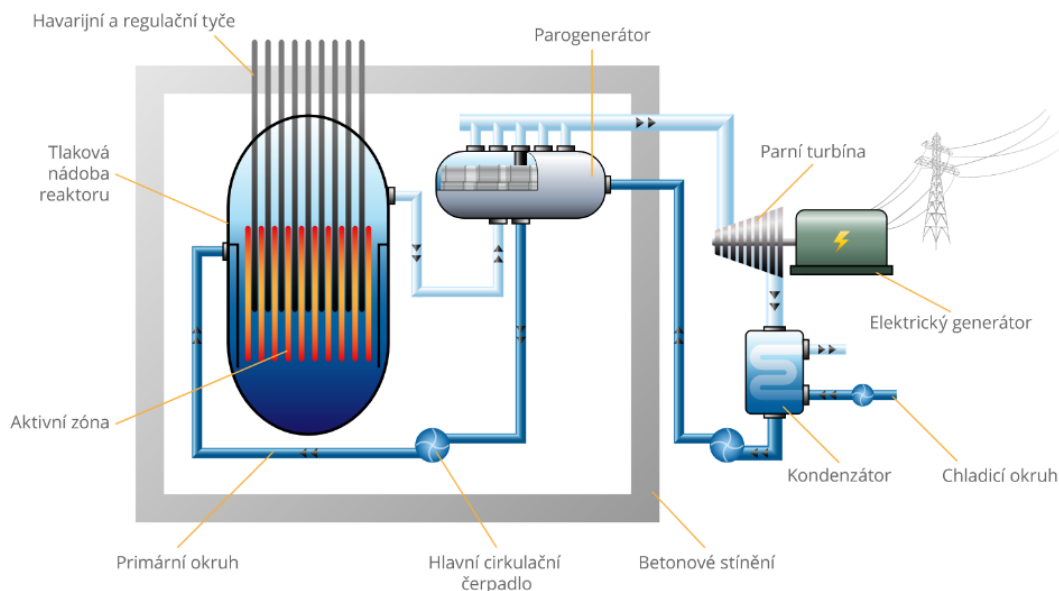
2.3.1 Tlakovodní reaktory

Tlakovodní reaktor je jaderný reaktor chlazený i moderovaný vodou. Voda cirkuluje v primárním okruhu pod vysokým tlakem, ohřívá se a následně předává svoji tepelnou energii sekundárnímu okruhu v parogenerátoru. Voda v sekundárním okruhu se přeměňuje na páru a pohání turbínu vyrábějící elektrickou energii. Tlakovodní reaktory využívají tedy tepelných neutronů. Tyto typy reaktorů jsou nejrozšířenější jaderné reaktory na světě. Jejich rozšířenost je způsobena jejich jednoduchým fyzikálním principem a rozšířeností vody. Voda v reaktoru zároveň slouží jako bezpečnostní prvek.

Se znalostmi tlakovodních reaktorů je spojené také dlouhodobě prověřené palivo i technologie palivových systémů. Palivem tlakovodních reaktorů je obohacený uran ve formě

² ČEZ. *Typy reaktorů* [online].

tabletek oxidu uraničitého (UO_2) uspořádané do palivových tyčí. Velká rozšířenost tohoto paliva zaručuje větší výběr na trhu. Výměna paliva probíhá standartně jednou za 1 až 2 roky.



Obr. 2.1: Schéma technologie tlakovodního reaktoru³

Nevýhody tlakovodního řešení jsou dané jeho fyzikálním řešením. Voda musí být provozována za vysokého tlaku (15,7 MPa), s vysokým tlakem se váží technologické komplikace a dražší materiály. Vyhořelé palivo je po využití stále vysoce radioaktivní, využitelnost štěpného paliva je tak poměrně malá v porovnání s ostatními technologiemi jaderných reaktorů. Teplota admisní páry dosahuje přibližně pouze 300 °C. S nižší teplotou klesá účinnost celé výroby elektrické energie.⁴

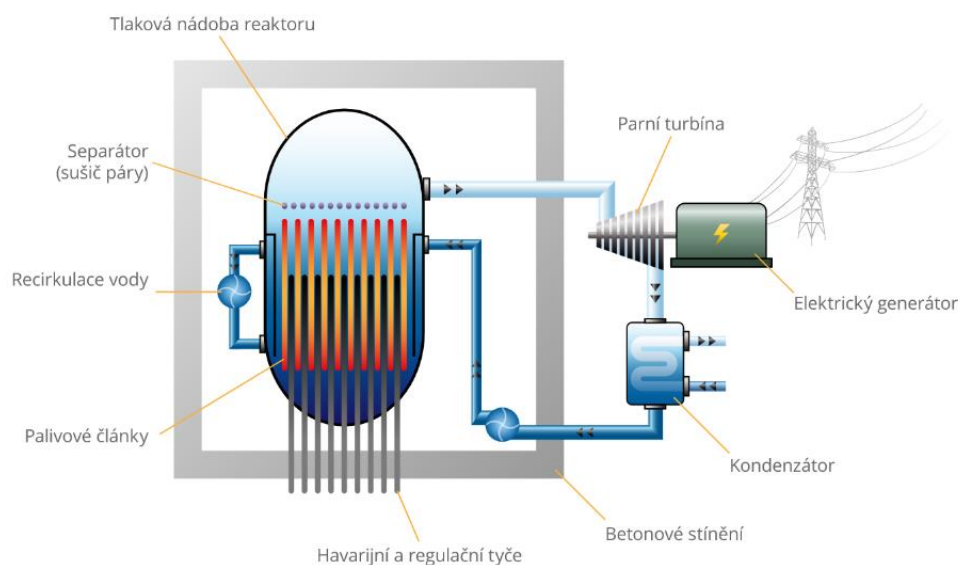
Cílem malých modulárních reaktorů je integrovat pokud možno co největší část primárního okruhu, projekty obvykle počítají s integrací reaktoru, oběhových čerpadel, parogenerátorů a kondenzátorů. Tato integrace by měla zajistit ještě větší bezpečnost tlakovodních reaktorů a snazší manipulaci.

³ ČEZ. *Typy reaktorů* [online].

⁴ NEJEDLÝ, Petr. *ČEZ – Malé modulární jaderné reaktory (SMR)* [přednáška].

2.3.2 Varné reaktory

Varné reaktory jsou po tlakovodních druhé nejrozšířenější reaktory. Aktivní zóna je podobná tlakovodnímu reaktoru. Palivem je znovu mírně obohacený uran formou oxidu uranu (UO_2) ve formě tabletek uspořádaných do palivových tyčí. Jako chladivo i moderátor slouží voda, dříve se používal ale i grafitový moderátor. Ve varném reaktoru se voda ohřívá až do jejího varu, a to přímo v nádobě reaktoru. Při výparu, ke kterému při varu dochází, vzniká pára, která se hromadí ve vrchní části této nádoby. Tato pára se následně vysuší a poté je prohnána přes turbínu, kterou roztáčí.



Obr. 2.2: Schéma technologie varného reaktoru⁵

Varné elektrárny se vyznačují pouze jedním okruhem. Výhodou jednookruhového systému je lepší tepelná účinnost než u víceokruhových typů. Je to způsobeno menšími ztrátami, které byly omezeny odstraněním přestupů mezi jednotlivými okruhy. Varné reaktory mají také jednodušší a levnější konstrukci, nepotřebují totiž parogenerátory ani jiné tepelné výměníky.

⁵ ČEZ. *Typy reaktorů* [online].

Další výhodou varných reaktorů je menší tlak vody v primárním okruhu, oproti tomu nevýhodou jsou menší teploty admisní páry (286 °C) a tedy menší účinnost. Varné reaktory jsou také méně bezpečné, turbínou protéká radioaktivní voda. Pobyt v těsné blízkosti je tedy potenciálně nebezpečný.⁶

2.4 Princip fungování nelehkovodních SMR

Nelehkovodní reaktory jsou jaderné reaktory charakteristické jiným palivem než reaktory lehkovodní. Palivo dosahuje vyšších teplot a tím zajišťuje vyšší účinnost. Pro zajištění vyšších teplot musí být použita pokročilá technologie spolu se speciálními materiály. Reaktory na nelehkovodním principu nejsou časem odzkoušené, není dostatek zkušeností s jejich provozem, jejich technologií, jejich řízením výkonu v čase. Nedostatek zkušeností zvyšuje riziko špatného projektu a prodlužuje dobu licencování. To je také důvod, proč nejsou často v dnešní době preferovány jako první SMR projekty.

2.4.1 Vysokoteplotní reaktory

Vysokoteplotní reaktory jsou jaderné reaktory fungující na principu práce při teplotách okolo 1000 °C, tedy s vyšší účinností celého cyklu. Vysokoteplotní technologie využívá pomalé neutrony a moderátor na bázi uhlíku. Jako chladivo je kvůli vysokým teplotám využit invertní plyn, často užívaným plynem bývá helium. Helium předá v parogenerátoru teplo vodě v sekundárního okruhu. Z vody vzniká pára, která pohání turbínu. Tlak uvnitř primárního okruhu dosahuje pouhých 6 MPa.⁷

Vysoké teploty těchto reaktorů umožňují vyrábět kromě elektrické energie také vodík z vody s velkou účinností. To je také jedno s hlavních diskutovaných použití tohoto typu reaktoru. Kromě výroby vodíku se také uvažuje o odsolování mořské vody či kogeneraci výroby elektřiny a tepla.

Vysokoteplotní reaktory využívají tzv. TRISO palivo, jedná se o kuličky paliva s průměrem 0.9 mm integrované do palivových celků. Tyto kuličky obsahují 0.5 mm jádro z

⁶ ČEZ. *Typy reaktorů* [online].

⁷ Tamtéž

UO₂ obohaceného maximálně do 20 %. Jádro je poté obaleno třemi vrstvami, dvěma vrstvami uhlíku a mezivrstvou z karbidu křemíku. Tyto vrstvy pomáhají udržet štěpné produkty uvnitř i za vysokých teplot a tím zvyšují bezpečnost. Kuličky paliva jsou poté integrovány do palivových celků. TRISO palivo má také vysokou tepelnou účinnost a nízké náklady. Vysokoteplotní reaktory dovolují vyšší vyhoření tohoto paliva a tím redukuje vzniklý jaderný odpad.

Z nelehkovodních typů reaktorů se jedná o nejvíce vyvinutou variantu, mnohé státy mají téměř připravenou technologii ke komerčnímu použití, nicméně zkušenosti s vyhořelým palivem této varianty jsou stále nízké.⁸ Komerčnímu využití vysokoteplotních reaktorů také brání nároky na celkovou konstrukci a potřebu použít pečlivě vybrané materiály, které vydrží vysoké teploty.

2.4.2 Reaktory s roztavenými solemi

Reaktor s roztavenými solemi je založen na principu rozpuštěného paliva v roztavených solích. Soli se používají například na bázi fluoru a tato solná směs slouží jako chladivo aktivní zóny. Historicky byly sice testovány, ale v komerčních podmínkách je zkušeností například s regulovatelností jejich výkonu stále velmi málo.⁹ Dříve se tyto reaktory testovaly s tepelnými neutrony, moderátorem byl obvykle grafit, ale ukázalo se, že by mohly být potenciálně nebezpečné z hlediska zneužití jaderného materiálu. Proto se nově prosazují reaktory s rychlými neutrony bez potřeby moderátoru. Myšlenkou této varianty je spojit výhody rychlých reaktorů, tedy například využití vyhořelého paliva z lehkovodních reaktorů a zároveň umožnit provoz za nízkého tlaku. Nízký tlak výrazně zjednodušuje problematiku konstrukce. Jelikož mají tekuté soli vysokou objemovou tepelnou kapacitu i teplotu varu, považují se za více bezpečné a umožňují menší rozměry než LWR.¹⁰ Uvažuje se o vysokoteplotním využití, které by umožnilo produkci vodíku s vysokou účinností či využití vzniklého tepla k chemickým procesům v průmyslu.

