



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MALÉ MODULÁRNÍ REAKTORY A MOŽNOSTI JEJICH VYUŽITÍ

OVERVIEW AND UTILIZATION OF SMALL MODULAR REACTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Křeček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Katovský, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Tomáš Křeček

ID: 200716

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Malé modulární reaktory a možnosti jejich využití

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rozdělení jaderných reaktorů
2. Definice malých modulárních reaktorů (SMR) a srovnání se současnými typy reaktorů
3. Historický vývoj SMR
4. Druhy SMR z hlediska typu reaktoru a z hlediska jejich využití
5. Rozbor SMR projektů a reaktorů ve výstavbě
6. Možnosti výstavby SMR u nás a ve světě

DOPORUČENÁ LITERATURA:

1. Materiály z konferencí Malé jaderné reaktory pořádaných na FJFI ČVUT (1.-6. ročník)
2. Materiály IAEA, NEA, WNA

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 10.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

KŘEČEK, Tomáš. *Malé modulární reaktory a možnosti jejich využití*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124081>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Karel Katovský.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Malé modulární reaktory a možnosti jejich využití jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 10.6.2020

.....

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá slibným typem nových jaderných reaktorů – malé modulární reaktory (SMR). Definuje základní vlastnosti SMR a jejich zásadní rozdíly od velkých jaderných reaktorů, stručně hodnotí jednotlivé výhody a nevýhody. Shrnuje historii a aktuální směr jejich vývoje v nejvíce aktivních zemích. V bakalářské práci jsou dále rozebrány nejpokročilejší návrhy SMR a možnosti jejich využití. V poslední řadě je provedena krátká analýza o využitelnosti SMR v energetickém mixu a možnostech aplikace na území Česka.

KLÍČOVÁ SLOVA: malé modulární jaderné reaktory; jaderná energetika; SMR; pasivní bezpečnost; modularita; NuScale

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with an auspicious type of new nuclear reactors – small modular reactors (SMR). It defines the basic properties of SMR and their essential differences among large nuclear reactors, briefly evaluates the individual advantages and disadvantages. It summarizes the history and current direction of their development in the most active countries. There are also discussed the most advanced propositions of SMR and the possibilities of their use. There is an analysis of the utilization of SMR in the energy mixture and the possibilities of application in the Czech Republic.

KEY WORDS: small modular nuclear reactors; nuclear energy; SMR; passive safety; modularity; NuScale

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlu Katovskému, Ph. D. za odborné vedení, cenné rady a mnoho podnětných návrhů.

V Brně dne: 10.6.2020

.....

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD	13
2 MALÉ MODULÁRNÍ JADERNÉ REAKTORY.....	14
2.1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI SMR	14
2.1.1 PASIVNÍ BEZPEČNOST	14
2.1.2 INTEGRÁLNÍ KONSTRUKCE	15
2.1.3 MODULARITA.....	15
2.1.4 PŘEPRAVA A VÝSTAVBA	15
2.1.5 OCHRANA JADERNÉHO MATERIÁLU PŘED ZNEUŽITÍM.....	15
2.1.6 INVESTIČNÍ A PROVOZNÍ NÁKLADY	16
2.2 SROVNÁNÍ SE SOUČASNÝMI REAKTORY.....	16
2.2.1 BEZPEČNOSTNÍ PRVKY	17
2.2.2 ŠKÁLOVATELNOST, FLEXIBILITA A NASAZENÍ.....	17
2.2.3 DOPLŇOVÁNÍ PALIVA	18
2.3 MOŽNOSTI VYUŽITÍ	18
3 HISTORIE JADERNÉ ENERGETIKY	19
3.1 JADERNÉ REAKTORY PRO VÝROBU ELEKTRICKÉ ENERGIE	19
3.2 JADERNÉ REAKTORY VE SLUŽBÁCH ARMÁDY.....	19
3.2.1 MOBILNÍ JADERNÉ REAKTORY	20
3.2.2 JADERNÉ REAKTORY PRO POHON NÁMOŘNÍCH PLAVIDEL	21
4 SHRnutí SOUČASNÉ SITUACE SMR	22
4.1 SOUČASNÝ VÝVOJ SMR VE SVĚTĚ.....	22
4.1.1 SPOJENÉ STÁTY AMERICKÉ	22
4.1.2 ČÍNA.....	23
4.1.3 RUSKO.....	24
4.1.4 KANADA.....	25
4.1.5 VELKÁ BRITÁNIE	25
5 SMR TECHNOLOGIE.....	26
5.1 MIKROREAKTORY.....	26
6 SMR V PROVOZU A VE VÝSTAVBĚ	27
6.1 KLT-40S.....	27
6.1.1 AKADEMIK LOMONOSOV	27
6.2 RITM-200.....	28
6.3 HTR-PM.....	29
6.4 CAREM.....	30

7 POKROČILÉ SMR PROJEKTY	31
7.1 NUSCALE	31
7.2 ACP100.....	33
7.3 SMR-160.....	34
7.4 SMART	35
7.5 BWRX-300	36
7.6 IMSR®	37
7.7 UK SMR (ROLLS-ROYCE SMR).....	38
7.8 PRISM.....	38
7.9 U-BATTERY	39
7.10 EVINCI.....	39
7.11 ENERGY WELL	39
8 MOŽNÁ POZICE SMR V ENERGETICE ČESKA	41
8.1 VYUŽITÍ A MOŽNOSTI VÝSTAVBY SMR	42
8.1.1 ANALÝZA NÁHRADY UHELNÝCH ELEKTRÁREN	44
9 ZÁVĚR.....	48
POUŽITÁ LITERATURA	50

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 SMR s porovnáváním s konvenčním typem JE (převzato a upraveno z [61])</i>	17
<i>Obr. 6-1 Schéma reaktoru a parogenerátoru KLT-40S [4]</i>	27
<i>Obr. 6-2 Schéma reaktoru HTR-PM [60]</i>	29
<i>Obr. 6-3 Konstrukce demonstrační jednotky HTR-PM [57]</i>	29
<i>Obr. 6-4 Reaktorová nádoba CAREM [4]</i>	30
<i>Obr. 7-1 Vizualizace NPM [4]</i>	31
<i>Obr. 7-2 Znárodnění budovy s jednotkami NPM (převzato a upraveno z [4])</i>	32
<i>Obr. 7-3 Schéma reaktoru ACP100 [4]</i>	33
<i>Obr. 7-4 Schéma uspořádání primárního okruhu v SMR-160 [4]</i>	34
<i>Obr. 7-5 Model reaktoru SMART [4]</i>	35
<i>Obr. 7-6 Schéma celého komplexu elektrárny s reaktorem BWRX-300 [14]</i>	36
<i>Obr. 7-7 Vyměnitelná jednotka IMSR[®] [62]</i>	37
<i>Obr. 7-8 Vizualizace reaktoru UK SMR [4]</i>	38
<i>Obr. 7-9 Vizualizace reaktorové budovy PRISM [67]</i>	38
<i>Obr. 7-10 Vizualizace jednotky U-Battery [17]</i>	39
<i>Obr. 7-11 Schéma návrhu reaktoru Energy Well [12]</i>	40
<i>Obr. 8-1 Předpokládaný vývoj výroby el. energie podle optimalizovaného scénáře ASEK [22]</i> ..	41
<i>Obr. 8-2 Ilustrativní harmonogram uvádění prvních SMR ve světě do provozu [70]</i>	43
<i>Obr. 8-3 Stav výroben elektrické a tepelné energie v roce 2045 [70]</i>	44
<i>Obr. 8-4 Graf vyobrazující podíl paliv na výrobě tepla [35]</i>	46
<i>Obr. 8-5 Lokality na území Česka s CZT [36]</i>	47

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 6-1 Technické vlastnosti reaktoru KLT-40S [4].....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 6-2 Technické vlastnosti reaktoru RITM-200 [4]</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 6-3 Technické vlastnosti reaktoru HTR-PM [4]</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 6-4 Technické vlastnosti reaktoru CAREM [4].....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 7-1 Technické vlastnosti reaktoru NuScale [4][66].....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 7-2 Technické vlastnosti reaktoru ACP100 [4]</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 7-3 Technické vlastnosti reaktoru SMR-160 [4].....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 7-4 Technické vlastnosti reaktoru SMART [4].....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 7-5 Technické vlastnosti reaktoru BWRX-300 [14]</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 7-6 Technické vlastnosti reaktoru ISMR[®] [4].....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 7-7 Technické vlastnosti reaktoru UK SMR [4].....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 8-1 Uvažované návrhy SMR a jejich specifikace [4] [6].....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 8-2 Uhelné elektrárny nad 700 MW instalovaného výkonu na území Česka [70][71].....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 8-3 Vybrané uhelné elektrárny v rozmezí 200-600 MW instalovaného výkonu na území Česka [70] [71].....</i>	<i>45</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ANPP	Army Nuclear Power Program (Armádní program jaderné energie)
BWR	Boiling Water Reactor (Varný reaktor)
CNEA	Comisión Nacional de Energía Atómica (Argentinská národní komise pro atomovou energii)
CNL	Canadian Nuclear Laboratories (Kanadská národní jaderná laboratoř)
CNNC	China National Nuclear Corporation (Čínská národní jaderná společnost)
CNSC	Canadian Nuclear Safety Commission (Kanadská komise pro jadernou bezpečnost)
CZT	Centrální zásobování teplem
ESBWR	Economic Simplified Boiling Water Reactor (Ekonomický zjednodušený varný reaktor)
FNR	Fast neutron reactor (Rychlý reaktor)
HTGR	High Temperature Gas Cooled Reactor (Vysokoteplotní plynem chlazený reaktor)
HTR	High temperature reactor (Vysokoteplotní reaktor)
IAEA	International Atomic Energy Agency (Mezinárodní agentura pro atomovou energii)
INET	The Institute of Nuclear and New Energy Technology (Čínský ústav jaderné a nové energetické technologie)
iPWR	Integrated pressurized water reactor (Integrální tlakovodní reaktor)
KAERI	Korea Atomic Energy Research Institute (Institute Korejský institut pro výzkum jaderné energie)
LOCA	Loss-Of-Coolant Accident (Havárie se ztrátou chladiva)
LWR	Light water reactor (Lehkovodní reaktor)

MSR	Molten Salt Reactor (Reaktor s roztavenou solí)
NAP JE	Národní akční plán rozvoje jaderné energetiky v ČR
NPM	NuScale Power Module™ (Výkonový modul NuScale)
NRIC	National Reactor Innovation Center (Národní reaktorové inovační centrum – USA)
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PWR	Pressurized Water Reactor (Tlakovodní reaktor)
RMBK	Reaktor bolšoj moščnosti kanalnyj (Kanálový reaktor velkého výkonu)
SEK	Státní energetická koncepce
SMR	Small Modular Reactors (Malé modulární reaktory)
UO ₂	Oxid uraničitý
US DOE	United States Department of Energy (Ministerstvo energetiky Spojených států amerických)
US NRC	United States Nuclear Regulatory Commission (Komise pro jadernou bezpečnost Spojených států amerických)

1 ÚVOD

Elektrická energie je důležitou součástí našeho života. Zajištění bezpečné dodávky elektrické energie pro stále větší lidskou populaci je tak jeden z pilířů ekonomického růstu a rozvoje. Výstavba neobnovitelných zdrojů v současné době nedává smysl, protože dlouhodobým cílem společnosti je snížit emise skleníkových plynů a zbavit se závislosti na fosilních palivech. Nastává otázka, jak nezávislosti dosáhnout. Obnovitelné zdroje lidstvo zatím nedokáže efektivně využít. Respektive není schopno energii z obnovitelných zdrojů získávat v čas, kdy ji potřebuje a není ani ekonomicky schopno ve velkém množství tuto energii uchovávat. Jednou z nejspolehlivějších a nejduržitelnějších technologií výroby elektrické energie je jaderná energie. Investiční náklady na jadernou energii jsou však ve srovnání s jinými zdroji vysoké.

V posledních letech se objevují různé inovativní a pokrokové návrhy modulárních jaderných reaktorů, které mohou přispět k rozvoji jaderné energetiky, jež se také v současné době potýká s problémy kvůli obavám z bezpečnosti. Celosvětově roste poptávka po elektrické energii, kterou bude třeba uspokojit a je potřeba najít alternativu za neobnovitelné zdroje energie, které z důvodu snahy zamezit znečišťování ovzduší budou postupně odstavovány. SMR by mohly částečně tuto díru v energetickém mixu vyplnit. SMR se potýkají se zvyšováním požadavků na jadernou bezpečnost, zároveň jde o jeden z hlavních cílů, tj. vyvinout co nejbezpečnější a nejjednodušší zdroj jaderné energie, který by se dal bezproblémově provozovat i v blízkosti velkých měst.

Bakalářská práce definuje pojem malé modulární reaktory a zdůrazňuje klíčové vlastnosti malých modulárních reaktorů, jejich současný stav ve světě a uvádí řešerši klíčových projektů. V neposlední řadě se zabývá otázkou, zda by mohly malé modulární reaktory najít uplatnění v Česku a jak by mohly přispět do energetického mixu.