⁸ NEJEDLÝ, Petr. *ČEZ – Malé modulární jaderné reaktory (SMR)* [přednáška].

⁹ Tamtéž

¹⁰ Tamtéž

2.4.3 Rychlé reaktory

Rychlé reaktory jsou reaktory založené na principu štěpení jaderného paliva pomocí rychlých neutronů. Rychlé reaktory se dále dělí dle chladiva na rychlé reaktory chlazené tekutými kovy (olovo, sodík) či plynem (helium). Palivo je podobné palivu lehkovodních reaktorů, používány jsou palivové tyče s oxidem uranu či přepracovaného použitého paliva MOX. Výhodou rychlých reaktorů je nižší tlak chladiva oproti LWR technologii. Nižší tlak zvyšuje bezpečnost reaktoru a umožňuje využití jednodušších technologií konstrukce. Výstupní teplota je oproti LWR vyšší, účinnost dosahuje až 50 %. Palivo je využíváno z větší části než LWR a existují projekty s dlouhou životností bez výměny paliva v řádu desítek let. Zkušenosti s rychlými reaktory sice existují, ale většinou pouze u států, které je provozují.

2.4.3.1 Reaktory chlazené heliem

Reaktory chlazené heliem jsou reaktory pracující při velmi vysokých teplotách, teplota helia může dosahovat až 850 °C.¹¹ To je také důvod použití plynu helia a ne vody. Tepelný cyklus je velmi efektivní, kromě výroby elektrické energie se uvažuje také o výrobě vodíku či využívání tepla pro průmyslové účely. Jelikož se využívá plynu, je potřeba pro výrobu elektrické energie využít plynovou turbínu. Některé projekty plánují využít zbytkové teplo plynu pro výrobu páry v parogenerátoru a následně páru využít v parní turbíně. Využívá se tedy kombinace plynové a parní turbíny. S vysokou teplotou se váže problematika vývoje vysokoteplotních materiálů a palivových částí.

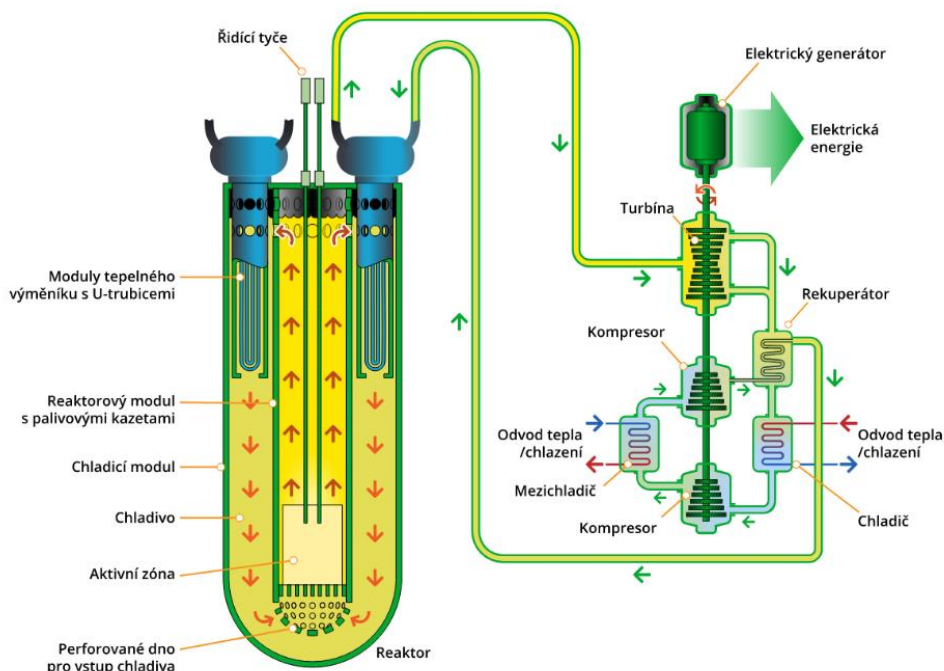
2.4.3.2 Reaktory chlazené roztaveným olovem

Další variantou rychlých reaktorů je reaktor chlazený roztaveným olovem nebo olovnaté směsí. Olovo nebo jeho směsi umožňují cirkulaci díky přirozené konvekci a práci při nízkém tlaku. Teplota chladiva běžně dosahuje 500 °C, ale s vývojem speciálních vysokoteplotních materiálů se odhaduje její zvýšení na 850 °C.¹² Vysoká teplota by mohla v budoucnu také zajistit možnost výroby vodíku. Teplo odvedené olovem v primárním okruhu by mohlo být následně transportováno do sekundárního okruhu, který by byl

¹¹ PUCHNAR, Jiří. *Reaktory 4. generace - rychlé reaktory FNR a další* [online].

¹² Tamtéž

chlazen plynem. Výhodou tohoto typu reaktoru je jeho možnost pracovat s vyhořelým palivem lehkovodních reaktorů.¹³ Použití nízkého tlaku a kapalného kovového chladičího prvku se ukazuje jako velmi bezpečné, a proto se nemusí tolik řešit technické bezpečnosti prvky okolního systému.



Obr. 2.3: Schéma technologie rychlého reaktoru (chlazeného olovem)¹⁴

2.4.3.3 Reaktory chlazené tekutým sodíkem

Poslední uvedenou variantou rychlých reaktorů je rychlý reaktor chlazený tekutým sodíkem. Sodík chladí aktivní zónu při nízkém tlaku a jeho teplota dosahuje nad 500 °C. Tento typ reaktoru dokáže vyrábět plutonium z přírodního neobohaceného uranu a také toto plutonium štěpit. Teplo vzniklé v primárním okruhu je obvykle předáváno přes sekundární sodíkový okruh až do terciárního okruhu, který teprve obsahuje parní turbínu vyrábějící elektrickou energii. Sekundární sodíkový okruh slouží k oddělení primárního okruhu s radioaktivním sodíkem a terciálním parním okruhem na výrobu elektrické energie. Tím je zajištěna dodatečná bezpečnost.

¹³ ČEZ. *Malé a mikro reaktory* [online].

¹⁴ Tamtéž

3 Hlavní parametry malých modulárních reaktorů

3.1 Pasivní bezpečnost

Prvním hlavním parametrem malých modulárních reaktorů je pasivní bezpečnost. Pasivní bezpečnost je myšlenka použití co nejméně aktivních částí v reaktoru. K zajištění této myšlenky se využívají základní fyzikální principy. Jedním z nich je pád bezpečnostních tyčí v případě potřeby rychlého odstavení reaktoru pomocí gravitace. U tlakovodních reaktorů může být využito rozdílů tlaků mezi primárním okruhem a zásobníku vody s kyselinou boritou. Pokud poklesne tlak v primárním okruhu, automaticky se začne vodou plnit primární okruh. Pasivní bezpečnost cílí také na omezení použití cirkulačních čerpadel, elektricky ovládaných částí a volí pasivní přirozené proudění či vedení způsobené rozdílem teplot.¹⁵

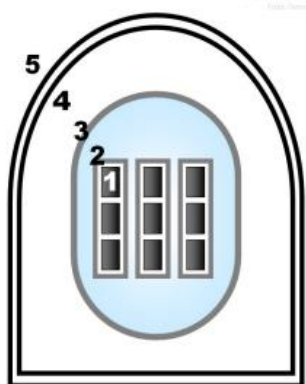
Dalším příkladem použití pasivní bezpečnosti je zamezení úniku chladiva. Vodou chlazené reaktory na tento problém využívají kombinaci aktivních a pasivních systémů. Pokud by se ale použil jiný druh chladiva s vysokým bodem varu (olovo, sodík, roztavené soli), nehrozilo by vypaření ani porušení primárního okruhu. S využitím pasivních prvků se zjednoduší konstrukce a koncept reaktoru, ale zároveň se ztíží naprojektování reaktoru s pasivní bezpečností tak, aby nebyla jeho funkce omezena. Důraz je také kladen na případné dochlazení reaktoru bez elektrické energie. S myšlenkou pasivní bezpečnosti je spojena ochrana do hloubky.

3.2 Ochrana do hloubky

Ochrana do hloubky je způsob ochrany při případné havárii jaderného zařízení. Nástrojem je vytvoření několika od sebe oddělených vrstev, které v případě uvolnění záření či nebezpečných materiálů dokážou ochránit okolí reaktoru i potencionální lidské životy. U malých modulárních reaktorů je myšlenka ochrany taková, že při havárii reaktoru

¹⁵ ŠKOLA, Ivo. *Přirozená bezpečnost jaderných elektráren* [online].

nebude ohroženo ani bezprostřední okolí, které by v mnoha případech mohlo být bydliště civilistů. Tento požadavek je velmi náročný na návrh celého zařízení, jeho konstrukci s využitými materiály, typ reaktoru a testování.



Obr. 3.1: Příklad ochrany do hloubky ¹⁶

Na obrázku 3.1 je příklad reaktoru s pěti oddělenými vrstvami. Primární bariérou (1, 2) je matrice paliva a plášť palivových tyčí, který udržuje v běžných podmínkách radioaktivní materiál uvnitř aktivní zóny. Pokud se tato vrstva poruší, sekundární bariérou je samotná nádoba reaktoru (3). Pokud dojde k větší havárii, poslední ochranou je kontejnment (4, 5) složený z více vrstev, který je schopen odolat nejenom vnitřním, ale i vnějším podmínkám.

3.3 Integrální uspořádání primárního okruhu

Malé modulární reaktory často využívají integrálního uspořádání primárního okruhu. To znamená, že jaderné palivo, regulační tyče, cirkulační čerpadla i parogenerátory jsou umístěny v jedné tlakové nádobě. Tato nádoba se pak nachází v samotném kontejnmentu. Důvod tohoto uspořádání je vyšší bezpečnost a snaha o minimalizování potenciálních nehod, které mohou v reaktoru nastat. Pokud by v reaktoru i tak nastala nehoda, integrální uspořádání by mělo co nejvíce potlačit vážnost škod. Druhotným důvodem integrálního uspořádání je snaha o minimalizování počtu modulů nutné k přepravě na místo výstavby. Tím se zjednoduší nejenom přeprava na danou lokaci, ale i jednoduchost a rychlost výstavby.

¹⁶ FANNING, Thomas. *Defense in Depth* [online].

3.4 Tepelný a elektrický výkon

Mnoho projektů považuje vyrábět pouze elektrickou energii za nedostatečné a ekonomicky nevýhodné. Proto se uvažuje o využití těchto projektů pro výrobu jak elektřiny, tak tepla. Koncept se zdá být výhodný zejména díky povaze malých modulárních reaktorů a jejich umístění na výhodné pozice pro využití tepla, tedy blízko bydlišť, průmyslových komplexů či odlehlých oblastí.

3.5 Flexibilita

Jedním z cílů malých modulárních reaktorů je flexibilita. Flexibilita reaktoru umožňuje přizpůsobovat se proměnlivým požadavkům na výrobu elektrické energie, tedy možnost rychlé změny výkonu v čase.