2 MALÉ MODULÁRNÍ JADERNÉ REAKTORY

Terminologie ani klasifikace malých modulárních reaktorů není jednotná. V literatuře se často setkáváme se zkratkou SMR, ovšem tato zkratka je používána nejen pro *malé modulární reaktory* (Small Modular Reactors), ale také pro *Malé a Střední reaktory* (Small and Medium sized Reactors). V některých amerických zdrojích se můžeme setkat i se zkratkou SMART (Small Modular Advanced Reactor Technology). Klasifikace reaktorů vytvořená Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (IAEA) definuje malé jaderné reaktory podle elektrického výkonu a to do 300 MWe, střední jaderné reaktory od 300 do 700 MWe a reaktory s výkonem nad 700 MWe jsou označovány jako velké jaderné reaktory. Alternativní klasifikace velikosti reaktorů, sestavená ministerstvem energetiky v USA (US DOE), podle tepelného výkonu reaktorů s hranicemi 1000 MWt a 2000 MWt, které při účinnosti energetického reaktoru kolem 1/3 přibližně odpovídají klasifikaci IAEA. Ministerstvo energetiky v USA ještě klasifikuje reaktory do 250 MWt jako mini reaktory. Malé modulární reaktory se od obvyčejných malých reaktorů, které jsou ve světě v provozu, odlišují hlavně svoji specifickou modulární konstrukcí. Jednotlivé komponenty – moduly jsou sestaveny v jeden celek až na místě plánované elektrárny. Tato vlastnost má cestu k sériové výrobě, která by urychlila, zjednodušila a zlevnila výstavbu.[2]

Od počátku komerčního provozu jaderných reaktorů postupně roste i jejich instalovaný výkon, ten vzrostl ze 60 MWe až k dnešním 1600 MWe. Z ekonomického hlediska by proto výstavba pouze zmenšených reaktorů pro komerční využití nedávala žádný smysl. Ovšem díky malým rozměrům a velké zásobě energie v podobě paliva našli využití ve vojenském průmyslu jako pohony pro námořní lodě nebo ponorky, což přináší velké množství zkušeností v oblasti konstrukce malých energetických jaderných jednotek. Ty se dnes uplatňují při návrhu nových SMR pro komerční využití.[5]

2.1 Základní vlastnosti SMR

Na první pohled se může zdát, že SMR jsou pouze zmenšené současné velké jaderné reaktory. SMR sice vychází většinou z již ověřené technologie používané u velkých energetických reaktorů, ovšem nabízí zjednodušení technologie, modularizace, sdílení některých technologických celků s více reaktory a tím i nižší náklady na výstavbu a provoz.

2.1.1 Pasivní bezpečnost

Většina nových projektů malých modulárních reaktorů je navrhována tak, aby dosáhla vysoké bezpečnosti odstraněním slabých míst, jako jsou například vnější zdroje napájení pro chlazení aktivní zóny. V případě mimořádných událostí je reaktor automaticky odstaven a zbytkové teplo je z aktivní zóny odváděno pomocí přirozené cirkulace. Není potřeba žádný vnější zásah nebo zdroj elektrické energie k napájení aktivních systémů chlazení. U mnoha SMR projektů je dokonce přirozená cirkulace využívána i při normálním provozu. Malé reaktory jsou schopny odvést teplo z aktivní zóny pomocí pasivních systémů daleko lépe než velké energetické reaktory, a to hlavně díky menšímu tepelnému výkonu a menším rozměrům aktivní zóny. Poměr objemu chladiva k výkonu je například u SMR mPower 2,25krát větší než u současných reaktorů. Dalším významným rozdílem je skutečnost, že SMR většinou disponují integrálním provedením reaktorové tlakové nádoby, kde se nachází jak aktivní zóna, tak i parogenerátor s kompenzátorem objemu. Tímto provedením se eliminuje vznik havárie spojené se ztrátou chladiva (LOCA). U většiny projektů SMR se plánuje zapuštění konstrukce reaktorových tlakových nádob do země z důvodu lepší ochrany proti vnějším přírodním vlivům nebo teroristickým útokům.[8]

Obecně lze říct, že SMR mají oproti velkým energetickým reaktorům velkou bezpečnostní rezervu. Při plánování SMR se předpokládá, že budou mít daleko menší frekvenci mimořádných událostí, než se vyskytuje u současných velkých jaderných elektráren. Důvodem je méně systémů, vylepšení a zjednodušení konstrukčních prvků, jako jsou systémy pasivní bezpečnosti. Dále SMR vyniká sníženou potřebou zásahu obsluhy do provozu, tím se částečně eliminuje riziko lidské chyby.[8]

2.1.2 Integrovaná konstrukce

Malé modulární reaktory dosahují menších jednotkových výkonů a tím i menších rozměrů než konvenční velké jaderné reaktory. Jeden z dílčích cílů návrhu SMR je co nejjednodušší konstrukce. V této konstrukci jsou komponenty primárního okruhu (aktivní zóna, parogenerátor, regulační tyče, pohony regulačních tyčí, kompenzátor objemu a cirkulační čerpadla, pokud je daný typ SMR využívá) umístěny do jedné tlakové nádoby reaktoru, čímž se eliminuje potřeba potrubí v primárním okruhu. Samotná tlaková nádoba se nachází v kontejneru. [2]

2.1.3 Modularita

SMR mohou být modularizovány, tj. mohou být konstruovány v továrnách a dodávány na místo jaderné elektrárny už v hotových částech. Modularizace je specifická výhoda SMR, která lze replikovat i ve velkých jaderných elektrárnách, ovšem velmi omezeně. Mezi výhody modulární skladby elektrárny patří například možnost větší standardizace součástí a návrhů, lepší kontrola kvality součástí díky výrobě mimo místa výstavby a standardizaci. Doba výstavby by se díky sériové výrobě komponentů zkrátila a zároveň by se zjednodušily stavební práce v místě výstavby. Primární okruh by tak na stavbu mohl být dopraven jako jeden celek a nemusel by se svařovat z jednotlivých dílů až na místě, jak se to děje u velkých reaktorů. Dlouhá doba výstavby velké jaderné elektrárny je dnes považována za jednu z hlavních nevýhod budování jaderných elektráren. [8]

Malé modulární reaktory nemusí znamenat malý výkon celé jaderné elektrárny, ta může být složena z několika stejných modulů reaktorů a celkový výkon může mít stejný jako konvenční jaderná či uhelná elektrárna. Zároveň mohou být jednotlivé moduly instalovány postupně a tím lze dosáhnout zapojování výkonu do přenosové soustavy s menšími skoky. Toho lze využít i při regulaci, kdy SMR umožňují jemnější regulaci na rozdíl od velkých jaderných elektráren.

2.1.4 Přeprava a výstavba

Jedním z klíčových cílů při navrhování SMR je snadný transport. Navrhují se tak, aby jakýkoliv komponent nebo modul mohl být převážen například po železnici. Tato vlastnost úzce souvisí s modularitou a malými rozměry reaktoru. Díky modulární výrobě, kde by většina montážních prací byla provedena mimo staveniště, se značně zjednoduší dokončovací práce na místě výstavby, čímž by se snížil časový rozvrh a odhadovaná doba výstavby by mohla být 3-5 let.

2.1.5 Ochrana jaderného materiálu před zneužitím

Nasazení jakéhokoliv jaderného systému představuje rizika zneužití jaderného materiálu v závislosti na jeho konkrétní konstrukci, postupech doplňování paliva a typech paliv. Odolnost proti zneužití paliva (mezinárodně označováno jako „proliferation resistance“) je považováno za zvláštní potřebu v případě SMR, protože by mohly být atraktivní zejména pro země, které nemají s jadernou energetikou žádné zkušenosti a nejsou považovány za bezpečné státy. Rizika pramení nejen z plutonia (které je u LWR pro zbraně nepoužitelné), ale zejména získávání radioaktivního

mixu pro špinavou bombu nebo čistého uranu z první závázky (zvláště zajímavé pro obohacení 20 % a více). Odolnost proti zneužití jaderného paliva má někdy protichůdné požadavky. Jeden ze způsobů, jak snížit riziko zneužití paliv z jaderných reaktorů je snížit frekvenci doplňování paliva, protože v tomto období, kdy je palivo mimo reaktor, se palivo stává nejzranitelnější vůči zneužití, a tak se návrhy SMR snaží dosáhnout delšího palivového cyklu. Aby však reaktor udržel reaktivitu mezi delšími intervaly doplňování paliva, je potřeba zvýšit obohacení paliva nebo přidat plutonium. Některé návrhy dokonce vyžadují přechod na úroveň obohacení U^{235} nad 20 %. [52] [53]

Na druhou stranu některé SMR návrhy používají palivo, ze kterého je těžké oddělit plutonium, na rozdíl od paliva používaného v konvenčních reaktorech. Malé modulární reaktory pracují i s nekonvekčními druhy paliv a separace plutonia z těchto paliv jsou z hlediska ekonomické a technologické náročnosti velmi obtížné. [52]

Řešení tohoto problému je u různých návrhů SMR odlišné. Někde se počítá s vyměňováním paliva v jednom centrálním závodu, některé návrhy SMR budou pracovat s jednou náplní paliva nepřetržitě celou dobu provozu anebo počítají s použitím paliva, ze kterého nebude přepracováním možno získat materiál na výrobu jaderné zbraně.

2.1.6 Investiční a provozní náklady

V oblasti jaderné energetiky jsou náklady na životní cyklus jaderné elektrárny rozděleny do čtyř základních skupin: [8]

- Kapitálové náklady neboli investiční náklady na výstavbu elektrárny
- Náklady na údržbu a provoz elektrárny
- Součet nákladů vynaložených na palivový cyklus
- Náklady na vyřazování z provozu.

Malé modulární reaktory jsou i přes veškerá inovativní řešení včetně zlevnění a zkrácení výroby komponentů obecně považována za dražší než velké jaderné reaktory, a to vzhledem k ceně jednoho instalovaného kilowattu. Ovšem toto srovnání je velice individuální, protože dnes existuje celá řada SMR projektů, které chtějí dokázat opak. Hlavní ekonomická výhoda SMR spočívá v tom, že náklady na výstavbu mohou být rozděleny rovnoměrně. Jeden modul vyžaduje mnohem menší kapitál. Výstavba SMR může být až o polovinu času kratší než výstavba velkého jaderného reaktoru. Jakmile je první modul úspěšně spuštěn, začne pro společnost generovat příjem a ten lze použít k financování výstavby dalších modulů. Z toho vyplývají daleko pozvolnější investice než u výstavby velkých jaderných elektráren. [8]

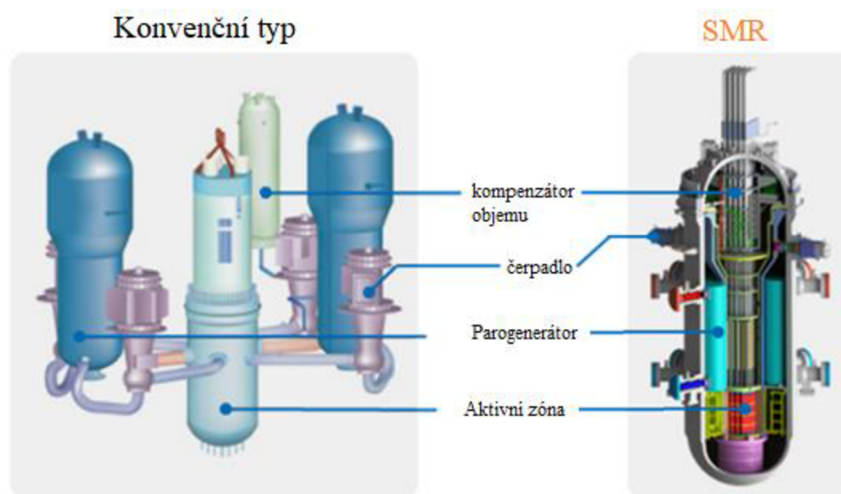
2.2 Srovnání se současnými reaktory

Nejběžněji jsou v dnešní době jaderné reaktory využívány k výrobě elektrické energie, proto se srovnání vztahuje především k velkým energetickým jaderným reaktorům. Jaderné reaktory se kromě získání elektrické energie využívají, jako pohony vojenských námořních plavidel, k vývoji a výrobě nových radiofarmak a také k výzkumu vlastností materiálů.

Velké jaderné reaktory jsou podle IAEA klasifikovány jako reaktory s výkonem větším než 700 MWe. Hlavním důvodem, proč se začaly stavět velké jaderné reaktory je fakt, že s rostoucí velikostí výkonu elektrárny značně klesá cena instalované kW. Paradoxně ve velikosti je zároveň i jejich velká nevýhoda, která v současné době brzdí výstavbu nových jaderných elektráren. Nově stavěné jaderné elektrárny jsou obrovské projekty, velká komplexnost a spousta požadavků na bezpečnost prodlužují licencování i samotnou výstavbu, což z nich dělá pro investory riskantní

investice. Naopak SMR kladou (mimo jiné) důraz na jednoduchost konstrukce a tím se snaží snížit počáteční investice. Modulární komponenty a standardizovaná výroba mohou snížit nejen stavební náklady, ale i čas výstavby. U malých modulárních reaktorů dochází k eliminaci potencionálně poruchových částí. V primárním okruhu je daleko větší poměr chladicího media k množství paliva než u konvenčních reaktorů, což vede k lepší tepelné setrvačnosti SMR. Lepší je i odvod zbytkového tepla díky menší aktivní zóně. Dalším velkým rozdílem mezi oběma typy je otázka bezpečnosti. U SMR je bezpečnost většinou zajištěna inherentně a pasivně.

Ve srovnání s konvekčními velkými reaktory lze říct, že se SMR liší v pěti klíčových oblastech: bezpečnost, škálovatelnost, flexibilita, nasazení a ekonomika. Mnoho z nich se odvíjí od zmenšení velikosti, modularity a zjednodušení návrhu.