Konvenční jaderné elektrárny totiž flexibilní tolik nejsou. Hlavní aspekt je čistě ekonomický. Výstavba konvenční elektrárny je velmi drahá, náklady spojené s provozem včetně paliva jsou ale relativně nízké. Proto je snaha maximalizovat výkon elektrárny po co nejdélší dobu. To je také důvod používání velkých bloků jaderných elektráren v základním zatížení spotřeby.

Druhý aspekt je technologický. Rychlé změny výkonu na čase snižují životnost jednotlivých dílů reaktoru z důvodu tepelných roztažností a různých pnutí. Navíc je potřeba brát ohled na palivový cyklus. Palivo se musí navrhovat podle plánované využitelnosti a typu zatížení. Při nečekané změně zatížení by palivo nebylo využito do takové míry, do které bylo plánováno a tím pádem by docházelo k nevyužití celého potenciálu paliva a neekonomickému plýtvání.

Dle nejnovějších evropských standardů musí být reaktor schopen reagovat alespoň 3 procenta reaktorového výkonu za minutu.¹⁷ U nových návrhů malých modulárních reaktorů ale i konvenčních bloků je snaha o flexibilitu ještě větší, a to minimálně o změnu 5 % výkonu za minutu.

¹⁷ ŽIŽKA, Jan. *Flexibilita jaderných elektráren – šance pro zastávce atomu?* [online].

3.6 Výroba vodíku

Kromě elektrické a tepelné energie se uvažuje o možnosti používat malé modulární reaktory pro výrobu vodíku. K tomu by mohl sloužit momentálně nevyužívaný elektrický výkon reaktoru. Tedy místo snížení elektrického výkonu reaktoru z důvodu nižší poptávky se začne druhotně vyrábět vodík. Vodík může sloužit jako chladiivo, palivo, či jako akumulace elektrické energie. O použití vodíku jako paliva se uvažuje mimo jiné díky myšlence Green Dealu omezit produkování zplodin do okolního prostředí. O využití se uvažovalo například v automobilovém průmyslu, nicméně pro zavedení tohoto pohonu by bylo potřeba předělat motory, vytvořit infrastrukturu, čerpací stanice a zajistit levnou a hromadnou výrobu. Právě poslední bod je největším problémem, výroba vodíku není v dnešní době ekonomicky výhodná.

Malé modulární reaktory by k výrobě mohly využít technologicky jednoduchou, přesto efektivní elektrolýzu vody. Elektrolýza vody je proces, při kterém prochází elektrolytem elektrický proud a na elektrodách se štěpí molekuly vody na kyslík a vodík. Tyto prvky v plynném skupenství se poté odvádějí a ukládají. Elektrolýzu vody dělíme na tři varianty, nízkoteplotní alkalickou elektrolýzu s kapalným bazickým elektrolytem, kyselou elektrolýzu s polymerním membránovým elektrolytem a vysokoteplotní elektrolýzu s pevným elektrolytem.¹⁸ Nízkoteplotní elektrolýza je dlouhodobě komerčně provozována, není tolik investičně náročná, nicméně má nízkou účinnost a není flexibilní. Naopak kyselá elektrolýza je flexibilní, ale investičně náročná. Díky své flexibilitě se postupně začíná komerčně využívat.

3.6.1 Vysokoteplotní elektrolýza

Vysokoteplotní elektrolýza je třetí a nejméně vyzkoumaná a používaná varianta. Důvodem malého využití je potřeba zajištění teploty kolem 800 °C a odolných materiálů s tím spojených. Flexibilita této varianty není kvůli potřebným vysokým teplotám její silnou stránkou. Naopak vysoké teploty umožňují velmi dobrou účinnost a její ztráty se blíží

¹⁸ KOLMANOVÁ, Marie. Vysokoteplotní elektrolýza: „čistá“ výroba vodíku s možností zpětné konverze.

nule. Tepelná energie také částečně nahrazuje podíl elektrické energie, tedy se zdá výhodná při použití s odpadním či nevyužitým teplem. Kromě samotné elektrolýzy je možné navázat dalšími chemickými procesy jako například redukcí oxidu uhličitého CO_2 na metan. Metan může být poté využit místo zemního plynu v plynovodech. Tato technologie se zdá zvláště výhodná pro jaderné reaktory. Využití vysoké teploty chladiwa na výstupu z reaktoru se zdá být pro vysokoteplotní elektrolýzu ideální, podstatně by se snížila spotřeba elektrické energie na výrobu vodíku. Elektrolýza by také vyrovnala výchyly způsobené výkyvy ve výkonu reaktoru z důvodu poptávky a jaderný reaktor by se tak udržel v optimálním provozu.¹⁹

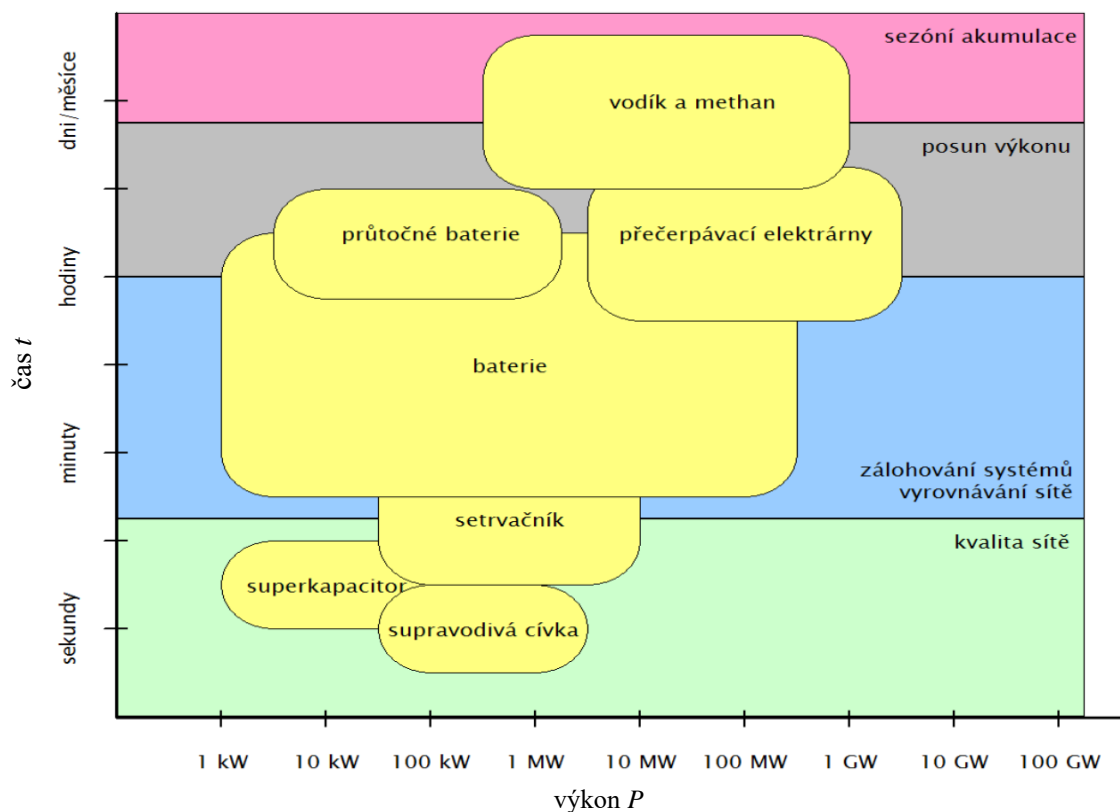
3.6.2 Power 2 gas

S rozvojem obnovitelných zdrojů energie roste snaha o ukládání energie. Pokud bude rozvoj OZE pokračovat, bude potřeba ukládat velké množství energie na dlouhé doby. Z obrázku 3.2 je patrné, že v dnešní době je nejdelší možnou variantou uložení s rozumně velkými výkony přečerpávací elektrárna. Podíváme-li se na dobu, na jak dlouho se do ní energie ukládá, pohybujeme se v denním cyklu, řádově tedy 1 den.

Vybudování dalších přečerpávacích elektráren je značně nepravděpodobné. Pro uložení velkého množství energie je potřeba velká plocha, dvě nádrže na vodu. V minulosti se řešila výstavba horních nádrží uřezáváním vršku kopců. Většina nových potenciálních míst v České republice se nachází buď v chráněných oblastech nebo v oblastech, kde by seříznutí kopce značně poškodilo vzhled krajiny a projekt by vzbudil nevoli u veřejnosti.

S myšlenkou rozšiřování solárních či větrných elektráren tedy naroste potřeba akumulace elektrické energie. V případě větrných elektráren vzroste potřeba minimálně v řádu dní, v případě solárních elektráren dokonce v řádu měsíců. Dnešní technologie na tento požadavek není připravena. Jednou z možností sezónní akumulace by bylo použití velkých bateriových systémů, jejich cena je ale stále vysoká a k hromadnému využití neekonomická.

¹⁹ KOLMANOVÁ, Marie. Vysokoteplotní elektrolýza: „čistá“ výroba vodíku s možností zpětné konverze.



Obr. 3.2: Způsoby akumulace el. energie ²⁰

Druhou z možností sezónní akumulace je využití výroby vodíku či metanu, který může být následně využit. Výhodou metanu je jeho možné použití místo zemního plynu, tedy stejných zařízení i infrastruktury. Čistý vodík lze do infrastruktury zemního plynu také přidávat, ale existuje omezení přibližně 2 % objemových.²¹ Vyšší množství vodíku by předně způsobilo potíže u stávajících přístrojů na zemní plyn, ale pokud by se provedly drobné úpravy, bylo by se možné dostat až na 10 % objemových.²² Vodík má oproti zemnímu plynu nižší výhřevnost, tedy na stejné energetické požadavky je ho potřeba o 70 % více, nicméně má menší odpor a tedy teče rychleji. Proto se v malých procentech problémy s přepravou neprojeví. Velmi malé molekuly vodíku by mohly způsobit difundování skrz ocelové materiály či dokonce praskání svarů. Při použití čistého vodíku by se musela vybudovat zcela nová infrastruktura a spotřebiče s tím spojené.²³

²⁰ HRZINA, Pavel. *Akumulace el. energie a elektrochemické zdroje energie - princip* [Prezentace].

²¹ VOBOŘIL, David. *Power to Gas - budoucnost akumulace elektřiny?* [online].

²² MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Vodíková strategie české republiky* [online].

²³ Tamtéž

4 Možnosti použití malých modulárních reaktorů

4.1 Výhody a nevýhody SMR

Hlavní výhodou konceptu malých modulárních reaktorů je jejich nižší cena. S nižší cenou je spojeno i nižší riziko pro investory a je tedy předpokládáno, že investoři budou tuto formu investice preferovat před konvenční jadernou elektrárnou (dále také JE). Svě investice lze u některých variant SMR rozložit do více modulů, tedy pokud se bude investice do prvního modulu zdát jako výhodná, je prostor pro investice další. Ve výsledku mohou moduly zajistit i výkon srovnatelný s konvenční elektrárnou bez tak velkého rizika a rychlejší výstavbou. Zároveň je ale stále potřeba si uvědomit, že i přes nižší cenu je cena stále vysoká a hlavní část tvoří fixní náklady. Variabilní náklady jsou podobně jako u konvenční JE malé. Pokud bychom chtěli stanovit časový rámec projektu (od začátku do konce), projekt jednoho kusu SMR je až na 120 let. Tato hodnota se ale může lišit v případě prvního SMR svého druhu v ČR nebo kvůli stanovování pozemků a uznání všech povolení. S dlouhým časovým horizontem je spojena dlouhá a pečlivá analýza, jestli a kde se projekt vyplatí.