Obr. 2-1 SMR s porovnáním s konvenčním typem JE (převzato a upraveno z [61])

2.2.1 Bezpečnostní prvky

Bezpečnost SMR je obecně dána menší velikostí, což umožňuje použití pasivních systémů. V některých případech SMR pro chlazení využívají zcela přirozenou cirkulaci chladicího média. Většina SMR návrhů počítá i s pasivním dochlazováním aktivní zóny v případě mimořádných událostí, a to i bez zásahu obsluhy. Integrální provedení reaktoru také téměř eliminuje nehody jako je ztráta chladicí kapaliny (LOCA). Mimo jiné pasivní bezpečnostní systémy nepotřebují záložní napájení jako aktivní systémy používané u velkých energetických reaktorů. Absence různých bezpečnostních čerpadel a jiných přístrojů značně zjednodušuje údržbu a pravidelnou kontrolu celé elektrárny. Malé modulární elektrárny se také často navrhují s další ochranou vrstvou, nebo se plánuje jejich instalace pod zemí, a to vytváří další překážku v případě přírodních katastrof či havárii letadla. Některé projekty SMR počítají s reaktorovými bazény pro další chladicí kapacitu. [6]

2.2.2 Škálovatelnost, flexibilita a nasazení

Škálovatelností se myslí schopnost postupného přidávání kapacity jaderné elektrárny. U SMR se jedná o přidávání dalších jednotlivých reaktorových modulů, což umožňuje zmíněné navýšení kapacity elektrárny za využití stávající infrastruktury. Flexibilita se týká možnosti využití. Zatímco velké jaderné reaktory se používají ve většině případů na výrobu elektrické energie, SMR mohou najít potencionální využití v oblasti výroby tepla pro průmysl nebo pro dálkové vytápění, odsolování atd.

2.2.3 Doplnování paliva

Doba intervalů doplňování u SMR je obvykle větší než dva roky. U některých návrhů se dokonce předpokládá palivový cyklus stejně dlouhý jako životnost samotné elektrárny. Obohacení paliva u některých SMR překračuje 5 % z důvodu udržení reaktivity v aktivní zóně během delšího cyklu doplňování. [51]

2.3 Možnosti využití

Zájem o SMR se celosvětově zvyšuje, a to díky jejich schopnosti vyhovět potřebě flexibilní výroby elektrické energie pro širší škálu využití a možnosti nahrazení stárnoucích elektráren na fosilní paliva.

- Výroba elektrické energie v odlehlých oblastech – transportní ztráty jsou velké a budování přenosové sítě do odlehlých oblastí je nákladné. Díky modulární konstrukci a celkově snadnější výstavbě elektrárny přímo na místě by se mohly SMR stát dobrým zdrojem elektrické energie pro různé ostrovy či odlehlé arktické oblasti.
- Uplatnění v rozvojových zemích, které na výstavbu velkých jaderných zdrojů nemají dostatečné finance, infrastrukturu a ani kvalifikované odborníky. Ovšem zde nastává otázka, zda je vhodné jaderné zařízení umisťovat do politicky nestabilních zemí, kde nepřetržitě hrozí ozbrojené konflikty.
- Výroba tepla v oblastech věčně zamrzlé půdy.
- Pro odsolování mořské vody v oblastech bez zdroje pitné vody, zejména v pouštích.
- Ani jedna z předchozích výhod není relevantní pro využití SMR v Česku. Zde by se daly SMR využít jako náhrada za dosluhující a méně ekologické uhelné elektrárny.
- Výroba vodíku a vysokopotenciálního tepla pro průmysl.
- Využití jako mobilních zdrojů energie (plovoucích nebo v podobě mikroreaktorů – na kamionu atp.).

3 HISTORIE JADERNÉ ENERGETIKY

Světové velmoci¹ během vývoje jaderných zbraní získaly řadu nových technologií a poznatků ohledně jaderné energie. Netrvalo dlouho a vědci si uvědomili potenciál ohromného množství tepla, získaného v tomto procesu, které lze využít pro výrobu elektřiny. Předpokládali, že tato nová forma energie umožní vývoj malých a dlouhotrvajících zdrojů energie s různým cílem využití, nejen pro lodní dopravu a ponorky. [28]

3.1 Jaderné reaktory pro výrobu elektrické energie

První jaderné zařízení, které vyrobilo elektrickou energii a rozsvítilo tak v roce 1951 čtyři žárovky, byl experimentální reaktor EBR-1 (Idaho, USA) [26]. Roku 1953 prezident Spojených Států Amerických Dwight D. Eisenhower navrhl svůj program nazvaný „Atomy pro mír“ [28]. Program měl za cíl věnovat pozornost výzkumu výroby elektrické energie z jádra. Tímto programem tak stanovil nový směr vývoje jaderné energetiky v USA.

V Sovětském svazu byl založen Ústav fyziky a energetiky v roce 1946 za účelem vývoje technologie pro jadernou energetiku. Již existující reaktor určený pro výrobu plutonia byl přestavěn na reaktor pro výrobu tepla a elektřiny a v roce 1954 byl na ústavu, který sídlil ve městě Obninsk, spuštěn jaderný reaktor AM-1 (v překladu Mírový atom). Tento reaktor byl svou skladbou předchůdcem reaktorů typu RBMK, byl chlazený vodou a moderovaný grafitem, dosahoval výkonu 5MW_e nebo 30MW_t. Reaktor vyráběl elektřinu do roku 1959 a až do roku 2000 se používal jako výzkumné zařízení. Jednalo se o první jadernou elektrárnu připojenou k síti. [28]

Za první čistě komerčně využívanou jadernou elektrárnu vybudovanou pouze pro mírové účely, bez snahy vyrábět plutonium, je považována jaderná elektrárna Shippingport (Pennsylvania, USA). Reaktor byl spuštěn roku 1957 a dosahoval výkonu 60 MW_e. Byl postaven jako prototyp dnes nejrozšířenějších tlakovodních reaktorů, mimo jiné sloužil i jako prototyp pohonů vojenských plavidel. Brzy následovaly další jaderné elektrárny, Westinghouse uvedl v roce 1960 do provozu elektrárnu Yankee Rowe, jednalo se o tlakovodní reaktor s výkonem 250 MW_e. Společnost General Electric přišla ve stejném roce s prvním komerčním varným reaktorem – Dresden-1 o výkonu 250 MW_e. Tomu předcházel prototyp reaktoru Vallecitos provozovaný v letech 1957 až 1963. [28]

Ve Velké Británii vzal vývoj odlišný směr než v USA a vyústil v projekty reaktorů používající jako palivo přírodní uran, moderovaný grafitem a chlazený plynem. V roce 1956 byl spuštěn první reaktor typu Magnox s výkonem 50 MW_e. [28]

Od této doby se velikost jaderných reaktorů postupně zvýšila z 60 MW_e na více než 1600 MW_e. Ovšem v dnešní době na sebe malé reaktory opět strhávají pozornost, především díky vizi nižšího výchozího kapitálu, pasivní bezpečnosti a poskytnutí tepelné a elektrické energie v odlehlých oblastech.

3.2 Jaderné reaktory ve službách armády

Malé modulární reaktory nejsou takovou novinkou, jak se zdá. O jejich vývoj se postaral zbrojní průmysl, především díky závodům ve zbrojení mezi největšími mocnostmi světa. Zbrojní průmysl se snažil využít energii z jádra, potřeboval malé energetické jednotky o vysokém výkonu

¹ Především USA a Sovětský svaz

se zásobou paliva na dobu působení v odlehlých oblastech bez možnosti jeho doplnění. Jaderný zdroj se pro tento účel zdál ideální.

Vojenský program pro jadernou energii v USA

Program armády Spojených států amerických s názvem „Army Nuclear Power Program“ (ANPP) vznikl v roce 1954. Program měl za cíl vývoj malých jaderných reaktorů, které by se daly použít na odlehlých místech či vojenských základnách za účelem výroby tepla a elektrické energie v ostrovním režimu. Reaktor měl být dopravitelný na místo vlakem, lodí, letadlem nebo i nákladním vozidlem a připojení do sítě mělo být nutné bez dalších zdlouhavých stavebních úprav. Během programu vzniklo celkem 8 malých reaktorů. [30]

První postavený reaktor pod záštitou programu ANPP, sloužil především pro testování a výcvik personálu obsluhy, nesl označení SM-1 (Stationary Medium Power Prototype 1). Reaktor byl v provozu 16 let. [30]. Dále vznikl reaktor SM-1A, který demonstroval funkci jaderného reaktoru v arktických podmínkách na Aljašce. Reaktor PM-1 byl provozován na dnes již uzavřené radarové základně Sundance ve státě Wyoming, která se nacházela ve výšce přes 2000 metrů nad mořskou hladinou. Reaktor byl sestavován více než 2500 km od místa plánovaného umístění. Po sestavení a testování byly z komponentů vytvořeny moduly na rozměry, které odpovídají podmínkám přepravy nákladním letounem C-130 Globemaster. Následně bylo všech 16 modulů převezeno na základnu Sundance, kde byl reaktor sestaven a uveden do provozu. Reaktor s označením SL-1 byl zkonstruován jako prototyp pro získání zkušeností s varným typem reaktoru a byl zničen nejadernou explozí po chybě operátora. Jedná se o jedinou nehodu v programu ANPP. Další reaktory byl postaven v Grónsku, reaktor nesl označení PM-2A. Následoval reaktor PM-3A vybudovaný na výzkumné základně McMurdo na Antarktidě. Sloužil zde k výrobě elektrické energie, tepla a páry k odsolování mořské vody. Všechny výše zmíněné reaktory dosahovaly výkonu 1-2 MW_e a byly provozovány mezi lety 1957 až 1973. Náklady na vývoj a výrobu kompaktních jaderných elektráren byly natolik vysoké, že mohly být odůvodněny pouze jedinečností a schopností plnit jasně definovaný cíl. Vysoké náklady byly především způsobeny velkým počtem řídicího a vědeckého personálu, protože v té době nebyl dostatek zkušeností s řízením reaktoru. Nehledě na náklady údržby a oprav, které byly také vyšší kvůli jedinečnosti reaktorových systémů. Postupně se program stával ekonomicky neúnosný a armáda se rozhodla program postupně ukončovat. Roku 1976 byl program ANPP zcela zastaven. [31]

I přes ukončení programu a opuštění od vize malého reaktorového systému pro vzdálené lokality program úspěšně dokázal, že kompaktní reaktory lze postavit, dopravit na místo a bezpečně provozovat.

3.2.1 Mobilní jaderné reaktory

Pod záštitou ANPP vznikl i reaktor s názvem ML-1 (mobile low-power reactor). Cílem bylo vybudovat mobilní jadernou elektrárnu, která by doprovázela vojenské jednotky z místa na místo a poskytovala by energii polním nemocnicím, radarovým a zbraňovým systémům nebo velitelským a komunikačním centřům. V projektu bylo plánováno, že zdroj bude mít výkon několik stovek kW_e a bude transportován na přívěsech, celková hmotnost měla dosáhnout přibližně 40 tun. Mobilní reaktor měl nahradit diesellové generátorové zařízení, které dosahovalo sice poloviční hmotnosti, ale spotřebovalo okolo 4 tun paliva denně. Jediná dodávka jaderného paliva by eliminovala logistické úsilí k dodávání potřebného paliva pro konvenční zdroje. Vývoj jaderné elektrárny rozměrů zajišťující plnou mobilitu vyžadovalo zcela nové technologie. Výzkum došel k závěru, že plynem chlazený reaktor spolu s plynovou turbínou s uzavřeným cyklem by byl lehčí než

tlakovodní reaktor a zároveň nebylo potřeba velkého množství vody ke chlazení. Kvůli mobilitě bylo vynecháno rozsáhlé stínění, které bylo nahrazeno vyloučenou zónou kolem provozovaného zařízení. Po 18 měsících testování fungovala reaktor ML-1 poprvé jako elektrárna 21. září 1962. Ačkoliv vyráběla jen několik kW elektrické energie, stala se historicky nejmenší jadernou elektrárnou. Reaktor ML-1 byl navržen o výkonu 500kW_e a schopností pracovat 10 000 hodin mezi výměnami paliva. Zařízení bylo navrženo tak, aby bylo připraveno k provozu do 12 hodin po jeho příjezdu a připraveno k demontáži do 6 hodin. Přes téměř tři roky provozu do roku 1965 trpěla mobilní elektrárna pravidelnými mechanickými poruchami. Zkušební provoz poukázal i na nedostatečné stínění záření, které ohrožovalo zdraví obsluhy. Ekonomická analýza projektu také nebyla nakloněna. Celkové náklady na nákup a provoz ML-1 po dobu 10 let až 10krát převyšovaly náklady pro dieselové zařízení, a tak byl postupně celý projekt ukončen. [31].

Poslední reaktor vzniklý v programu ANPP je reaktor MH-1A. Reaktor byl umístěn na lodi Sturgis. Loď neměla vlastní pohon. Předpokládalo se, že bude dopravena na místo potřeby pomocí remorkéru a tam zakotvena. Reaktor dosahoval výkonu 10MW_e s obohacením paliva 4 až 7 %. Do provozu byl reaktor uveden roku 1967 a následujících 11 měsíců probíhalo testování. Po ukončení testování byla loď přesunuta do Panamského průplavu, kde působila až do roku 1975. K výměně paliva během provozu v Panamském průplavu došlo celkem pětkrát. Jako jedinečný vývojový prototyp měl reaktor vysoké provozní náklady, a proto byl po skončení projektu ANPP odstaven a převezen zpět do USA. [32]

3.2.2 Jaderné reaktory pro pohon námořních plavidel

Práce na prvním jaderném pohonu pro plavidlo započali ve 40. letech 20. století v USA. V roce 1955 vyplula na moře první jaderná ponorka USS Nautilus, která byla osazena reaktorem S2W². Z ponorek se díky jadernému pohonu s vysokým výkonem, bez potřeby vzduchu a schopností dodávat energii na několik týdnů bez nutnosti doplnění paliva staly válečné hrozby, a to znamenalo začátek zlaté éry ponorek. Následně se začal jaderný pohon používat i na letadlových lodích a křižnících. Jaderné pohony mimo USA začaly používat i další státy jako Sovětský svaz, Francie, Británie a Čína. Všechny reaktory pro pohon lodí a ponorek se konstruovaly jako tlakovodní s výjimkou jedné americké ponorky Seawolf (SSN-575) a sedmi sovětských ponorek třídy Alfa (projekt 705). Sovětský svaz se pokoušel i o reaktory chlazené směsí olovo-bismut. První jaderná ponorka SSSR s dvěma tlakovodními reaktory VM-A nesla označení K-3 a námořnictvo ji zařadilo do služby v roce 1958 [29]. [27]

V padesátých letech se v Sovětském svazu vyvíjely ve městě Obninsk rychlé množivé reaktory (FBR) a ve městě Gorkij pak olovo-bismutové reaktory. V roce 1955 začal fungovat reaktor BR-1 (v překladu rychlý reaktor) [28].

² Reaktor vyrobený firmou Wenstinghause, pro Americké námořnictvo

4 SHRUTÍ SOUČASNÉ SITUACE SMR

Nejvíce jsou vidět návrhy SMR reaktorů s lehkou vodou. Kvůli jejich podobnosti se stávajícími komerčními reaktory je lze obecně označit za nejnávštěvnější návrhy. Kromě těchto návrhů existuje řada projektů vycházející ze IV. generace reaktorů, vysokoteplotní reaktory chlazené plynem nebo reaktory s roztavenou solí. Tyto inovativní technologie nabízí zajímavé možnosti využití jaderné technologie a také nové bezpečnostní přístupy. Očekává se, že do roku 2030 by mohly být postaveny demonstrační jednotky některých projektů. Pokud jde o výrobu a nasazení těchto nových technologií, tak pouze technologická vyspělost stále ještě nestačí, ta se totiž nemusí projevit na připravenosti při nasazování SMR technologií do provozu. K dosažení předpokládaných výhod musí výrobní a implementační proces dosáhnout stejné úrovně jako technologická vyspělost. Za většinou návrhu stojí výrobci se silným zázemím v některých případech i stát, jako je tomu například v USA kde US DOE finančně podporuje vybrané SMR projekty [6]. Největší výzvou na cestě ke komerčnímu využívání SMR není výroba předpřipravených systémů a stavebních modulů, ale splnění jaderných regulací a úprava legislativy pro výstavbu a provoz SMR. Další velkou výzvou je naplnění ekonomické výhody výstavby, co se týče snížení prvotní investice a sdružených nákladů na výrobu energie s jakými počítají návrhy.

4.1 Současný vývoj SMR ve světě

Zájem o SMR technologii neustále roste, ovšem dosavadní zájem není tolik promítnut do významného počtu projektů. Počáteční plány pro nasazení a využití SMR lze vidět například v USA, Číně, Rusku, Velké Británii nebo v Kanadě. V současné době je ve světě kolem 50 různých projektů nebo návrhů SMR a mezi neaktivnější země v oblasti vývoje patří právě výše zmíněné země. Při zvažování nasazení nových technologií typu SMR se první elektrárny tohoto druhu stanou významnými pro budoucí rozvoj jaderné energetiky, protože v některých případech je lze považovat za demonstrační zařízení, zejména pro návrhy reaktorů vycházející ze IV. generace. Problém nastává z obav výstavby právě první demonstrační jednotky. Pokud není o projekt národní zájem a zároveň chybí finanční podpora ze strany státu, stává se výstavba nereálnou. Vlády USA a Velké Británie naznačily svůj zájem finanční podporou výstavby a následném exportu technologie [6]. Bez této podpory je velmi pravděpodobné, že některé projekty skončí v zaplacení. Mnoho společností tak uzavírá v zemích memoranda o porozumění, které mají prohloubit znalosti obou stran a prozkoumat možnost využití v daných státech. Velmi aktivní je americká společnost NuScale, která uzavřela tuto dohodu například v Estonsku, Polsku, Kanadě, Rumunsku, na Ukrajině a také v Česku [38].

4.1.1 Spojené státy americké

Americká podpora firem, které se zabývají vývojem SMR technologií probíhá ve větším rozsahu od roku 2012. V tomto roce ministerstvo energetiky USA (US DOE) vyčlenilo 450 milionů dolarů na vývoj malých modulárních reaktorů pracujících s lehkou vodou. Původně byla částka určena pro B&W a jejich návrh mPower, ovšem ten byl později zastaven [6]. Od té doby US DOE podporuje několik vybraných projektů SMR. Momentálně nejvíce financí proudí do projektu od firmy NuScale, který se nachází v nejpokročilejším stádiu. Návrh firmy NuScale v současné době prochází procesem licencování jadernou regulační komisí (US NRC), která by mohla být hotová v roce 2022. Spuštění první komerční elektrárny o výkonu 720 MW_e skládající se z 12 malých modulárních reaktorů od firmy NuScale je plánována na rok 2027 v Idaho National Laboratory spravovaná US DOE. Elektrárna bude určena pro komerční i testovací provoz. Jeden z dvanácti

modulů bude ve vlastnictví US DOE a zbytek bude vlastnit sdružení zastupující řadu energetických společností a jiné zájmové skupiny. Jaderná regulační komise v USA se také zabývá procesem povolení výstavby SMR do kapacity 800MW_e v lokalitě Clinch River, kde v minulosti měl stát prototyp rychlého reaktoru chlazený tekutým sodíkem. [39] [40]

Proces licencování US NRC je důležitý i pro ostatní projekty SMR z jiných zemí, protože regulační úřady z jiných zemí používají právě stanoviska US NRC jako referenční bod. V Evropě už to nemusí tolik platit, ale stále je to pro projekty SMR klíčový bod, protože projekt firmy NuScale je v procesu licencování oproti ostatním napřed, což dokazuje schválení několika důležitých aspektů návrhu. Mezi tyto důležité aspekty patří například rozhodnutí, že NuScale SMR nebude vyžadovat v naléhavých situacích záložní napájení, protože pasivní bezpečnostní řešení jsou považována za dostatečně robustní. Dále se US NRC rozhodlo snížit zónu havarijního plánování a SMR se tak může přiblížit možnosti využití pro dálkové vytápění nebo jiné použití v průmyslu, kde vzdálenost elektrárny/teplárny je od koncového odběratele velmi krátká. [41]

V roce 2018 schválil kongres několik zákonů, které umožňují soukromým a veřejným institucím provádět civilní výzkum a vývoj pokročilých jaderných technologií. Za tímto účelem bylo zřízeno Národní reaktorové inovační centrum (NRIC), které má za cíl usnadnit umístování soukromě financovaných pokročilých reaktorových prototypů v lokalitách US DOE, prostřednictvím partnerství mezi US DOE a soukromým sektorem. [6]

Americká Jaderná regulační komise vydala návrh dokumentu pro posuzování a licencování pokročilé nekonvenční technologie reaktorů. Koncem roku 2019 evidovala NRC celkem 6 návrhů reaktorů se záměrem požádat o jeho schválení. Jednalo se o tři MSR, jeden HTR a FNR a heatpipe reaktor eVinci od firmy Westinghouse. Na konci roku se Kanadská bezpečnostní jaderná komise (CNSC) společně s US NRC dohodli na společné technické revizi integrálního reaktoru s roztavenou solí společnosti Terrestrial Energy. [6]

4.1.2 Čína

Čína je velmi aktivní, co se týče jaderné energetiky, a to platí i v oblasti návrhů SMR, disponuje řadou projektů od různých firem. Čína má velký zájem o využití SMR pro různé případy použití jako dálkové vytápění, výroba elektřiny nebo použití vysokoteplotních reaktorů v průmyslu. Čínská vláda sponzoruje řadu programů pro výzkum a vývoj demonstračních reaktorů, včetně reaktorů III. a IV. generace pro komerční využití. Obecně lze říct, že jaderná energetika v posledním desetiletí zažívá v Číně obrovský rozmach což je zapříčiněno politickým rozhodnutím podporovat jadernou technologii. Potenciál SMR se zdá být v Číně mimořádný. Jak se tato skutečnost promítne do exportu SMR technologií mimo Čínu je nejasné, protože v současné době jediná čínská jaderná elektrárna v zahraničí je provozována pouze v Pákistánu, a právě různé regulační a licenční problémy by mohly stát v cestě exportu SMR technologií z Číny do světa. [42] [6]

Čínská národní jaderná společnost (CNNC) v polovině roku 2019 oznámila zahájení projektu na výstavbu malého modulárního reaktoru ACP100 v Changjiangu v provincii Hainan. Výstavba demonstrační jednotky by měla začít roku 2020. Konstrukce reaktoru se vyvíjí od roku 2010, předběžný návrh byl dokončen v roce 2014. Jedná se o tlakovodní reaktor v integrálním uspořádání. Reaktor je navržen jako víceúčelový určený pro výrobu elektřiny, tepla pro vytápění nebo pro odsolování mořské vody. Roku 2016 se projekt stal prvním SMR, který prošel bezpečnostní prověrkou IAEA. Reaktor – nazývaný také Linglong One – je klíčový projekt v 12. pětiletém plánu Číny a je vyvíjen z většího tlakovodního reaktoru ACP1000. Demonstrační

jednotka má být instalována pod zem a za úkol má ověřit návrh, výrobu, a provoz technologie SMR. Dle CNNC pomůže společnosti získat zkušenosti s provozováním malých jaderných elektráren a umožní ji prozkoumat budoucí trh pro SMR. Čínská národní jaderná společnost si od SMR technologie hodně slibuje, především co se bezpečnosti a flexibility nasazení týče, protože předpokládá nasazení v náročných lokalitách na území Číny. [5]

Čína se snaží postavit i plovoucí jadernou elektrárnu. K tomuto účelu vyvíjí malé modulární reaktory ACPR-100S a ACPR-50S, které jsou odvozené od reaktoru APC100. Jejich vývoj byl zahájen v roce 2010 a v roce 2016 CNNC oznámila přípravní práce na demonstračním projektu ACPR-50S a plány na zahájení výstavby v roce 2017. Plánované dokončení bylo stanoveno na rok 2020. [45]

Společnost China General Nuclear (CGN) v kooperaci s Tsinghua University vypracovává studii proveditelnosti o výstavbě první čínské jaderné teplárny, ta by používala v Číně vyvinutý nízkoteplotní reaktor NHR200-II. Výzkumné práce na možném využití jaderné teplárny započaly v Číně již v 80. letech. Ústav jaderné energie a technologie (INET) vyvinul reaktor „bazénového typu“ pro vytápění. Tento reaktor sloužil jako základ pro dnes zvažovaný model NHR200-II. Projekt NHR200-II nabízí dle CGN vysokou bezpečnost a lze jej použít pro širokou škálu aplikací. Vyznačuje se také možným flexibilním umístěním, může být vystaven v blízkosti koncových uživatelů. Konstrukce vyžaduje pouze dva až tři roky, pokud by se prováděla sériovou výrobou. Čínská vláda v roce 2017 učinila vytápění čistou energií jako svoji prioritu. Zveřejnila pětiletý plán, který zdůraznil vytápění čistou technologií se zohledněním tepla z jaderných elektráren. Teplo z jaderných elektráren je dnes v Číně považováno za ideální náhradu za spalování uhlí, pomůže omezit znečišťování ovzduší a sníží spotřebu uhlí. [44]

4.1.3 Rusko

Rusko hraje na poli výzkumu a vývoje SMR důležitého hráče, dlouhá historie používání malých reaktorů k pohonu ledoborců o tom svědčí. V Rusku je několik projektů SMR, které vznikají pod státem vlastněnou společností Rosatom. Společnost Rosatom se především zaměřuje na SMR použitelné jako plovoucí jaderné elektrárny, protože jejich potenciál je právě na severu země obrovský.

Na rozdíl od jiných SMR projektů je ruská „vlajková loď“ SMR návrhu – RITM-200 o kapacitě 50MW_e již vyzkoušená a otestovaná. Začátkem roku 2020 začala společnost Rosatom vyrábět již sedmý kus reaktoru RITM-200 pro čtvrtý ledoborec třídy LK-60. [50]

Dva menší reaktory KLT-40S o výkonu 35MW_e jsou v provozu na plovoucí jaderné elektrárně Akademik Lomonosov, která byla začátkem roku 2020 uvedena do provozu v autonomní oblasti Čukotka ve městě Pevek. Elektrárna zde slouží k výrobě tepla a elektrické energie místo Bilibinské jaderné elektrárny. Akademik Lomonosov je zkušební a testovací plovoucí jaderná elektrárna. Na základě zkušeností s její výstavbou a provozem se bude pracovat na výrobě dalších kusů. Ekonomická výhodnost se ukáže až se sériovou výrobou, proto se Rosatom snaží nalákat potenciální zákazníky i v zahraničí.