Se zvyšujícím se zájmem o SMR přibude zájem o jejich modularizaci. Případné investice do modulů by byly nezávisle rozloženy a umožňovaly by postupnou rozšiřovatelnost. To je ale otázka budoucnosti, až a jestli budou SMR rozšířené. Aby tato myšlenka fungovala, musí se cílit na sériovou výrobu. Ta umožní použít jednodušších, a tedy levnějších postupů na výrobu jednotlivých modulů a tím výrazně snížit výslednou cenu. Zároveň se tím zjednoduší a zrychlí výstavba reaktoru na dané lokalitě.

Jednotlivé moduly SMR musejí do sebe koncepčně zapadat. Ideálem by tedy bylo zakoupit moduly od určitého subjektu s jistotou, že tento subjekt bude stále na trhu a bude možné od něj další moduly podle potřeby nakoupit, anebo si vyžádat jeho technickou podporu v rámci elektrárny.

V případě nutnosti oprav lze daný modul odvést a místo něj přivést nový, dopředu výrobcem vyrobený. Tím se ušetří čas nečinnosti dané části elektrárny. Tento systém oprav

se zdá být zatím jediná varianta oprav pro vzdálené oblasti bez kvalifikovaného personálu. S menší velikostí souvisí zjednodušení přepravy částí reaktoru pomocí nákladních aut bez nutnosti komplikovaných a zdlouhavých způsobů.

Jelikož je SMR nová technologie stále ve vývojové fázi, nelze přesně stanovit cenu, kolik by v realitě mohl projekt SMR stát. Cena může být sice odhadnuta, ale tlak ze strany výrobců je cenu odhadovat nižší, než která ve skutečnosti bude. Proto je důležité brát cenový rámec projektů SMR s rezervou a počítat s cenou vyšší.

Klasické konvenční elektrárny potřebují kvalifikovaný personál, stálý dohled a mnoho zaměstnanců. SMR jsou koncipovány tak, aby potřebovaly co nejmenší zásah. Mají být bezpečnější než klasické konvekční, jejich palivo by se měnilo několikanásobně méně. Některé koncepty dokonce plánují palivo ponechat po celou dobu životnosti (desítky let) a bezúdržbovost. To má za následek snížení nákladů. V konvenčních elektrárnách se pro srovnání palivo vyměňuje jednou až dvakrát za 2 roky.

Jako nevýhoda může být považováno nelehké zajištění ochrany proti zneužití jaderného paliva či sabotáže. Koncepty SMR jsou ale technologicky bezpečné jaderné reaktory. Koncepty se poučily z chyb v minulosti a cílí také na pasivní bezpečnost i ochranu do hloubky. Další nevýhodou může být nepřipravenost konceptu SMR či nalezení ekonomicky výhodnějšího zdroje využívající jiné palivo. Tím, že se stále jedná o jaderný zdroj elektrické energie, může vznést reaktor nevoli veřejnosti být umístěn vedle jejich bydliště z důvodu potencionálního nebezpečí. Tomu může ještě negativně pomoci jednání protijaderných aktivistických skupin či organizací.²⁴

Většina vzniklých designů SMR se jeví jako nevhodná a nemožná realizace, do pozdější fáze projektu se dostane minimum designů. Tento jev může vyvolat dojem neprofesionality a zhoršit PR SMR. Dalšími riziky a nevýhodami jsou záležitosti spojené s nečekanými změnami legislativy, nepřipraveností českého průmyslu, nekonkurenceschopností či politickou situací.

²⁴ ČEZ. *Malé modulární reaktory SMR* [přednáška].

Náklady provozu SMR jsou vyšší ve srovnání s konvenční jadernou elektrárnou na jednotku vyrobené energie. Je to způsobeno centralizací a koncentrací výroby konvenčních reaktorů do jedné oblasti. To je také jeden z důvodů, proč historicky vznikaly právě tyto typy velkých elektráren.

4.2 Typy SMR vhodné pro výrobu elektrické energie v ČR

Před výstavbou SMR je potřeba vybrat vhodný projekt pro podmínky České republiky. Zajímavých konceptů je mnoho, pro představu je jich pozorováno přes 30. Není ale očekáváno, že Česká republika bude první zemí, která začne tyto reaktory stavět. Malé modulární reaktory jsou vyvíjeny zejména ve státech považovaných za jaderné mocnosti. Těmito státy jsou USA, Rusko, Čína, Japonsko a Jižní Korea. Evropské projekty také existují, nejvýznamnějšími státy jsou Velká Británie a Francie, ale vývoj ve Francii je oproti výše jmenovaným státům značně pomalejší. Česká republika momentálně spolupracuje s významnými světovými projekty (NuScale, Rolls-Royce, GE-Hitachi a další).

Parametr	Název projektu					
	SMART	NuScale	UK SMR	SMR160	BWRX300	NUWARD
Typ reaktoru	iPWR	iPWR	PWR	PWR	BWR	iPWR
$P_{inst} - tep$ [MWt]	365	200/modul	1276	525	870	2 x 540
$P_{inst} - el$ [MWe]	107	60/modul	470	160	270-290	2 x 170
Oběh	Nucený	Přirozený	Nucený	Přirozený	Přirozený	Nucený
Typ paliva	UO ₂ /17x17	UO ₂ /17x17	UO ₂ /17x17	UO ₂	UO ₂ /10x10	UO ₂ /17x17
Obohacení	< 5 %	< 5 %	< 5 %	< 5 %	< 5 %	< 5 %
Kampaň [měs.]	30	24	18-24	24	12-24	24
Bezpeč. systém	Pasivní	Aktivní	Pas. i Akt.	Pasivní	Pasivní	Pasivní
Životnost [roky]	60	60	60	80	60	60

Tab. 4.1: Typy zvažovaných SMR v ČR²⁵

V tabulce 4.1 jsou zapsány jednotlivé typy SMR zvažované pro využití v České republice podle ČEZ. Z tabulky je patrné, že všechny zvažované koncepty jsou lehkovodní reaktory, většina z nich tlakovodního integrálního typu. Výkon jednotlivých variant je

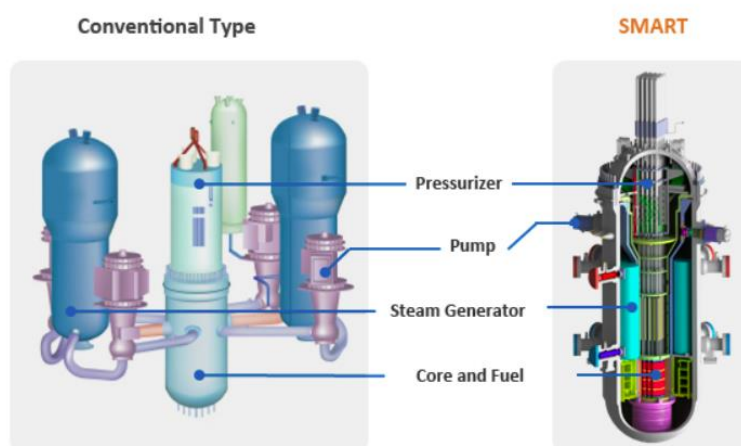
²⁵ ČEZ. *Přehled technologií SMR zvažovaných pro ČR* [přednáška].

různý, a to jak tepelný, tak i elektrický. Palivem se používá standardní oxid uranu, zkrácený, obohacený do 5 %. Obohacení se zdá dostačující a bezpečné i v případě terorismu nebo sabotáže. Kampaň reaktoru je u všech zmiňovaných typů přibližně 2 roky.

Dalšími dnes už nezajímavými koncepty, které byly v minulosti zkoumány, je koncept amerického lehkovodního PWR reaktoru mPower či ruského rychlého SVBR-100. Dle posledních informací opustil ČEZ všechny koncepty ruských a čínských SMR z čistě politických důvodů.²⁶ V další části jsou popsány 3 nejvýznamnější varianty zvažované pro ČR.

4.2.1 Reaktor SMART

Korejský SMART je reaktor dvoublokového uspořádání lehkovodní technologie. Reaktor je integrálního typu s plánovaným výkonem 107 MWe. Mezi Jižní Koreou a Saudskou Arábií vznikla dohoda o rozvoji projektu, která cílí na výstavbu v Saudské Arábii do roku 2027. Odhadovaná cena za postavení první jednotky činí 1 miliardu dolarů.



Obr. 4.1: Porovnání SMART reaktoru s konvenčním neintegrálním typem²⁷

Na obrázku 4.1 je znázorněn rozdíl mezi konvenčním neintegrálním typem reaktoru a integrálním typem SMART. Integrální uspořádání reaktoru zamezuje nutnosti propojení jednotlivých částí primárního okruhu pomocí venkovních trubek a tím výrazně snižuje

²⁶ ČERNÝ, Viktor. *ČEZ – Malé modulární jaderné reaktory v ČR* [přednáška].

²⁷ SMART POWER COMPANY. *SMART Technology : Design* [online].

možnost havárie spojené se ztrátou chladiva. Zároveň toto uspořádání zlehčuje dopravu na lokalitu výstavby a zrychluje následnou montáž.

Reaktor SMART kromě výroby elektrické energie dovoluje také produkovat 90 MW elektrického výkonu a 40 milionů litrů odsolené vody za den. Předběžně se odhaduje, že toto množství pitné vody a elektrické energie by mohlo vystačit 100 000 lidem. Dále se uvažuje o využití v izolovaných oblastech či o dodávce elektrické energie pro průmyslové objekty.

Původní design reaktoru obsahoval aktivní bezpečnostní systémy, které byly v roce 2016 změněny na jejich pasivní alternativy.²⁸ Návrh reaktoru se tedy postupem let zdokonaľuje a s tím i jednotlivé technologie a výkony. Reaktor SMART je umístěn pod zemí. Tím, že je přítomna pasivní bezpečnost, není potřeba elektrické energie k odstavení reaktoru či zajištění odvodu tepla. V případě havárie je reaktor schopen se uchladiť a i ochránit proti případnému přetlakování.

Koncept SMART cíľí na ochranu proti vnějším vlivům, zemětřesením, pádu letadla či proti úniku radiace do okolí. Snaží se využívat pokročilý systém monitoringu, díky kterému bude možné omezit počet pracovníků na minimum. Spolu s kampaní 30 měsíců by měl provoz reaktoru být většinu času zcela automaticky bez možnosti působení lidské chyby. Tyto vlastnosti jsou klíčové pro využití ve vzdálených oblastech.

4.2.2 Reaktor NuScale

Americký reaktor NuScale patří také do kategorie malých modálních lehkovodních reaktorů integrálního provedení. Reaktor je vyvíjen společností NuScale Power a je spolufinancován US Department of Energy. Odhadovaná cena 12 modulů z roku 2020 činí 2.6 miliard dolarů. V aktivní zóně je uloženo 37 palivových souborů a tyto palivové soubory jsou tlakovodního západního typu zkráceného na 2 metry délky. Palivový cyklus reaktoru NuScale je plánován na 2 roky s možností prodloužení cyklu o pár let. V takovém případě je ale potřeba použít obohacené palivo nad 5 %.

²⁸ WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Small Nuclear Power Reactors* [online].



Obr. 4.2: NuScale budova reaktoru ²⁹

Reaktor NuScale lze modularizovat až 12 moduly, tedy při 12 modulech má mít reaktor výkon až 600 MWe (při 50 MWe variantě). Každý modul disponuje vlastní turbínou. Výhodou velkého počtu modulů je vysoká flexibilita. Jednotlivé moduly by se v tomto případě regulovaly zvlášť, popřípadě by se mohly i úplně vypínat a zapínat, a tedy by byl velký prostor pro rychlé změny výkonu. Velké množství modulů také přispívá k rozložitelným investicím.