Koncem roku 2019 určil Rosatom dvě lokality pro možnou výstavbu demonstrační malé modulární jaderné elektrárny v Čeljabinské oblasti a v Jakutsku. Finální lokalita pro výstavbu jaderné elektrárny o výkonu 50 nebo 75MW_e bude vybrána v roce 2020. [51]

4.1.4 Kanada

V současné době se Kanadská komise pro jadernou bezpečnost (CNSC) zabývá přezkoumáváním několika návrhů SMR. Přezkoumání návrhu SMR je volitelný proces, o který může výrobce CNSC požádat. Proces nemá za následek žádné rozhodnutí, poskytuje však výrobcí ověření přijatelnosti návrhu SMR s ohledem na kanadské regulační požadavky a očekávání. [47]

V roce 2017 Canadian Nuclear Laboratories (CNL) projevila zájem o projekty SMR a dočkala se reakcí několika firem s návrhem SMR. CNL si klade za cíl do roku 2026 vybudovat demonstrační jednotku SMR ve svých prostorách na Chalk River a sloužit světu jako globální centrum výzkumu a technologie SMR. K roku 2019 jsou v projektu umístění demonstrační elektrárny zapojeny čtyři společnosti se svými návrhy. Společnost Global First Power se svými partnery byly první, kdo se dostal do třetí fáze hodnocení pro umístění jejich vysokoteplotního reaktoru o výkonu 5 MW_e. Ve třetí fázi se budou vést diskuse o pozemkových úpravách, řízení rizik projektu a smluvních podmínkách. Čtvrtá a závěrečná fáze by zahrnovala výstavbu, testování a uvedení do provozu. Na začátku roku 2019 CNL oznámila, že společnosti StarCore Nuclear, U-Battery Canada Ltd. a Terrestrial Energy se kvalifikovali pro vstup do druhé fáze hodnocení pro umístění demonstrační elektrárny v Chalk River. Proces licencování CNSC je zcela nezávislý na fázích a hodnocení návrhů CNL. [6] [46]

4.1.5 Velká Británie

Velká Británie má bohaté zkušenosti v oblasti jaderné energetiky. Provozuje 15 jaderných energetických reaktorů, které vyrábí více než 21% spotřebované elektřiny v zemi. Skoro polovina jaderné kapacity ve Velké Británii má být však do roku 2025 vyřazena z provozu. Malé modulární reaktory by tak měly možnost postupem času tuto kapacitu nahradit. Dokazuje to i zájem britské vlády, která v roce 2017 spustila program pro malé modulární reaktory s úkolem najít nejvhodnější návrh pro Velkou Británii. Do soutěže vstoupilo široké spektrum návrhů SMR technologie včetně domácího návrhu SMR od firmy Rolls-Royce. Celkové financování projektu s názvem: „Advanced Modular Reactor Feasibility and Development“ dosahuje 44 milionů liber. V září roku 2018 získalo osm společností zakázku na vypracování studie proveditelnosti první fáze projektu. [48] [49]

5 SMR TECHNOLOGIE

Největší podíl návrhů SMR tvoří lehkovodní reaktory (LWR, generace III+), jasná většina z nich jsou tradiční tlakovodní reaktory (PWR) nebo integrované tlakovodní reaktory (iPWR). Tyto typy reaktorů mají výhodu, jelikož se jejich princip příliš neliší od současných velkých jaderných reaktorů, i když je jejich konstrukce značně zjednodušena, modularizována a většinou je primární okruh integrálně uspořádán. Konstrukce varných reaktorů (BWR) jsou také principem podobné svým velkým bratrancům, ale tento typ není u SMR tak častý jako PWR. Jeden slibný návrh BWR vyvíjí společnost GE Hitachi.

Z návrhu reaktorů IV. generace je nejbližší uskutečnění vysokoteplotní, plynem chlazený reaktor (HTRG). Jako palivo reaktory HTRG většinou používají štěpný materiál o tvaru velmi malé kuličky s průměrem kolem 0,5 mm obalené povlaky z různých materiálů. Chladicím plynem je nejčastěji helium a jako moderátor se používá grafit. Tento druh paliva má několik výhod, je například stabilní do více než 1600 °C a v kombinaci s pasivním odváděním tepla a se záporným teplotním koeficientem reaktivity jsou konstrukce těchto reaktorů inherentně bezpečné. Výstupní teploty těchto reaktorů začínají na 700 °C a mohou tak být využity k výrobě procesního tepla pro průmysl. [6]

Malé modulární reaktory s roztavenými solemi (MSR) jsou ve srovnání s předchozími typy lehce v nevýhodě, protože tato technologie nebyla ještě komerčně nasazena. V konceptu MSR je palivem roztavená směs solí (konkrétně směs solí fluoridů lithného a berylnatého – FLiBe) s rozpuštěnými fluoridy uranu (^{235}U nebo ^{233}U) s nízkým obohacením (UF_4). Aktivní zóna se skládá z moderního grafitového moderátoru uspořádaného tak, aby umožňoval tok soli při asi 700 °C a při nízkém tlaku. [65]

Mezi tradičními návrhy tepelných reaktorů se objevují i rychlé reaktory, které mají některé výhody jako je menší množství produkovaných odpadů, lepší využití paliva a vyšší termodynamická účinnost tepelného cyklu, avšak vyžadují větší obohacení paliva (20 %). Použití sodíku jako chladiva u rychlých reaktorů vytváří další výzvy, protože sodík je vysoce reaktivní kov. S kyslíkem tvoří třaskavou směs a při reakci s vodou vzniká vodík, který velmi často samovolně vzplane, zatímco chladivo olovo-bismut způsobuje korozi. [6]

5.1 Mikroreaktory

Jaderné mikroreaktory jsou velmi malé jaderné reaktory obvykle vyrábějící méně než 10 MW_e. Jsou specifické svojí konstrukcí, reaktory používají technologii, která se nazývá „heatpipe“, tedy ve volném překladu tepelná trubice. Tekutina v mnoha uzavřených vodorovných ocelových trubicích slouží k pasivnímu vedení tepla z aktivní zóny reaktoru, kde se tekutina vypařuje do externího kondenzátoru s tepelnými výměníky. K dosažení trvalého oběhu kapaliny/páry nejsou potřeba žádná čerpadla. Princip je dobře proveditelný v malém měřítku, kde se jako tekutina používá kov a předpokládaný výkon je několik jednotek MW_e. Práce na reaktorech s tepelnou trubicí započaly roku 1994 v Los Alamos National Laboratory jako systém s nízkým rizikem pro průzkum vesmíru s důrazem na vysokou spolehlivost a bezpečnost. Jednotky byly prováděny o velmi malém výkonu, (do 100kW_e) a jako tekutina byl použit sodík. [6]

6 SMR V PROVOZU A VE VÝSTAVBĚ

6.1 KLT-40S

Tab. 6-1 Technické vlastnosti reaktoru KLT-40S [4]

Typ reaktoru	-	PWR
Elektrický výkon	[MWe]	35
Tepelný výkon	[MWt]	150
Životnost	roky	40
Primární cirkulace	-	Nucený oběh
Typ paliva	-	UO ₂
Obohacení paliva	[%]	18,6

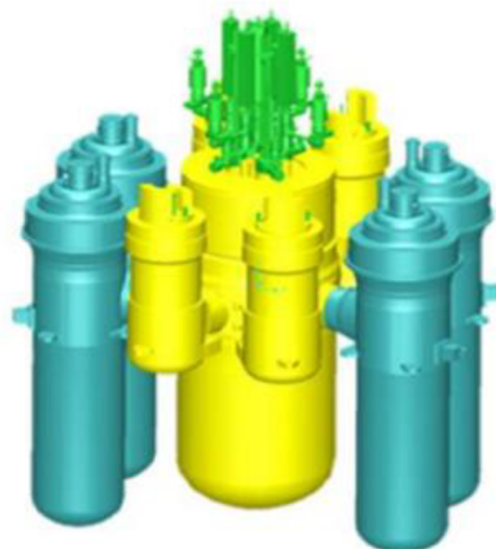
Jedná se o ruský reaktor vyvinutý společností Afrikantov OKBM o elektrickém výkonu 35MW_e na jeden modul. Vychází z konstrukce III. generace jaderných reaktorů používaných na vojenských plavidlech. Jeden modul disponuje výkonem 35 MW_e nebo 150 MW_t. Účelem plovoucí jaderné elektrárny je schopnost poskytnout dodávky energie a tepla do vzdálených oblastí izolovaných od distribuční sítě. Také může být použita pro odsolování mořské vody. Celou plovoucí jadernou elektrárnu lze vyrobit v loděnici a dodat na místo kompletně sestavenou, testovanou a připravenou k provozu. [4]

KLT-40S není integrální typ reaktoru, ale je založen na modulární konstrukci, kde reaktor a parogenerátor jsou umístěny těsně vedle sebe a jsou spojeny velmi krátkými kanály. Celkem má reaktor 4 smyčky s nucenou cirkulací, přetlakový primární okruh pracuje s tlakem 12,7 MPa. V každé smyčce se nachází jeden jednopřtokový parogenerátor a jedno cirkulační čerpadlo. Aktivní zóna se skládá ze 121 šestihranných palivových souborů umístěných v pravidelné trojúhelníkové mřížce. Je zde použito gadolinium jako vyhořívající absorbátor, který kompenzuje reaktivitu při vyhořívání paliva. Jako palivo je použit oxid uraničitý ve formě keramických pelet, které jsou uloženy v šestiúhelníkové kazetě. Obohacení paliva je do 20 %, stále se tak jedná o zařízení s nízko obohaceným uranem. Ačkoliv je reaktor za normálního provozu chlazen nuceným oběhem chladicí kapaliny (lehkou vodou), konstrukce je navržena tak, že při nouzovém chlazení se reaktor dokáže chladit i přirozenou konvekcí. [10] [4]

6.1.1 Akademik Lomonosov

Stavba plovoucí jaderné elektrárny Akademik Lomonosov byla zahájena v roce 2007 [6]. Jedná se o pilotní projekt pro budoucí flotilu plovoucích jaderných elektráren a pobřežních zařízení založených na modulárních reaktorech, které budou sloužit především v odlehlých oblastech ruského severního pobřeží.

Na lodi jsou instalovány dva reaktory KLT-40S, každý o výkonu 35 MW_e. Plovoucí jaderná elektrárna je připojena do sítě ve městě Pevek na poloostrově Čukotka. Do izolované rozvodné soustavy Chaun-Bilibino dodává elektrickou energii od 19. prosince 2019. V současné době pokrývá 20 % lokální poptávky elektrické energie. Jedná se o 11 jadernou elektrárnu v Rusku a zároveň nejsevernější jadernou elektrárnu na světě. [43]



Obr. 6-1 Schéma reaktoru a parogenerátoru KLT-40S [4]

Po zhruba devíti letech provozu čeká plovoucí jadernou elektrárnu návrat zpět do svého rodného přístavu kvůli výměně paliva a celkové údržbě. Místo v Peveku zaujme jiná plovoucí jaderná elektrárna, tentokrát vybavená modernějšími a výkonnějšími reaktory RITM-200M, která zabezpečí dodávky elektrické a tepelné energie v daném regionu. [55]

6.2 RITM-200

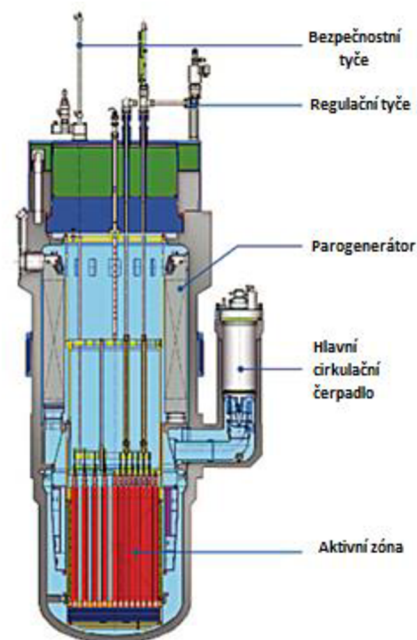
Tab. 6-2 Technické vlastnosti reaktoru RITM-200 [4]

Typ reaktoru	-	iPWR
Elektrický výkon	[MWe]	50
Tepelný výkon	[MWt]	175
Životnost	roky	60
Primární cirkulace	-	Nucený oběh
Typ paliva	-	UO ₂
Obohacení paliva	[%]	<20

Reaktor RITM-200 je nejnovější III+ generace reaktorů, od společnosti Afrikantov OKBM, pro použití jako pohon ledoborců LK-60. Ledoborec je vybaven dvěma reaktory RITM-200, oproti svým předchůdcům má reaktor kompaktnější konstrukci, vyšší účinnost a jeho provoz je ekonomičtější. Celkem jsou reaktory v provozu na třech ledoborcích, ledoborec Artika, Sibir a Ural [50]. Jedná se o nejmodernější typ ruských námořních reaktorů s výkonem 50MWe a 175MWt. Integrací parogenerátoru do tlakové nádoby je reaktorový systém ve srovnání s reaktory KLT-40S velmi kompaktní. Konstrukce RITM-200 umožňuje zvýšení výkonu o 40 % a zmenšení rozměrů a hmotnosti ve srovnání s KLT-40S. integrální konstrukce reaktoru spolu s dalšími pasivními i aktivními prvky zaručující bezpečný provoz. [4]