Výrobce plánuje vyrobit moduly reaktoru, dovést je na danou lokalitu, vložit do vysokotlakého kontejnmentu a poté uložit do betonového bazénu naplněného vodou viz obrázek 4.2. Modul s kontejnmentovou nádobou má výšku 23 metrů, průměr 4.6 metrů a hmotnost 640 tun. Nainstalovaný je v bazénu s vodou pod úroveň terénu. Kontejnment obsahuje reaktor a nad reaktorem umístěný parogenerátor. Při výměně paliva bude celý modul přepraven do místa určeného pro výměnu paliva a pomocí jeřábu umístěn na svoji pozici. Celá budova reaktoru je plánována na 0.3 km².³⁰

Jedná se o integrální typ reaktoru, tedy čerpadla a pohony řídicích tyčí jsou umístěny uvnitř reaktoru. Chlazení aktivní zóny využívá přirozenou cirkulaci chladiva. Bezpečnost je zaručena vysokotlakým zvenku chlazeným kontejnmentem. V případě havárie by tyto systémy dokázaly uchládit aktivní zónu. Reaktor také disponuje pouze jedinou pohyblivou částí, a to pohony regulačních tyčí.

²⁹ NUSCALE POWER. *NuScale Power Reactor Building* [online].

³⁰ WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Small Nuclear Power Reactors* [online].

Licence tohoto projektu byla udělena v roce 2021 v USA, ale pouze pro méně výkonný 50 MWe na modul.³¹ V roce 2022 by se mělo zažádat o certifikaci verze s výkonem 60 MWe na modul. První demonstrační realizovaný projekt je naplánován na rok 2029 a cílí na první SMR postavený v USA. NuScale také zkoumá kogeneraci, odsolování, získávání ropy, zálohování větrných elektráren, či plovoucí verzi SMR na pobřeží moře. Snaží se také spolupracovat s Polskem s myšlenkou výměny polských uhelných elektráren.

Neméně podstatné využití by bylo na výrobu vodíku. Při výrobě vodíku by se využívalo vysokoteplotní elektrolýzy. K dosažení vysokých teplot by bylo využíváno 2 % elektrického výkonu jednoho modulu. Tento výkon by poté stačil na ohřátí páry z 300 °C na 850 °C. Výhodou této možnosti využití je nepřetržitá výroba vodíku z neemisního zdroje, nevýhodou může být nekonkurenceschopnost, i když ji výrobce popírá. Jeden modul NuScale by tedy mohl vyrobit až 2 053 kg vodíku za hodinu.³² Toto množství odpovídá například 38 000 vozidel využívající pohonu s vodíkovými palivovými články.

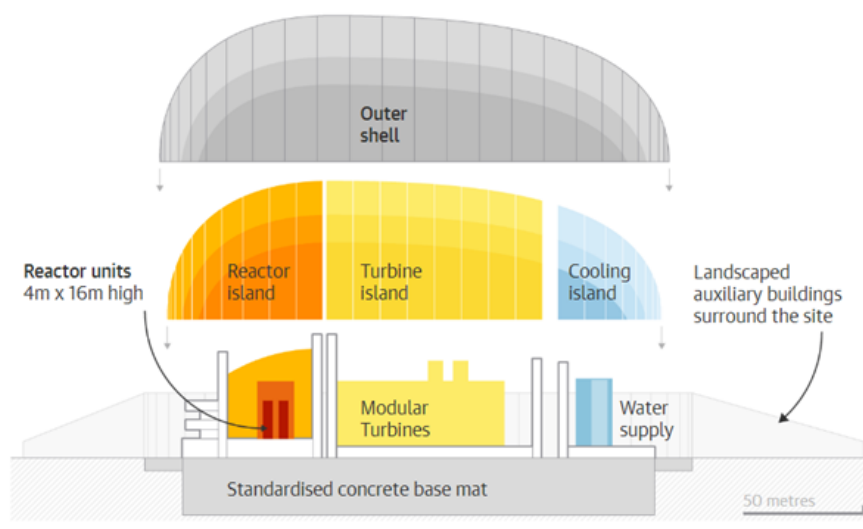
4.2.3 Reaktor ROLLS ROYCE

Britský jednoblokový reaktor tlakovodního typu je oficiální projekt financovaný britskou vládou. Ukončení licenčního procesu je odhadováno na rok 2025 a následný první realizovaný projekt do roku 2030. Koncept cílí na montáž v místě stavby a plánuje postavit 16 reaktorů s výkonem 470 MWe. Design reaktoru umožňuje kromě výroby elektrické energie i výrobu vodíku. Reaktor obsahuje externí parogenerátory, nejedná se tedy o integrální SMR. Výkon jednoho SMR by mohl nahradit celou konvenční elektrárnu. Odhadovaná cena varianty 470 MWe z roku 2021 činí 2.3 miliardy dolarů. Projekt cílí na výrobu hlavních komponent a jejich složení v továrně, poté montáž na místě do 500 dnů.³³

³¹ ČEZ. *Přehled technologií SMR zvažovaných pro ČR* [přednáška].

³² NUSCALE POWER. *Clean Hydrogen Production: Cost-competitive, Carbon-free Hydrogen Production* [online].

³³ WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Small Nuclear Power Reactors* [online].



Obr. 4.3: Rolls-Royce budova reaktoru³⁴

Pro zajištění rychlosti výstavby byly vymyšleny určité inovace spojené s dovozem modulů i s vlastní montáží. Inovace reaktoru Rolls-Royce spočívá ve využití pomocné odolné střechy, pod kterou bude celá výstavba probíhat. Realizace této pomocné střechy je možná díky relativně malým rozměrům elektrárny a relativně malým rozměrům jednotlivých dílů. Budova reaktoru je navrhována ve tvaru elipsy s délkou 180 m a šířkou 70 m.

Hlavní výhodou této střechy je použití pojezdových jeřábů, které mohou zjednodušit a zrychlit práci. Střecha také chrání proti dešti a jinému nepříznivému počasí, které by jinak komplikovalo a prodlužovalo práce v dané lokalitě. Zároveň má střecha sloužit jako ochrana před hlukem při stavbě či proti znečištění. Po dokončení výstavby by se střecha rozložila a znovu použila na další lokalitě. Tedy by i tato pomocná střecha zapadala do konceptu sériové výroby a výstavby reaktorů.

Další inovací je použití speciálního betonového podstavce, který dosedá na „oblázková ložiska“ a zajišťuje odolnost proti zemětřesení či jiným záchvěvům.³⁵ Budova reaktoru se kromě funkčnosti snaží upoutat svým vzhledem, v návrzích designu se diskutuje o možnosti využití plochy střechy pro fotovoltaické panely.

³⁴ *Rolls Royce Plant* [online].

³⁵ WORLD NUCLEAR NEWS. *Rolls-Royce on track for 2030 delivery of UK SMR* [online].

4.3 Legislativa pro SMR

Malé modulární reaktory spadají spolu se všemi jadernými elektrárnami pod zákon č. 263/2016 Sb. - Atomový zákon. Jelikož nebyly malé modulární reaktory v ČR nikdy používány, neexistuje pro ně specifická vyhláška či jiný speciální zákon. Otázkou je, jestli je možné realizovat SMR bez specifické legislativy na míru. Zdá se, že bezprostředně nutná legislativa na míru potřebná není, nicméně by bylo dobré upravit vyhlášku č. 329/2017 Sb., o požadavcích na projekt jaderného zařízení, zákon §13 č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky a upravit (snížit) výši poplatků pro SMR dle Atomového zákona. Důvodem ke zjednodušení legislativy by byl fakt, že LWR technologie jsou bezpečné a dlouhodobě prověřené technologie. V tomto ohledu je tedy značně jednodušší zaměřit se na reaktory typu LWR, pro které v ČR legislativa existuje, jiné typy SMR by musely mít legislativu vytvořenou zcela novou.

Podobný problém neřeší ale jenom Česká republika, ale i zbytek světa. Proto vznikla snaha o spolupráci ohledně licencí. Pokud bude mít jeden stát s kvalitní legislativou platnou licenci na daný typ SMR, další státy licenci přijmou za vlastní. Důraz je ale kladen na státy s kvalitní legislativou, tedy například USA, Kanadu a Spojené království.

V ČR se podle současné legislativy licencuje nejenom lokalita, na které bude jaderné zařízení používáno, ale také design jaderného zařízení, a to pokaždé zvlášť.³⁶ To koliduje s představou, že SMR cílí na sériovou výrobu. Proto je snaha o licencování designu daného SMR, který se nebude muset licencovat pokaždé zvlášť, ale jenom jednou při vstupu na trh.

4.4 Vhodná uplatnění pro SMR

Prvním vhodným uplatněním pro malé modulární reaktory by bylo jejich využití v rozvojových zemích, ve kterých nemají dostatečné znalosti na provoz klasického jaderného reaktoru. Poté vybudování SMR je možnost, jak jim umožnit zásobování elektrické energie nebo tepla pro domácnosti i průmysl. Malý reaktor může být také zdrojem, který

³⁶ ČERNÝ, Viktor. *ČEZ – Malé modulární jaderné reaktory v ČR* [přednáška].

lze připojit do přenosové soustavy při dodržení zásady, že do sítě není vhodné připojovat zdroj s kapacitou větší než 10 % kapacity sítě.³⁷ Nebo také v místech, které jsou odlehlé a vybudovat nebo spravovat infrastrukturu přenosové sítě by bylo velmi drahé. Toto použití se zdá jako nejvíce potřebné a nutné, v odlehlých místech je cena elektrické energie velmi drahá a technologie SMR se jeví jako ekonomicky výhodná. Nehledě na fakt, že odlehlé oblasti spalují těžký olej či naftu, které nejsou ekologicky udržitelné neemisioní zdroje a čelí tedy tlaku z vnějšku. SMR by mohly najít využití i jako lokální zdroj ve městech, průmyslových oblastech či vojenských základnách. Uvažuje se, že by je bylo možné použít také ke specifickým účelům například pro odsolování mořské vody či výroby vodíku.

V České republice by mohly SMR sloužit spolu s obnovitelnými zdroji energie (dále také OZE) nebo jako náhrada za konvenční elektrárny. Konvenční jaderné elektrárny totiž nejsou flexibilní, nelze je provozovat jako zdroj, který bude doplňovat OZE. Pokud by dokázaly být v tomto ohledu SMR flexibilní, byla by to jedna z možných cest české energetiky. Projekty SMR nejsou ale stále prověřené, a tak není jisté, že budou dostatečně flexibilní. Flexibilitu by mohly spíše zaručit varianty složené s více modulů. Jednotlivé moduly by se regulovaly zvlášť a tím by byl větší prostor pro rychlejší změny výkonu. OZE by se poté používaly ve velké míře v energetickém mixu a o dorovnání výkonů, udržení tvrdé sítě by se staraly SMR. Zároveň by mohly fungovat jako podpůrné služby či jako dodávka tepla místo konvenčních tepláren. Jejich umístění by umožnilo přenos tepla na kratší vzdálenost s výrazně menšími ztrátami. V blízké budoucnosti je ale stále výhodnější nenahrazovat konvenční JE a případné SMR pouze jako doplněk.³⁸

S využitelností a typem zatížení se ale musí dopředu počítat a návrh paliva a jeho obohacení podle toho upravit. Ideálem by bylo využití malých modulárních reaktorů v základním zatížení kvůli ekonomičnosti, ale v budoucnu bude potenciálně potřeba provoz v pološpičkovém režimu, s přibývajícím zdroji OZE se bude jednat o nutnost, jak

³⁷ SKLENKA, Lubomír. *Malé a modulární jaderné reaktory a jejich potenciální využití v České republice* [online].

³⁸ ČERNÝ, Viktor. *ČEZ – Malé modulární jaderné reaktory v ČR* [přednáška].

zajistit stabilní síť bez fluktuace výkonu. Plánovaná rychlost změny výkonu z poloza-
hřátého stavu je přibližně 3 % za minutu.³⁹

V ČR uvažuje ČEZ využít SMR jako bezemisní náhradu uhelných či plynových tepel-
ných zdrojů.⁴⁰ Myšlenka je přechodně vybudovat plynové teplárny, které jsou postaveny
v porovnání se SMR rychle, a následně je s časem nahrazovat malými modulárními re-
aktory. To je způsobeno nepřipraveností technologie SMR a zdlouhavými procesy na
vybudování. Se zvyšující se cenou plynu se ale situace a plynová politika může změnit,
nicméně připravenost SMR urychlit nelze. Dále dle nich není možné zatím nahradit
konvenční jaderné ani uhelné elektrárny pomocí SMR a pokud to možné bude, tak až
ve vzdálené budoucnosti.

Kolem roku 2030 má být uhlí plně nahrazeno a jedinou možností se zdá být plyn. Ten
by poté mohl plně nahradit SMR a zajistit uhlíkovou neutralitu do roku 2050. Nahradit
tepelné zdroje oproti elektrickým se zdá o něco reálnější. Na nahrazení tepelného vý-
konu tepláren pomocí SMR není potřeba takové množství reaktorů jako by bylo potřeba
v případě nahrazení konvenčních elektráren. Malé modulární reaktory by byly jako ja-
derné zdroje schopné dodávat stabilní výkon a s tím související stabilní cenu elektrické
či tepelné energie. Tím lze jednoduše s touto cenou počítat a předvídat ji.

Malé modulární reaktory jsou ale také příležitostí pro udržení jaderného know-how
v ČR a možnosti zapojení českého průmyslu v tomto odvětví do globálního trhu. Při
vybírání varianty SMR do ČR se na to bere ohled a komunikuje se o možném uplatnění
domácího průmyslu a místních firem. Z pohledu státu by se eventuálně jednalo o další
budoucí příjem peněz pro stát, a tedy by jeho motivace byla podpořit danou variantu
reaktoru. Na druhou stranu se z pohledu ČEZ nejedná o prioritu, primárním cílem SMR
je zajistit energetické potřeby za co nejnižší cenu. Zároveň by tímto mohlo dojít k roz-
voji techniky a technicky zaměřených studentů v této sféře.

³⁹ ČERNÝ, Viktor. *Malé modulární jaderné reaktory v ČR - novinky* [přednáška].

⁴⁰ ČERNÝ, Viktor. *ČEZ – Malé modulární jaderné reaktory v ČR* [přednáška].

ČEZ upozorňuje, že nevidí reálné využití pro tzv. mikro modulární reaktory a že se bude zabývat pouze SMR nad 100 MWe.⁴¹ Důvodem je, že mikro reaktory nejsou finančně výhodné. Stále se jedná o jaderné zařízení, a tedy v rámci projektování by musely splnit všechny požadavky jako pro větší SMR, pouze s menším výsledným výkonem. Ekonomičtější alternativou by už možná bylo použití větších SMR pro výrobu vodíku.

4.5 Výběr lokalit pro SMR

Výběr lokality je jedna z nejobtížnějších částí projektu SMR. Lokality je potřeba důkladně zkontrolovat a tzv. přeměnit nejadernou lokalitu na jadernou, na které může být provozováno jaderné zařízení. Další překážkou je vlastnictví daných pozemků a legislativa s tím spojená, průzkumy nejen geografické, ale i sociologické. V tomto ohledu má ČR málo zkušeností, konvenční jaderné elektrárny v ČR byly postaveny za minulého režimu, který hledání a získávání lokalit oproti dnešnímu režimu výrazně zjednodušoval. To je také jeden z důvodů, proč se zdá nereálná sériová velkovýroba SMR, v realitě by se mohlo jednat o desítky kusů v celé Evropě.

4.6 Aktivity ČR

Česká republika má jednu z nejlepších finančních podpor na světě, které lze využít. Financování jaderných zdrojů je totiž spojeno s podporou státu. Výstavba je finančně nákladná a projekt dlouhodobý, výkyvy trhu elektrické energie by mohly způsobit ztrátovost projektu. Proto je potřeba mít příslib státu formou smlouvy. Příkladem může být zajištění výkupní ceny elektrické energie či zafinancování výstavby. Jaderné zdroje jsou tedy se státem propojeny, poptávku po nich určuje zpravidla stát.

ČEZ v minulých letech vypracoval předběžnou studii proveditelnosti SMR v ČR. Z výsledků bylo zjištěno, že se nejvíce uvažuje o využití lehkovodních reaktorů.⁴² Lehkovodní reaktory mají v ČR dvě velké výhody, první je dlouholetá znalost tohoto typu, zároveň se jedná o technologicky jednodušší typ reaktoru, který je také bezpečnější.

⁴¹ ČERNÝ, Viktor. *ČEZ – Malé modulární jaderné reaktory v ČR* [přednáška].

⁴² ČEZ. *Malé modulární reaktory SMR* [přednáška].

Druhým důvodem je existující legislativa pouze na lehkovodní typy reaktorů, jiné typy nejsou provozovány, a tedy nebyly potřeba v legislativě obsáhnout. Studie proveditelnosti také poznamenala, že se do budoucna jeví perspektivně vysokoteplotní plynem chlazené reaktory (HTGR), které nejsou ale nyní dostatečně prověřenou technologií pro využití v České republice.⁴³

4.7 Pilotní projekty

ČEZ plánuje první pilotní projekt SMR na pozemku jaderné elektrárny Temelín. Projekt nemá ovlivnit případnou výstavbu velkých bloků, nicméně současně stavět SMR i velký blok v této lokalitě nelze. Pro lokalitu Temelín byla zahájena příprava studie proveditelnosti.⁴⁴ Dne 1. 4. 2022 bylo schváleno její vypracování a také zhotovení podnikatelského záměru do konce roku 2022. Byli obesláni potencionální výrobci SMR, mezi nimiž se bude určovat varianta SMR v lokalitě Temelín. Jejich odpovědi se budou považovat za závazné. Dalším krokem bude požádání o povolení k umístění a vyhodnocení vlivu na životní prostředí EIA.

Velké zjednodušení tohoto projektu je už připravený a schválený pozemek k využití jaderného zařízení – pozemek JE Temelín. Mělo by se tedy jednat o první plně funkční SMR v ČR. Postavení a spuštění tohoto projektu daného malého modulárního reaktoru je plánováno na třicátá léta. Projekt je tímto značně urychlen, vytipování výrobce bude muset být provedeno dříve, než se postaví první SMR této varianty na světě. Tím vzrůstá i riziko neúspěšnosti daného projektu. Riziko má být však omezeno smluvně tak, že samotná výstavba začne až po postavení a prověření prvotních projektů.⁴⁵

Výkon SMR v Temelíně jako pilotního projektu v ČR je definován a omezen na 500 MWe, tedy 1-2 bloky většiny variant či 6 modulů varianty NuScale s nejvýkonnějším typem modulů.⁴⁶ Omezení výkonu je zvoleno tak, aby nevyklučovalo žádnou z možných variant a tedy zajistilo větší výběr. Zároveň tento výkon umožňuje postavit SMR na

⁴³ ČEZ. *Malé modulární reaktory SMR* [přednáška].

⁴⁴ ČERNÝ, Viktor. *ČEZ – Malé modulární jaderné reaktory v ČR* [přednáška].

⁴⁵ ČERNÝ, Viktor. *Malé modulární jaderné reaktory v ČR - novinky* [přednáška].

⁴⁶ Tamtéž

lokality Temelín bez nutnosti předělání infrastruktury odpadních vod, vyvedení výkonu či kvůli nedostatku místa.

V projektu se také bere ohled na využití tepelné energie. Využití tepla v lokalitě Temelín není ale primárním cílem, teplo z velkých bloků je už vyvedeno do Týna na Vltavou a plánuje se vyvedení do Českých Budějovic. Tedy teplo ze SMR nebude zatím v této lokalitě potřeba.

Vybírání varianty dodavatele SMR nebude záviset pouze na připravenosti či nepřipravenosti daného projektu, ale bude záviset také na využitelnosti v dalších lokalitách, na kterých by mohl být do budoucna SMR postaven. Je totiž předpokládáno, že varianta vybraná pro lokalitu Temelín by mohla být také variantou pro další lokality v ČR. Vyvedení tepla se zdá být výhodné hlavně pro ostatní potencionální lokality. V těchto lokalitách je významná poptávka po teple, kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie se zdá tedy jako optimální.

Kromě rozměrů a konstrukce se daná varianta vyhodnocuje i podle jednoduchosti a typu přepravy na určenou lokaci. Jedna z variant přepravy by byla využít železnici, všechny varianty ale přepravu po železnici nepodporují.

Česká republika také vybírá další lokality na postavení SMR. V úvahu přicházejí lokality Blahutovice, Mělník, Poříčí, Ledvice, Tušimice a Počerad. Selekci těchto lokalit je k 15.03.2022 pravděpodobné, že se zvolí jedna z lokalit Poříčí, Tušimic nebo Počerad. Plánem do podzimu 2022 je definitivně tyto lokality vytipovat. Zvolená nejaderná lokalita se poté bude muset přeměnit na jadernou. Pokud se tak stane a SMR budou komerčně dostupné, samotné postavení reaktoru by na těchto lokalitách bylo možné od 2 do 5 let v závislosti na technologii SMR.

4.8 Výzkum SMR v ČR

Kromě pilotního projektu v lokalitě Temelín vzniká v ČR také mnoho nových projektů SMR, mezi nejvýznamnější patří například vysokoteplotní projekt EnergyWell či projekt HeFASTo.⁴⁷ Vyčlenila se také skupina pro vývoj, výběr lokality a financování SMR zaštiťovaná Ministerstvem průmyslu a obchodu.

4.8.1 Reaktor Energy Well

Reaktor Energy Well je vyvíjen společností ÚJV Řež na území ČR. Jedná se o jeden ze dvou projektů SMR vyvíjený v ČR pro budoucí komerční využití. Tento vysokoteplotní reaktor by měl mít výkon 20 MWt a 8 MWe. Měl by být chlazen tekutou solí FLiBe při teplotě 700 °C. Sekundární okruh tohoto reaktoru by měl být chlazen solí NaBF₄. Terciální okruh by byl chlazen plynem CO₂, který by také poháněl samotnou turbínu. Elektrická účinnost se odhaduje na 35 %. Reaktor využívá paliva na bázi TRISO s obohacím uranem 235 do 15 % a délkou kampaně 7 let.⁴⁸ Návrh investice se odhaduje na 10 let.

Rozměry reaktoru činí na výšku 2,2 metru a jeho design cílí na snadné převážení v oddělených kontejnerech. Konstrukce reaktoru je řešená stavebnicově, design cílí na snadnou montáž na místě výstavby. S tím také souvisí potencionální využití tohoto reaktoru, primárním využitím by se mohly stát odlehlé oblasti. Dalším příkladem by mohlo být využití SMR jako dodávka tepla pro domácnosti, využití ve výrobních závodech či městské infrastruktuře. Myšlenky použití nízkoemisního reaktoru jsou však stále v počátku.

Tento reaktor podstoupil vypracování ekonomické studie, která potvrdila jeho komerční potenciál a jeho potencionální využití. Studie proveditelnosti potvrdila také úspěch a tento projekt SMR získal patent. Plánuje se první postavení experimentální jednotky, zprovoznění je plánováno do 10 let.