Reaktorová tlaková nádoba je válcového tvaru s odnímatelným víkem a se čtyřmi rameny, kde jsou umístěna hlavní cirkulační čerpadla, která jsou rozdělena do čtyř nezávislých smyček. Čerpadla jsou lamelové a každé má svůj utěsněný asynchronní motor. Jedna zavážka paliva do reaktoru vystačí na 7 let provozu a ekvivalentem k 540 tisícům tun paliva pro loď [55]. [4]

Společnosti Afrikantov OKBM plánuje i upravený reaktor RITM-200M pro stavbu malé jaderné elektrárny na pevnině. Reaktor by měl mít palivový cyklus 5-7 let s obohaceným palivem do 20 % [56]



Obr. 6-1 Schéma reaktoru RITM-200 (převzato a upraveno z [56])

6.3 HTR-PM

Tab. 6-3 Technické vlastnosti reaktoru HTR-PM [4]

Typ reaktoru	-	HTGR
Elektrický výkon	[MWe]	105
Tepelný výkon	[MWt]	250
Životnost	roky	40
Primární cirkulace	-	Nucený oběh
Typ paliva	-	TRISO
Obohacení paliva	[%]	8,5

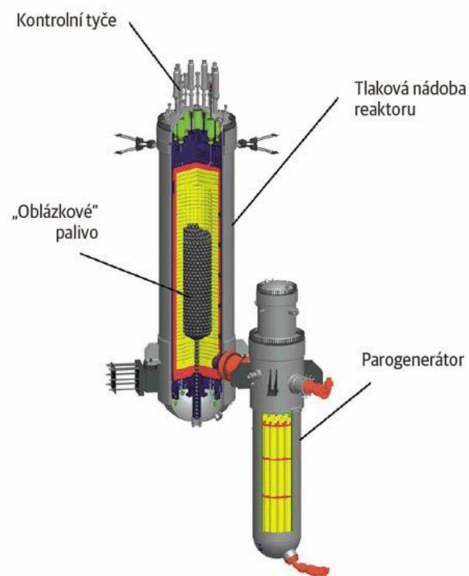
Na základě úspěchu reaktoru HTR-10 zahájila společnost INET vývoj komerční jaderné elektrárny obsahující modulární reaktor HTGR [58]. HTR-PM je čínský koncept vysokoteplotního plynem chlazeného heliem modulárního reaktoru. Reaktor HTR-PM navrhnutý společností INET používá grafit jako moderátor. Komerční demonstrační jaderná elektrárna se skládá ze dvou modulů reaktorů spojených s parní turbínou. Tlaková nádoba reaktoru je 24 m vysoká s vnitřním průměrem 6,7 m. Parogenerátor tvoří integrační modul spolu s hlavním cirkulačním čerpadlem a je přímo spojen s reaktorovou tlakovou nádobou. Reaktor je řízen pomocí řídicích tyčí a absorpčními kuličkami umístěnými do kanálů v grafitovém reflektoru po obvodu aktivní zóny. Objem aktivní zóny je 77,8 m³ a obsahuje 420 000 palivových článků kulového tvaru. [4]

Demonstrační jednotka HTR-PM ve městě Shidao Bay v provincii Šan-tung zahrnuje dva malé reaktory a turbínu. Stavba byla zahájena v prosinci roku 2012. Tlaková nádoba prvního reaktoru HTR-PM byla instalována v kontejnmentové budově v březnu roku 2016, druhá nádoba následovala ještě v témže roce. Plánované spuštění bylo v roce 2019, to se ovšem nekonalo a elektrárna je stále ve výstavbě. [57]



Obr. 6-3 Konstrukce demonstrační jednotky HTR-PM [57]

Bezpečnost reaktoru je charakterizována i velkým záporným teplotním koeficientem reaktivity. Palivo také disponuje velkou rezervou při teplotním selháním (1600 °C) [4]. Projekt slibuje vysokou bezpečnost, ovšem je zde nedostatek informací o výrobě, nasazení a ekonomické



Obr. 6-2 Schéma reaktoru HTR-PM [60]

stránce projektu. Nicméně čínské zdroje plánují použít stejného návrhu pro elektrárnu, která by obsahovala 6 modulů a jednu parní turbínu s výkonem 600MWe. [58]

HTR-PM používá jako palivo částice TRISO o průměru 0,5 mm, které jsou obsaženy v grafitových kuličkách („oblázcích“). Jádru částice TRISO je tvořeno z UO₂ a je obaleno vrstvou pyrolytického uhlíku a karbidu křemíku. Tento druh umožňuje nepřetržitou výměnu paliva i za provozu reaktoru. Je výhodné díky konstrukci, avšak jedná se o velmi drahý způsob výroby. [59]

6.4 CAREM

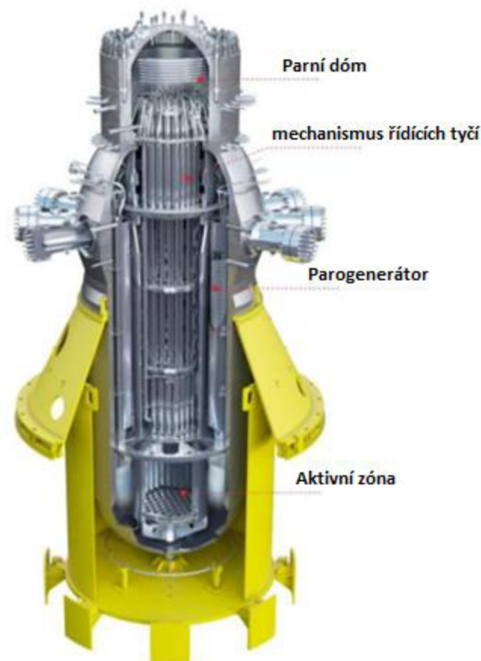
Tab. 6-4 Technické vlastnosti reaktoru CAREM [4]

Typ reaktoru	-	iPWR
Elektrický výkon	[MWe]	30
Tepelný výkon	[MWt]	100
Životnost	roky	40
Primární cirkulace	-	Přirozený oběh
Typ paliva	-	UO ₂
Obohacení paliva	[%]	3,1

CAREM je argentinský národní projekt SMR s výkonem 30MWe, založený na PWR technologii integrálního typu. Je kompletně vyvíjen Argentinskou národní komisí pro atomovou energii (CNEA) ve spolupráci s předními argentinskými společnostmi zaměřených na jadernou energii, až 70 % komponentů je vyrobeno přímo v Argentině. Je navržen do odlehlých oblastí k výrobě elektrické energie a tepla, nebo k odsolování mořské vody. [4]

CAREM je reaktor fungující na přirozené cirkulaci vody v primárním okruhu s různými vylepšeními, které zjednodušují konstrukci a zvyšují bezpečnost, jak bývá u SMR zvykem. Mezi hlavní charakteristiky návrhu se řadí – integrovaný primární chladicí systém, chlazení aktivní zóny přirozenou cirkulací, hydraulicky ovládané řídicí tyče umístěné v reaktorové tlakové nádobě a pasivní bezpečnostní systémy. Primární chladicí voda je hnána skrz aktivní zónu nahoru reaktorovou tlakovou nádobou. Poté vstupuje horní stranou do parogenerátorů umístěných v prstencovém obvodu nádoby, kudy opět proudí do aktivní zóny a uzavírá tak primární oběh. Sekundární voda vstupuje do parogenerátoru zespodu a proudí nahoru, aby odváděla teplo. Nakonec opouští parogenerátor v horní části v podobě přehřáté páry.[4]

Primární okruh je integrován do jedné tlakové nádoby vysoké 11 m s průměrem 3,4 m. Tloušťka reaktorové tlakové nádoby se pohybuje v rozmezí od 13 cm do 20 cm a je vyrobená z kované oceli s vnitřní vložkou z nerezové oceli. Ta obsahuje aktivní zónu, parní generátory, primární chladivo a parní kupoli. Přirozená cirkulace chladicí vody je umožněna díky umístění parogenerátorů nad aktivní zónou. Jakmile je vodě v aktivní zóně předána tepelná energie, voda stoupá středem reaktorové nádoby v tzv. „komínu“ do vrchní části nádoby. Až voda dosáhne vrchní části, proudí po vnitřních stranách nádoby přes 12 průtočných parogenerátorů, kde se ochladí, opět odteče dolů do aktivní zóny a zde uzavře cyklus chladicí kapaliny. [4]



Obr. 6-4 Reaktorová nádoba CAREM [4]

Aktivní zóna se skládá z 61 palivových souborů s aktivní délkou 1,4 metru s šestihranným průřezem, který je typický pro PWR východní konstrukce. Každý palivový soubor se skládá z 108 palivových proutků s vnějším průměrem 9 mm. Palivové proutky obsahují keramické pelety ve formě UO_2 s obohacením 1,8 % - 3,1 %. Palivový cyklus může být přizpůsoben preferencí provozovatele, návrh počítá s 510 dny provozu na plném výkonu a následné vyměnění jedné poloviny paliva. Reaktivita aktivní zóny je řízena vyhořívajícími absorbátory v určitých palivových tyčích a řídicími (absorpčními) tyčemi ve formě klastrů, které se zasouvají do vodících trubek v palivu. Jako absorpční materiál se používá slitina Ag-In-Cd. [11]

System bezpečnostního odstavení funguje na principu gravitace. System se skládá ze dvou nádrží naplněných vodou s kyselinou boritou. Tyto nádrže jsou umístěny v horní části kontejneru. Každá z nich je spojena s reaktorovou nádobou pomocí dvojice potrubí: jedna vede do horní části reaktorové nádoby a druhá ústí do spodní části nádrže. Při spuštění systému se ventily automaticky otevřou a voda s kyselinou boritou díky gravitaci odtéká do primárního systému. Vypuštění jedné nádrže má za následek odstavení reaktoru. Dalším bezpečnostním systémem odstavení je zajištěno pádem regulačních tyčí do reaktoru. [11]

7 POKROČILÉ SMR PROJEKTY

7.1 NuScale

Tab. 7-1 Technické vlastnosti reaktoru NuScale [4][66]

Typ reaktoru	-	iPWR
Elektrický výkon	[MWe]	60
Tepelný výkon	[MWt]	200
Životnost	roky	60
Primární cirkulace	-	Přirozený oběh
Typ paliva	-	UO_2
Obohacení paliva	[%]	<4,95

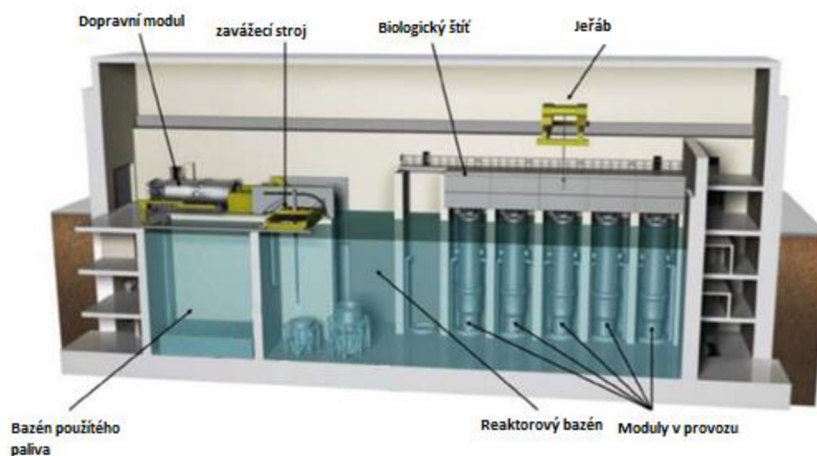
Jedná se o americký tlakovodní vodou chlazený reaktor, který má všechny komponenty pro výrobu páry a výměnu tepla integrované do jedné jednotky nazvané NuScale Power Module™ (NPM). Výkon jedné jednotky NPM je 50 MWe. Každá jednotka NPM pracuje nezávisle v multimodulové konfiguraci. V této konfiguraci může být zapojeno až 12 jednotek NPM, které jsou řízené z jedné blokové dozorny. Kompaktní a modulární konstrukce dovoluje sériovou výrobu v továrně a poté dopravení na připravené místo pro zapojení. [3]



Obr. 7-1 Vizualizace NPM [4]

Reaktorová tlaková nádoba je z oceli o průměru 2,7 m s výškou 17,8 m. Konstruována je na provozní tlak 12,8 MPa. Spodní část nádoby má příruby těsně nad oblastí aktivní zóny pro poskytnutí přístupu kvůli výměně paliva. V horní části nádoby

se nachází kompenzátor objemu a spirálovitý parogenerátor. Celá reaktorová nádoba je umístěna v ocelové kontejnmentové nádobě, která je umístěna v bazénu naplněném vodou. V kontejnmentové nádobě nad reaktorovou nádobou se nachází pohony regulačních souborů (klastřů). Reaktor pracuje na principu přirozené cirkulace, proto nejsou potřeba žádná cirkulační čerpadla. Voda se ohřívá při průchodu aktivní zónou reaktoru a díky menší hustotě stoupá tzv. „stoupačkou“ nahoru reaktorovou nádobou. Ve vrchní části reaktorové nádoby v parogenerátoru předává teplo a ochlazená voda, naopak díky větší hustotě, proudí reaktorovou nádobou opět do aktivní zóny reaktoru, kde uzavírá cyklus primární chladicí kapaliny. Každá NPM jednotka má dva parogenerátory vzájemně spirálovitě propletené. Parogenerátory jsou umístěny v prstencovém prostoru mezi „stoupačkou“ horké vody a stěnou reaktorové nádoby. Když horká chladicí voda v reaktorovém systému prochází parogenerátorem, teplo se přenáší stěnami trubek a voda na sekundární straně se mění na páru. Voda v parogenerátorovém systému je izolována od vody v reaktorovém systému, aby se se zabránilo kontaminaci. [4]



Obr. 7-2 Znárodnění budovy s jednotkami NPM (převzato a upraveno z [4])

Aktivní zóna se skládá ze 37 palivových souborů klasického západního typu s mříží 17x17. Jako palivo je použit UO_2 ve formě keramických pelet s obohacením do 4,95 %. Palivový cyklus je dlouhý 24 měsíců. Řízení reaktivity je v reaktoru realizováno primárně koncentrací kyseliny borité v primární chladicí kapalině a 16 regulačními soubory (klastry). Jako materiál pro absorpci v regulačních tyčích je použit karbid bóru (B_4C). Regulační soubory jsou rozděleny na skupinu ovládací a skupinu vypínací. Ovládací skupina se skládá ze 4 souborů symetricky rozmístěných v reaktoru a slouží pro regulaci reaktivity za provozu. Druhá skupina, vypínací skupina o 12 souborech, slouží k odstavení reaktoru z důvodu jak plánované odstávky, tak i odstavení v důsledku vyskytnutí mimořádné události. [4]

Společnost NuScale Power v prosinci roku 2016 předložila Jaderné regulační komisi (NRC) první žádost o certifikaci SMR NuScale v USA. NRC očekává dokončení licencování začátkem roku 2021 a první referenční jednotka NuScale 12 v Idaho by mohla být do roku 2030 plně v provozu [66]. Koncem roku 2019 společnost oznámila podání žádosti o posuzování svého reaktoru kanadské Komisi pro jadernou bezpečnost (CNSC), cílem je zjistit soulad s kanadskými pravidly pro jaderné elektrárny [61].