⁴⁷ ČERNÝ, Viktor. *ČEZ – Malé modulární jaderné reaktory v ČR* [přednáška].

⁴⁸ ČEZ. *Malé a mikro reaktory* [online].

4.8.2 Reaktor HeFASTo

Druhým vyvíjeným reaktorem je už zmiňovaný reaktor HeFASTo. Vývoj tohoto reaktoru začal v roce 2021 v ÚJV Řež. Jedná se o rychlý heliem chlazený reaktor s tepelným výkonem 200 MWt. Koncept tohoto reaktoru cílí na využívání vyhořelého paliva z PWR a na velkovýrobu vodíku. Jeho design také cílí na modularizaci a snadnou montáž reaktoru na místě výstavby.

Modularizace je mimo jiné naprojektována tak, aby umožňovala univerzálnost připojení modulů, tedy například kombinaci modulu pro výrobu vodíku pomocí vysokoteplotní elektrolýzy a modulu pro výrobu elektrické energie. Účinnost přeměny na elektrickou energii je poté odhadována na 44 %. Reaktor také umožňuje vyvést teplo, a to až při teplotě 850 °C.⁴⁹

Reaktor je umístěn částečně pod zemí, nadzemní část dosahuje 18 metrů. Jako palivo je používán uran s obohacením do 20 % nebo plutonium získané z PWR. Kampaň reaktoru je přibližně 5 let. Reaktor také cílí na pasivní bezpečnost s použitím gravitace a termodynamických jevů. Projekt cílí na získání povolení k výstavbě do roku 2040.

⁴⁹ ÚJV ŘEŽ. *HeFASTo - projekt rychlého plynem chlazeného modulárního reaktoru* [online].

5 Závěrečná doporučení

5.1 Výběr varianty SMR v ČR

ČEZ bude nyní čekat obtížné rozhodování, kterou variantu SMR vybrat. Pro vyhodnocení a porovnání jednotlivých projektů bude využita metoda přepočtu jednotlivých kritérií na cenu za MWh. Kritérií budou zvoleny tisíce, mezi základními budou například jak jednotlivé projekty odpovídají představám ČEZ, jaké možnosti SMR poskytují, jaká obsahují rizika, v jaké fázi je projekt, jak snadná bude budoucí přeprava a další. Tyto kritéria se jednotlivě vyhodnotí, stanoví se jejich váhy a poté mechanismem přepočtou na fiktivní cenu za MWh.⁵⁰ Podle nejnižší vypočtené ceny se poté zvolí daná varianta. V této kapitole bude vyzkoušen zjednodušený a poupravený mechanismus navržený autorem práce dle několika známých kritérií.

Jednotlivá kritéria budou obodována v rozsahu 0 až 5 bodů. Vyšší počet bodů odpovídá lepšímu výsledku. Počet bodů z jednotlivých kritérií bude přepočten (vynásoben) dle jejich váhy. Konečné vyhodnocení bude provedeno součtem vážených bodů z jednotlivých kritérií. Výběr variant bude zúžen na vytipované varianty SMR vhodné pro využití v ČR dle ČEZ viz tabulka 4.1. Zbylá nerozepsaná kritéria byla taktéž vyhodnocena dle tabulky 4.1.

5.1.1 Kritérium dle typu reaktoru

V tomto kritériu je zohledněna bezpečnost, znalost a legislativa daného typu reaktoru. Z důvodu znalostí a připraveností legislativy České republiky je nejlepší možností tlakovodní lehkovodní reaktor. S touto technologií má Česká republika největší zkušenosti a znalosti. V úzkém výběru figuruje jeden varný lehkovodní reaktor, s varnými reaktory takové zkušenosti nejsou, ale stále jsou na dostatečné úrovni. Vysokoteplotní, rychlé reaktory nebo reaktory s roztavenými solemi by byly obodovány nízkými body, zkušenosti ani legislativa na ně není připravená.

⁵⁰ ČERNÝ, Viktor. *ČEZ – Malé modulární jaderné reaktory v ČR* [přednáška].

5.1.2 Kritérium instalovaného výkonu

Výkon SMR v Temelíně je omezen na 500 MWe. Omezení výkonu bylo zvoleno tak, aby nevylučovalo žádnou z možných variant. Více body je obodován reaktor NuScale díky své modularitě a tedy většímu potenciálu investování do jednotlivých modulů. Ta se sice nepromítne do pilotního projektu v lokalitě Temelín, ale může hrát významnou roli v budoucích lokalitách vhodných pro výstavbu SMR.

5.1.3 Kritérium připravenosti SMR

Kritérium připravenosti nelze jednoduše stanovit. Snaha výrobců je se prezentovat co nejlépe, mnohdy sliby neodpovídají stanoveným termínům zkoušek jednotlivých částí a udělování licencí. Proto bylo primárně vycházeno z tabulky 5.1 z udělení licence v zemi původu. Zatím jediná licence byla udělena variantě NuScale v roce 2020 pro 50 MWe variantu. Nejméně připraveným projektem byl shledán francouzský NUWARD.

Parametr	Název projektu					
	SMART	NuScale	UK SMR	SMR160	BWRX300	NUWARD
Licence v zemi původu	6/2023	8/2020	2026	2025	2024	2029
Plánovaný termín zahájení výstavby FOAK	2024	2026	2027	2025	2024	2030
Plánovaný termín zahájení provozu FOAK	2027	2029	poč. 30. let	2029	2028	2034

Tab. 5.1: Přehled předpokládaných milníků zvažovaných SMR⁵¹

5.1.4 Kritérium plánovaného termínu uvedení do provozu

Z tabulky 5.1 bylo také určeno kritérium plánovaného termínu uvedení do provozu. Méně připravené projekty mají snahu o prezentování bližších termínů, než které jsou reálné, proto by výsledky z tohoto kritéria mohly být zavádějící. Z toho důvodu byla tomuto kritériu udělena váha pouze 1.

5.1.5 Kritérium lokality výrobce

Lokalita výrobce je rozhodující v případě dopravy modulů ze země výroby do České republiky. Doprava z Jižní Koreje nebo USA bude znatelně náročnější a dražší než doprava z evropských zemí.

⁵¹ ČEZ. *Přehled technologií SMR zvažovaných pro ČR* [přednáška].

5.1.6 Kritérium ceny investice

Jedná o jedno z kritérií s největší vahou, bohužel ceny investic nejsou u většiny variant veřejně dostupné. Veřejné ceny několika variant sice existují, ale mohou být zavádějící. Během několika let se cena projektů mnohonásobně měnila, u méně pokročilých projektů bývá pro změnu cena udávána nižší, než by ve skutečnosti byla. Proto nebylo kritérium ceny investice použito.

5.1.7 Výsledek výběru

Kritéria	Název projektu						Váha
	SMART	NuScale	UK SMR	SMR160	BWRX300	NUWARD	
Typ reaktoru	5	5	4	4	3	5	3
Instalovaný výkon	3	5	3	3	3	3	2
Připravenost SMR	4	5	3	3	3	1	5
Lokalita výrobce	3	3	4	3	3	4	3
Plánovaný termín uvedení do provozu	4	3	3	3	3	2	1
Oběh	3	4	3	4	4	3	2
Typ paliva	4	4	4	3	3	4	3
Obohacení	4	4	4	4	4	4	2
Kampaň	4	3	3	3	3	3	1
Bezpeč. systém	4	3	4	4	4	4	2
Životnost	3	3	3	4	3	3	2
Cena investice	-	-	-	-	-	-	5
Součet vážených bodů	98	105	91	89	84	83	

Tab. 5.2: Výběr varianty SMR v ČR⁵²

Z výsledků z tabulky 5.2 lze pozorovat, že ze součtu vážených bodů vyšel NuScale nejlépe. Tedy pokud by se jednalo o skutečný mechanismus a reálné vyhodnocení, v České republice by ČEZ stavěl variantu NuScale. Druhou potencionální variantou by byl reaktor SMART a jako třetí reaktor ROLLS-ROYCE. Bodově nejhůře s rozdílem 22 bodů vzhledem k NuScale vyšel francouzský reaktor NUWARD. Je tedy pravděpodobné, že se tento typ v ČR stavět nebude.

⁵² Vytvořeno autorem

5.2 Doporučení pro ČR

Česká republika není jadernou mocností s vysokými finančními možnostmi, ale vzhledem k její velikosti a možnostem patří ke světové špičce. Důvodem je historicky silná pozice jaderných elektráren v ČR a zájem České republiky o jaderné technologie nejen z pohledu státu a energetických firem, ale i veřejnosti. Důsledkem je plánovaný projekt SMR v lokalitě Temelín, který zařadí Českou republiku mezi první země s komerčně dostupným SMR.

Pohled veřejnosti je sice stále kladný, ale není jistota, že kladný zůstane. Důvodem by mohl být tlak z okolních zemí nebo i tuzemských protijaderných organizací. Proto je potřeba sledovat socioekonomické podmínky s důrazem na potencionální lokality, na kterých by v budoucnu mohl být SMR postaven.

Vzhledem k omezování emisních zdrojů a velkému potenciálu jaderné energetiky v ČR je otázka použití malých modulárních reaktorů zcela na místě. Jako neemisní zdroje by byly vhodným kandidátem na nahrazení současných uhelných či plynových elektráren. S přibývajícím zastoupením OZE by byly také potřeba na dorovnávání výkonů. Se zvyšující se cenou emisních povolenek, ropy a plynu se zdá využití jaderných zdrojů jako ekonomicky výhodné.

Využívání jaderných zdrojů by mohla být budoucnost energetiky České republiky, jak zajistit uhlíkovou neutralitu a omezit vypouštění CO₂ a jiných škodlivých plynů do ovzduší. Variant na zajištění neutrality a zajištění ekologie výroby elektrické energie obvykle bývá více, ale na poměry ČR mi nepřipadá žádná další varianta natolik reálná. Ozářenost České republiky není dostatečná pro hromadné a ekonomické využití solárních panelů. Dobré větrné lokality jsou už také vyčerpány anebo existují pouze v chráněných lokalitách na severu ČR. Větrné elektrárny se tedy také nezdají v hromadném použití jako budoucnost energetiky v ČR.

Kromě toho se jedná o obnovitelné zdroje s nerovnoměrným výkonem, které nemohou fungovat bez jakéhokoli stabilizačního zdroje výkonu v síti. A tímto zdrojem by mohl být právě malý modulární reaktor.

Problémy s výstavbou v chráněných územích nejsou často spojeny s technologií samotnou, ale s narušením krajinného rázu, omezením místní fauny a flóry. Některé projekty SMR cílí na nenápadnost a nenarušení vzhledu krajiny. V malé zemi, jako je ČR, je snaha vytipovaných lokalit pro SMR využívat i vyrobené teplo. Není to ale podmínka, lokalit vhodných pro SMR je tedy potenciálně dostatek.

Překážkou této myšlenky v ČR je jejich nepřipravenost. Nicméně dle plánovaných projektů ve světě i v naší republice je předpokladatelné, že se tato technologie ujme a bude více rozšířená a tím pádem levnější. První modulární reaktory budou lehkovodního vyzkoušeného typu, tomu také odpovídá výběr variant v ČEZ.