7.2 ACP100

Tab. 7-2 Technické vlastnosti reaktoru ACP100 [4]

Typ reaktoru	-	iPWR
Elektrický výkon	[MWe]	125
Tepelný výkon	[MWt]	385
Životnost	roky	60
Primární cirkulace	-	Nucený oběh
Typ paliva	-	UO ₂
Obohacení paliva	[%]	<4,95

Tento čínský návrh je vyvíjen od roku 2010 společností CNNC (China National Nuclear Corporation). Jedná se o integrovaný reaktor založený na principu současných PWR se zvýšenou bezpečností pomocí pasivních bezpečnostních systémů. Jako moderátor a chladicí médium je zde použita lehká voda. Hlavní komponenty primárního okruhu jsou instalovány uvnitř tlakové nádoby reaktoru a celý reaktor je umístěn pod povrchem. [5] Jeden reaktorový modul má výkon 125 MW_e a počítá se, že elektrárna se bude skládat ze dvou až šesti reaktorových modulů, přičemž životnost je plánována na 60 let a cyklus paliva je 24 měsíců. [6]

Reaktorová tlaková nádoba a rozložení komponent uvnitř je navrženo tak, aby byla umožněna přirozená cirkulace chladicí vody. Za normálního provozu je ovšem cirkulace chladicí vody zajištěna nuceným oběhem. O nucený oběh se starají 4 čerpadla. Je zde 16 průtočných parogenerátorů. Ty jsou umístěny v prstenci po vnitřním obvodu reaktorové tlakové nádoby. Kompenzátor objemu je umístěn mimo reaktorovou tlakovou nádobu. V systému je udržován provozní tlak 15 MPa. [4]

Aktivní zóna se skládá z 57 palivových souborů s délkou 2,15 m. Jako palivo je použit UO₂ ve formě keramických pelet s obohacením v rozmezí 1,9 až 4,95 %. Vedle palivových souborů se v reaktoru nachází i 21 regulačních tyčí, které jsou ovládány elektro-magnetickým pohonem. Řízení reaktivity probíhá pomocí zmíněných regulačních tyčí a také změnou koncentrace kyseliny borité v primární chladicí kapalině. [4]

Jeden z důležitých pasivních bezpečnostních prvků je systém na odvod zbytkového tepla, který zabraňuje roztavení aktivní zóny v případě havárie, ztráty elektrického napájení nebo úplné ztráty primární chladicí vody. Skládá se z jednoho chladiče, přidružených trubek a ventilů. Chladič je umístěn v akumulační nádrži na vodu pro doplňování paliva a teplo z aktivní zóny dokáže odvádět pomocí přirozené cirkulace po dobu 7 dnů bez jakéhokoli zásahu obsluhy. Pasivní ochrana také počítá s ochranou před vypařením vody z bazénu použitého paliva. Při naplnění bazénu použitým palivem za 10 let provozu, bude v případě nehody trvat 7 dní, než se voda vypaří a odkryje tak použité palivo. [4]



Obr. 7-3 Schéma reaktoru ACP100 [4]

7.3 SMR-160

Tab. 7-3 Technické vlastnosti reaktoru SMR-160 [4]

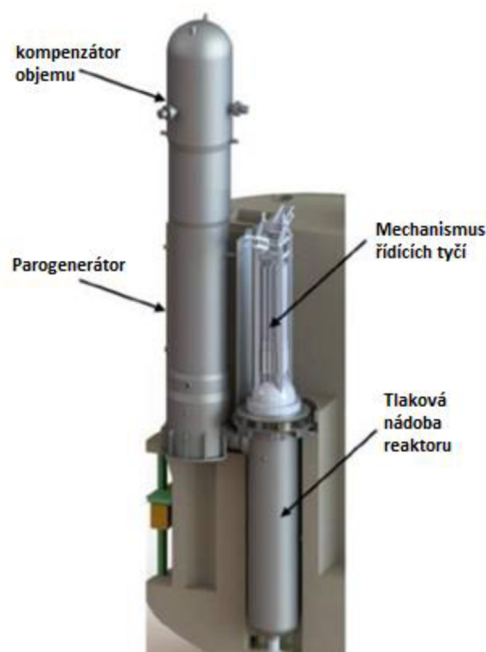
Typ reaktoru	-	PWR
Elektrický výkon	[MWe]	160
Tepelný výkon	[MWt]	525
Životnost	roky	80
Primární cirkulace	-	Přirozený oběh
Typ paliva	-	UO ₂
Obohacení paliva	[%]	<4,95

SMR-160 je SMR vyvíjený americkou firmou Holtec International. Jedná se pokročilý typ tlakovodního reaktoru produkující elektrický výkon 160 MWe, nebo tepelný výkon 525MW_t. Reaktorová tlaková nádoba by měla být uložena zcela pod zemí v ocelovém a betonovém kontejnmentu. [4]

Filozofie návrhu je řízena dosáhnutím bezpečného provozu bez využití aktivních bezpečnostních prvků, nebo činností operátora. Parogenerátor se nenachází přímo v reaktorové tlakové nádobě, nýbrž společně s kompenzátorem objemu je umístěn v samostatné nádobě. Aby se zachovalo zjednodušení, je parogenerátor spojen s reaktorovou tlakovou nádobou přímo bez použití potrubí. Hlavním důvodem tohoto uspořádání je snadnější přístup k aktivní zóně, a tedy rychlejší a pohodlnější výměna paliva. Cirkulace primární chladicí vody je zaručena samovolným oběhem. [7]

Reaktor používá palivo podobné tomu ve větších PWR. Celkem 32 palivových souborů je uloženo v jedné kazetě, která se mění jako jeden kus. Díky tomuto zjednodušení společně s umístěním parogenerátoru mimo reaktorovou tlakovou nádobu by měla výměna paliva probíhat maximálně jeden týden, a to jednou za 42 měsíců. Obohacení paliva je do 5 %. [6]

Dlouhodobé řízení reaktivity je zaručeno vyhořívajícími absorbátory obsaženými v palivu. Krátkodobé změny reaktivity řídí regulační tyče ve tvaru nože. Pohon regulačních tyčí je umístěn nad tlakovou nádobou reaktoru. Není zde použita regulace pomocí kyseliny borité v chladicí kapalině a díky tomu může být životnost modulu až 80 let. [4]



Obr. 7-4 Schéma uspořádání primárního okruhu v SMR-160 [4]

7.4 SMART

Tab. 7-4 Technické vlastnosti reaktoru SMART [4]

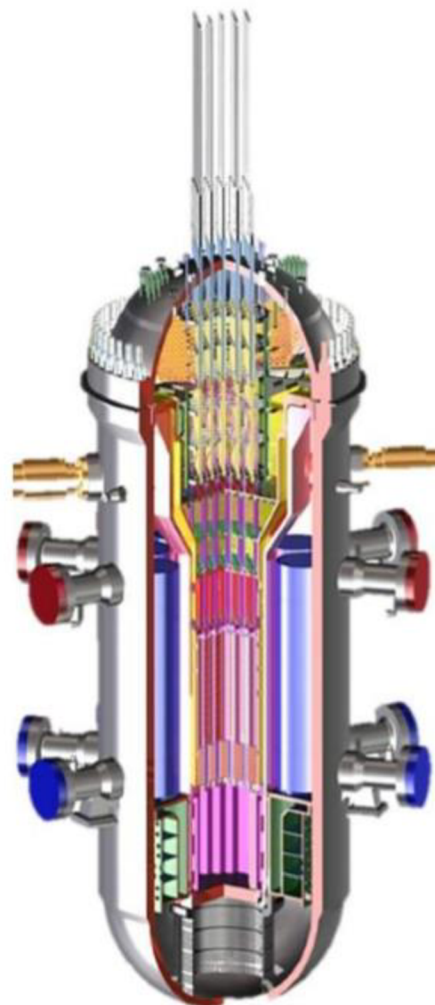
Typ reaktoru	-	iPWR
Elektrický výkon	[MWe]	100
Tepelný výkon	[MWt]	330
Životnost	roky	60
Primární cirkulace	-	Nucený oběh
Typ paliva	-	UO ₂
Obohacení paliva	[%]	<5

System-integrated modular advanced reactor zkráceně SMART je integrální PWR o výkonu 110 MW_e s pokročilými bezpečnostními prvky. Je navržen Korejským institutem pro výzkum jaderné energie (KAERI) pro výrobu elektrické energie nebo jiné tepelné aplikace jako je například odsolování mořské vody. V pozdější fázi vývoje byly veškeré aktivní bezpečnostní prvky zcela nahrazeny prvky pasivními. [6]

Sestava reaktoru SMART se skládá z palivových souborů, řídicích tyčí, 8 parogenerátorů, kompenzátoru objemu a 4 cirkulačních čerpadel obsažených v jedné reaktorové tlakové nádobě. Integrální uspořádání všech těchto komponentů umožňuje odstranit potrubí velkých rozměrů, které by jinak tyto systémy spojovalo a tím zásadně eliminuje riziko spojené s havárií LOCA. [13]

V aktivní zóně se nachází 57 palivových souborů s obohacením UO₂ do 5 %. Palivové soubory jsou 2 m dlouhé, jde o klasické soubory PWR západního typu s mříží 17x17. Řízení reaktivity během normálního provozu je dosaženo pomocí 25 regulačních tyčí a koncentrací kyseliny borité v primární vodě. O dlouhodobé řízení reaktivity se starají vyhořívající absorbátory, které jsou umístěny v aktivní zóně. SMART používá klasické elektromagnetické uchycení regulačních tyčí, které můžeme vidět ve velkých jaderných elektrárnách. [13]

Společnost KAERI plánuje první výstavbu v Saudské Arábii, již v roce 2015 zde došlo k posouzení potencionální výstavby reaktorů SMART. Náklady na výstavbu prvního reaktoru byly odhadnuty na 1 miliardu dolarů. V roce 2018 proběhly předprojektové práce, včetně prvního inženýrského návrhu a příprav na výstavbu dvou jednotek. Posledním prozatímním milníkem bylo podepsání memoranda o porozumění mezi Saudskou Arábií a Koreou v září roku 2019, kde obě země budou spolupracovat na zdokonalení návrhu reaktoru SMART. Korea také pomůže Saudské Arábii v procesu schvalování a poskytne pomoc při výstavbě a následném provozu reaktoru. [61]



Obr. 7-5 Model reaktoru SMART [4]

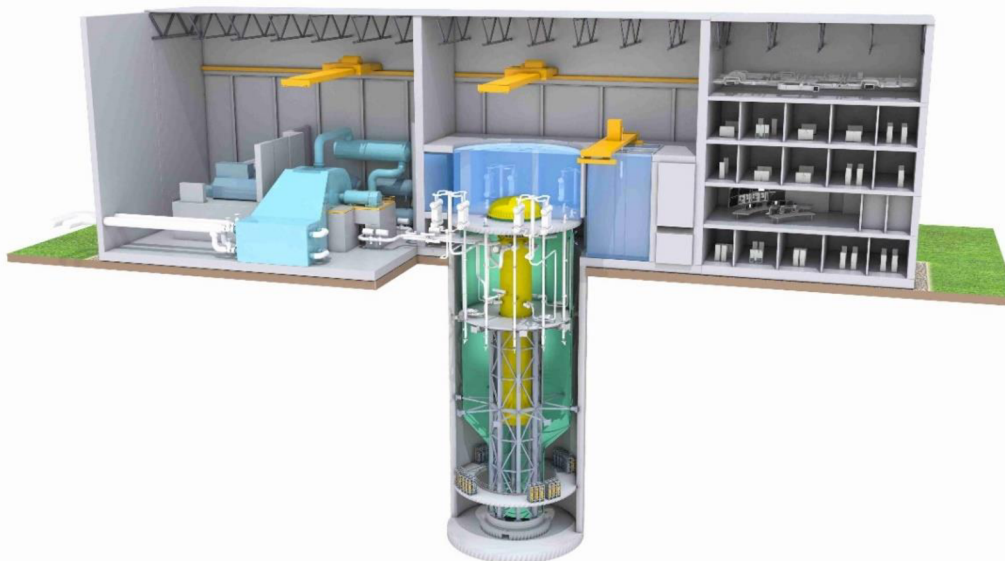
7.5 BWRX-300

Tab. 7-5 Technické vlastnosti reaktoru BWRX-300 [14]