Z obtížnosti pro licencování a provozování jaderných zdrojů je zřejmé, že ČEZ je v ČR zatím jediným možným subjektem provozujícím jaderné elektrárny v ČR. Z tohoto důvodu je ČEZ zatím jediným subjektem přemýšlejícím o výstavbě komerčního SMR v ČR. Legislativní požadavky kladené na jaderné zdroje jsou velmi přísné, subjekt by tedy musel splnit všechny podmínky a správní řízení od správného umístění, výstavbu, provoz i vyřazení z provozu a likvidaci jaderného odpadu. Nelze tedy předpokládat, že by se v blízké době objevil konkurent.

Nyní je potřeba provést podrobný výzkum u potenciálních výrobců SMR. Je potřeba zjistit, jaký projekt je vhodný pro využití v ČR a bude schopen výstavby v třicátých letech. Problém by mohl nastat při získávání informací, některé projekty jsou v takovém stupni vývoje, že stále upravují svůj design a parametry. V takovém případě se musí zvolit účinný mechanismus přepočtu kritérií na cenu za MWh, který tento aspekt dokáže zohlednit.

I přes veškerá positiva malých modulárních reaktorů je si ale potřeba uvědomit rizika spojená s nedokončenými prvotními projekty. Pokud by se vytypoval projekt, který není schopen být postaven dle vypočtené ceny a doby, potenciálně by to mohlo znamenat finanční ztrátu ze strany ČEZu i státu. Bylo by zajímavé být jedním z prvních států, které mají postavený malý modulární reaktor na svém území, ale uspěchat výstavbu SMR na území ČR by nebylo vzhledem k velikosti a možnostem ČR rozumné.

5.3 Doporučení pro zbytek světa

Dá se předpokládat, že v blízké budoucnosti se o SMR technologii budou zajímat převážně státy s rozvinutým jaderným programem. Pokud o SMR vzroste zájem a přibude zkušeností, SMR by byla možnost orientovat nejaderný stát na jaderné zdroje. Oproti konvenčním velkým blokům by postavení a využívání SMR bylo značně jednodušší, a to jak legislativně, tak technicky.

Příkladem je Polsko, které nemá v provozu ani jednu jadernou elektrárnu a k výrobě elektrické energie používá z drtivé většiny uhelné elektrárny. Stavba jediné jaderné elektrárny, která v Polsku měla být, byla zastavena. Polsko projevilo nově zájem o jaderné zdroje, použití SMR by mohl být například první krok. Ostatní země by se mohly inspirovat.

Tlak nebude vyvíjen na země s vhodnými neemisními zdroji energie jako například vodními elektrárnami. Oproti tomu na země z velké části závislé na uhlí bude vyvíjen tlak velký. Pokud se tato technologie stane úspěšnou, mohla by to pro ně být zajímavá příležitost. Použití by se mohlo dále rozšiřovat v rozvojových zemích, zemích bez centrální elektrické sítě či v odlehlých oblastech.

V budoucnu by mohlo být perspektivní využívat SMR na výrobu vodíku či metanu a stát se nezávislým na dodávce zemního plynu. Efektivní a ekonomické varianty výroby vodíku jsou ale primárně diskutovány s reaktory nelehkovodními, tedy reaktory, které nejsou ještě ve vývojovém stupni připraveny na komerční použití. Lehkovodní reaktory sice jsou schopny vodík vyrábět, ale není to tolik ekonomické. S prudkým nárůstem ceny zemního plynu a zdokonalující se technologií výroby zemního plynu bude možné, že i výroba pomocí lehkovodních reaktorů bude neprodělečná. Otázkou ale je, jestli by v takovém případě byl stále zemní plyn žádaný.

6 Závěr

Bakalářská práce se zabývá technologií malých modulárních reaktorů. V práci jsou shrnuty typy konstrukcí malých modulárních reaktorů a jejich dělení. Poté jsou představeny hlavní parametry malých modulárních reaktorů jako pasivní bezpečnost, ochrana do hloubky či integrální uspořádání primárního okruhu. V druhé části práce jsou shrnuty výhody a nevýhody malých modulárních reaktorů a je představeno jejich možné využití. Jsou popsány potencionální lokality v ČR. V této části je také nastíněna problematika legislativy. Je popsán současný stav této technologie a aktivity prováděné na našem území. V poslední části je na základě těchto poznatků naznačen mechanismus vybírání varianty SMR pro ČR a závěrečné doporučení pro ČR a zbytek světa.

Hlavním vlastním přínosem bylo zdokumentování aktuální situace malých modulárních reaktorů v České republice. Téma malých modulárních reaktorů je stále poměrně nové, neexistuje ucelený text zabývající se touto problematikou. Významná část této práce čerpá z aktuálních informací získaných od předního potencionálního provozovatele SMR v ČR, ČEZ. Aktuální informace z pohledu ČR i ČEZu zde byly zpracovány poprvé, poprvé byl také představen úzký výběr potencionálních variant SMR vhodných pro použití v ČR.

Byl nastíněn mechanismus vybírání varianty SMR pro ČR a jeho zjednodušená a pozměněná verze byla použita. Dle tohoto mechanismu vyšel reaktor NuScale jako nejlepší volba pro ČR. Druhou potencionální variantou by byl reaktor SMART a třetí reaktor ROLLS-ROYCE. Dle tohoto mechanismu vyšel nejhůře reaktor NUWARD, je tedy pravděpodobné, že se tato varianta nezvolí.

Tato práce vyčerpala a splnila všechny body zadání a každému bodu ze zadání byla věnována příslušná část. Žádná část práce nebyla opomenuta.

Bakalářská práce mi umožnila porozumět problematice malých modulárních reaktorů v České republice. Přínosem mi byly schůzky s Ing. Černým, které mi poskytly přehled o aktuálním stavu v České republice i v ČEZu. Bakalářskou práci jsem zpracovával bez možnosti využití ucelené literatury kvůli její neexistenci. Většina informací bylo dostupných pouze v anglickém jazyce.

Na bakalářskou práci je možné navázat. Po určité době by bylo možné porovnat případné změny v projektech SMR v ČR, porovnat vývoj jednotlivých variant a lokalit vhodných pro postavení SMR. Také by bylo možné zpracovat práci týkající se vývoje jaderné legislativy. Další možností je se zaměřit na určitý projekt SMR (NuScale, SMART, Energy Well atd.) a ten rozpracovat detailněji. Navázat by se také dalo na jednotlivé hlavní parametry, například na pasivní bezpečnost, ochranu do hloubky či Power 2 gas technologii. Za 10 let by bylo zajímavé porovnat dnešní představy spojené s využitím a výhodami SMR s reálným použitím a reálnými parametry postavených projektů v budoucnosti.

7 Seznam literatury

- [1] ČERNÝ, Viktor. *ČEZ – Malé modulární jaderné reaktory v ČR* [přednáška]. Praha: ČEZ, 2022 [cit. 2022-03-15].
- [2] ČERNÝ, Viktor. *Malé modulární jaderné reaktory v ČR - novinky* [přednáška]. Praha, 2022 [cit. 2022-04-28].
- [3] ČEZ. *Malé a mikro reaktory* [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/male-a-mikro-reaktory/vyklad>
- [4] ČEZ. *Malé modulární reaktory SMR* [přednáška]. Elektrárna Temelín II, 2022 [cit. 2022-04-27].
- [5] ČEZ. *Přehled technologií SMR zvažovaných pro ČR* [přednáška]. Elektrárna Temelín II, 2022 [cit. 2022-04-20].
- [6] ČEZ. *Typy reaktorů* [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/charakteristika-zdroje/typy-reaktoru>
- [7] EVENTERA, 2019. *Malé jaderné reaktory* [online]. Faculty of Nuclear Sciences, ČVUT [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <http://malereaktory.cz/smr-ve-svete>
- [8] FANNING, Thomas. *Defense in Depth* [online]. Argonne National Laboratory, , 2 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: https://www.ne.anl.gov/pdfs/nuclear/defense_in_depth_fanning.pdf
- [9] HRZINA, Pavel. *Akumulace el. energie a elektrochemické zdroje energie - princip* [Prezentace]. Praha [cit. 2022-04-18].

- [10] KOLMANOVÁ, Marie. Vysokoteplotní elektrolýza: „čistá“ výroba vodíku s možností zpětné konverze. *Technický týdeník* [online]. VŠCHT Praha, 2016, , 1 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/vysokoteplotni-elektrolyza-cista-vyroba-vodik-u-s-moznostmi-zpetne-konverze_35526.html
- [11] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Vodíková strategie české republiky* [online]. Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2021, , 153 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/2021/7/3VL-03-Vodikova-strategie_v030b.pdf
- [12] NAVAL HISTORY AND HERITAGE COMMAND. *Nautilus IV (SSN-571)* [online]. 2015 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.history.navy.mil/research/histories/ship-histories/danfs/n/nautilus-ssn-571-iv.html>
- [13] NEA, 2021. *Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities* [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities
- [14] NEJEDLÝ, Petr. *ČEZ – Malé modulární jaderné reaktory (SMR)* [přednáška]. Praha: ČEZ, 2021 [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=aywgIkTaWT0&t=2095s>
- [15] NUSCALE POWER. *Clean Hydrogen Production: Cost-competitive, Carbon-free Hydrogen Production* [online]. Portland [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.nuscalepower.com/environment/clean-hydrogen-production>
- [16] NUSCALE POWER. *NuScale Power Reactor Building* [online]. NuScale Power [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Sample-Small-Modular-Reactor-Building-CNuScale-Power-LLC-All-Rights-Reserved_fig1_349236575

- [17] OFFICE OF NUCLEAR ENERGY. *Benefits of Small Modular Reactors (SMRs)* [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/ne/benefits-small-modular-reactors-smrs>
- [18] PUCHNAR, Jiří, 2016. *Reaktory 4. generace - rychlé reaktory FNR a další* [online]. [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/slug/reaktory-4-generace-rychle-fnr-a-dalsi>
- [19] ROLLS ROYCE. *Rolls Royce Plant* [online]. Rolls Royce [cit. 2022-04-22].
- [20] SKLENKA, Lubomír. *Malé a modulární jaderné reaktory a jejich potenciální využití v České republice* [online]. Praha, 2014 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2014-01-Sklenka.pdf>. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská.
- [21] SMART POWER COMPANY. *SMART Technology : Design* [online]. Jižní Korea [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: <http://smart-nuclear.com/tech/design.php>
- [22] SÚJB. *Malé modulární reaktory: Jak je vidí SÚJB?* [online]. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2021 [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/aktualne/detail/male-modularni-reaktory-jak-je-vidi-sujb>
- [23] ŠKOLA, Ivo. *Přirozená bezpečnost jaderných elektráren* [online]. 2006 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/jaderna-fyzika-a-energetika/592-prirozena-bezpecnost-jadernych-elektren>
- [24] ÚJV ŘEŽ. *HeFASTo – projekt rychlého plynem chlazeného modulárního reaktoru* [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.ujv.cz/cs/produkty-a-sluzby/veda-a-vyzkum/hefasto>
- [25] VOBOŘIL, David. *Power to Gas - budoucnost akumulace elektřiny?* [online]. 2015 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/power-to-gas-budoucnost-akumulace-elektřiny>

- [26] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Small Nuclear Power Reactors* [online]. 2021 [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
- [27] WORLD NUCLEAR NEWS, 2021. *Rolls-Royce on track for 2030 delivery of UK SMR* [online]. WNN [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Rolls-Royce-on-track-for-2030-delivery-of-UK-SMR?fbclid=IwAR03foWkhRy13aO-c7EkDxIR7yKi2X66IkWJwB-BeA69V4ED9iB9CArrcIpE>
- [28] ŽIŽKA, Jan, 2018. *Flexibilita jaderných elektráren – šance pro zastánce atomu?* [online]. [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jadernoelektrarny/flexibilita-jadernych-elektraren-sance-zastance-atomu>