Typ reaktoru	-	iBWR
Elektrický výkon	[MWe]	300
Tepelný výkon	[MWt]	910
Životnost	roky	60
Primární cirkulace	-	Přirozený oběh
Typ paliva	-	UO ₂
Obohacení paliva	[%]	-

SMR navrhnutý firmou GE – HITACHI. Jak už z názvu reaktoru vyplývá, jeho elektrický výkon je navržen na 300 MW_e. Reaktor představuje zjednodušený ovšem inovativní návrh BWR reaktoru založený na reaktoru ESBWR. Výsledkem je výrazné zmenšení a zjednodušení celého systému oproti velkému reaktoru. Většina komponentů a jaderných technologií má už mnohaleté provozní zkušenosti nebo podstoupila testování v rámci licence ESBWR. Společnost slibuje až o 60% nižší náklady ve srovnání s tlakovodními SMR, jejich cílem je zkonstruovat reaktor, který by po ekonomické stránce mohl konkurovat elektrárnám na zemní plyn a pomoci jaderným elektrárnám zůstat důležitou součástí energetického mixu. [14]

Méně nákladný by měl být i samotný provoz, obsluhu celé elektrárny by mělo obstarávat pouze 75 pracovníků [15]. Integrovaně uspořádané komponenty primárního okruhu do reaktorové nádoby umožňují využívat přirozenou cirkulaci chladicí vody a pasivní dochlazování aktivní zóny. Integrovaní uspořádání také eliminuje vznik LOCA. Kondenzace páry a přirozená konvekce zajišťují pasivní chlazení aktivní zóny po dobu sedmi dní bez elektrické energie nebo zásahu obsluhy během mimořádné situace. [14]



Obr. 7-6 Schéma celého komplexu elektrárny s reaktorem BWRX-300 [14]

V minulém roce společnost GE – HITACHI podepsala spolupráce v Estonsku a Polsku za účelem zjištění využitelnosti SMR v daných zemích. V květnu roku 2019 byla CNSC zahájena

revize technologie reaktoru BWRX-300 Kanadskou komisí pro jadernou bezpečnost (CNSC). Téhož roku společnost GE-Hitachi předložila Americké jaderné regulační komisi první licenční technickou zprávu pro reaktor a bylo tak zahájeno licencování v USA. [14]

7.6 IMSR[®]

Tab. 7-6 Technické vlastnosti reaktoru IMSR[®] [4]

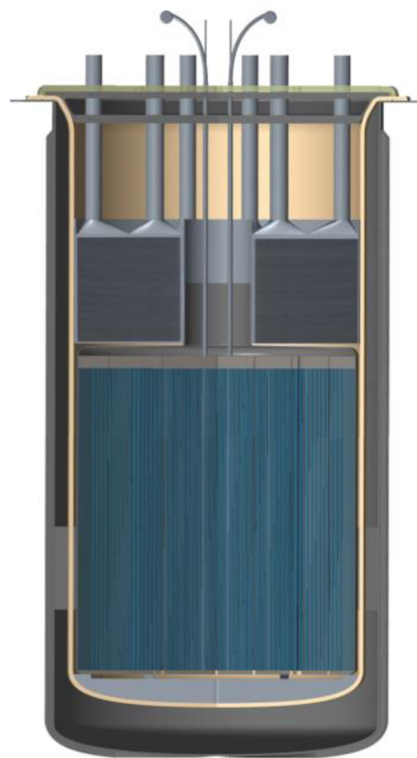
Typ reaktoru	-	iMSR
Elektrický výkon	[MWe]	190
Tepelný výkon	[MWt]	400
Životnost	roky	60
Primární cirkulace	-	Nucený oběh
Typ paliva	-	Roztavené solné palivo
Obohacení paliva	[%]	<5

Jedná se o integrální konstrukci reaktoru (MSR) chlazeného roztavenou fluoridovou solí a moderovaného grafitem od kanadské společnosti Terrestrial Energy. Společnost vyvinula zjednodušenou verzi klasického MSR reaktoru a veškeré komponenty primárního okruhu integrovala do uzavřené a vyměnitelné nádoby. Životnost nádoby je předpokládána na sedm let a životnost celé elektrárny pak na 60 let. Reaktor bude pracovat s výstupní teplotou 600-700 °C, to umožní využití tepla pro širokou škálu průmyslových aplikací. [61]

Uzavřená jednotka/nádoba se na konci své užitečné životnosti (7 let) zcela vymění. Tento způsob výměny paliva umožňuje obejít otázky týkající se materiálové technologie společné s reaktory s roztavenými solemi a odstraňuje potřebu otevřít a opravit reaktorovou nádobu v místě jaderné elektrárny. Při výměně celého modulu by byla zajištěna lepší ochrana před zneužitím jaderného materiálu. Bezpečnostní prvky IMSR[®] se spoléhají na inertní, stabilní vlastnosti solí, inherentně stabilní aktivní zónu, plně pasivní záložní chladicí systémy, kontejnment a integrální architekturu reaktoru. [4] [62]

V reaktoru nejsou žádné prvky pevného paliva. Palivem je „palivová sůl“ a tu tvoří eutektikum³ nízko obohaceného uranového paliva UF₄. Tato palivová sůl je zředěna s chladicí solí skládající se z jiných fluoridů. Solná eutektická směs společně tvoří palivo i chladivo, směs pomocí integrálních tepelných výměníků předává teplo do smyčky se sekundární chladicí solí. [4] [61]

Návrh reaktoru IMSR[®] se nachází ve druhé fázi hodnocení CNL pro umístění komerční SMR elektrárny v Chalk River, posuzování CNL nesouvisí s udělováním licence. Na konci roku 2019 byl návrh reaktoru od Terrestrial Energy vybrán jako pokročilý nelehkovodní jaderný reaktor ke společné technické revizi US NRC a CNSC. [6]



Obr. 7-7 Vyměnitelná jednotka IMSR[®] [62]

³ Jedná se tuhou směs dvou látek, jejichž krystaly se vytvářejí při tuhnutí společně.

7.7 UK SMR (Rolls-Royce SMR)

Tab. 7-7 Technické vlastnosti reaktoru UK SMR [4]

Typ reaktoru	-	PWR
Elektrický výkon	[MWe]	443
Tepelný výkon	[MWt]	1276
Životnost	roky	60
Primární cirkulace	-	Nucený oběh
Typ paliva	-	UO ₂
Obohacení paliva	[%]	<4.95

Reaktor UK SMR od společnosti Rolls-Royce (s podporou dalších firem) je tlakovodní reaktor se třemi smyčkami, který se na první pohled příliš neliší od konvenčních PWR reaktoru středního velikosti. Za SMR je považován zejména díky své modulární konstrukci. Reaktor je primárně určen k výrobě elektrické energie. [63]

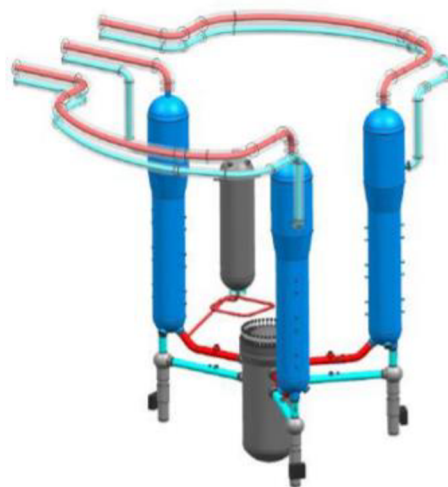
Reaktor je modulární, aby umožnil transport zařízení pro silnici nebo po moři a minimalizoval práci na místě výstavby. Konstrukce však není škálovatelná a pojme pouze jeden reaktor na jednu jadernou elektrárnu. Reaktor spoléhá na aktivní i pasivní bezpečnostní prvky, kde je celá jeho plocha chráněna robustním štítem. [63]

Společnost Rolls-Royce plánuje v roce 2030 postavit první SMR ve Velké Británii [4]. Celkem v zemi plánuje postavit 10 až 15 reaktorů. Plánují je stavět především na místech, kde stojí staré nebo již vyřazené jaderné reaktory. Vláda Velké Británie vyjádřila podporu projektu a zvažuje i finančně projekt podpořit. Kromě výstavby na domácí půdě Rolls-Royce věří i exportnímu potenciálu, zájem projevilo například Turecko. [63][64]

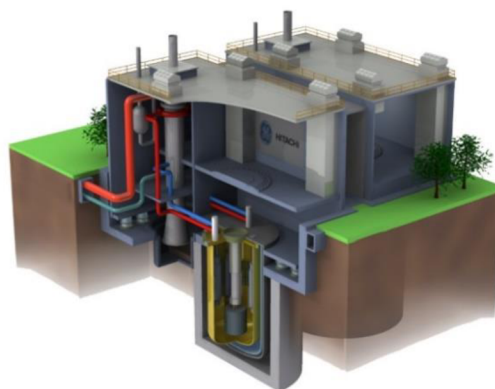
7.8 PRISM

Power Reactor Innovative Small Module, zkráceně PRISM – je další reaktor od společnosti GE – HITACHI, je modulární rychlý reaktor bazénového typu chlazený tekutým sodíkem. Využívá pasivní bezpečnostní prvky, blok tvoří dva reaktory každý se svým parogenerátorem. Celý primární systém je ponořený do bazénu naplněný sodíkem s teplotou kolem 500°C. Na rozdíl od současných LWR používá PRISM kovové palivo (slitina zirkonia, uranu a plutonia) tyto palivové tyče jsou ponořeny v bazénu s tekutým sodíkem za atmosférického tlaku, což zajišťuje, že přenos tepla z kovového paliva do kapalného sodíku je mimořádně výkonný. [67]

Ministerstvo energetiky spojených států (US DOE) v roce 2019 zahájilo projekt pro postavení zkušebního rychlého reaktoru. Idaho National Laboratory vybralo k tomuto účelu právě reaktor PRISM, který má být dokončen v roce 2026. [68]



Obr. 7-8 Vizualizace reaktoru UK SMR [4]



Obr. 7-9 Vizualizace reaktorové budovy PRISM [67]

7.9 U-Battery

Konstrukce reaktoru byla vyvinuta britskou společností Urenco ve spolupráci univerzit z Británie a Nizozemí. U-Battery je koncept mikro reaktoru schopný produkovat elektrický výkon 4 MW_e. Může být sestaven i pro provoz s kogenerací. Reaktor je chlazený heliem v primárním okruhu a dusíkem v sekundárním. Reaktor pracuje s teplotou okolo 750°C. Konstrukce umožňuje instalaci jednotky podle volby objednavatele – lze vyhovět různým specifikacím umístění. Flexibilita umožňuje instalování jedné nebo více jednotek. [17]

Palivem jsou takzvané TRISO (*tristructural isotropic*) částice. Průměr částic je 1 mm. Jádro je tvořeno z UO₂ a je obaleno vrstvou pyrolytického uhlíku a karbidu křemíku. Obohacení paliva je do 20 %. [18]

Koncept U-Battery se nyní nachází v před-licenční fázi. Kanadská komise pro jadernou bezpečnost (CNSC) bude zkoumat návrh reaktoru. Společnost Urenco plánuje zprovoznit pilotní reaktor do roku 2025. V této fázi se ověřuje přijatelnost technologie a možnost zajistit rychlejší proces pro budoucí licencování. [21]



Obr. 7-10 Vizualizace jednotky U-Battery [17]

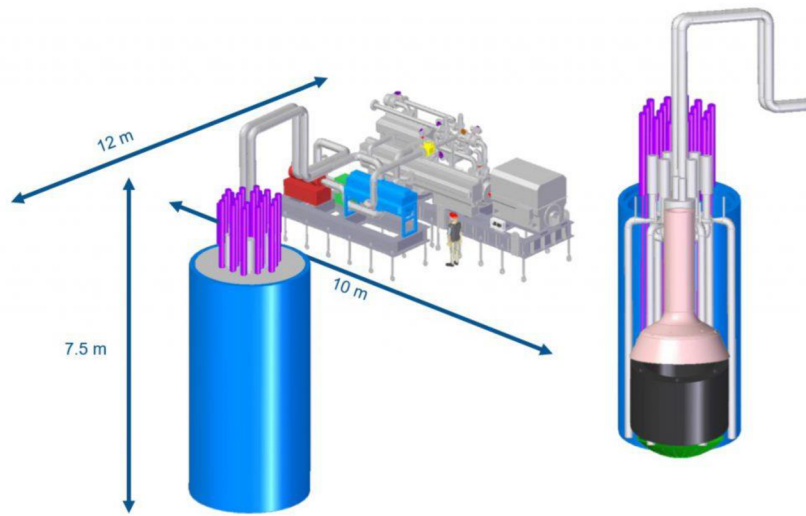
7.10 eVinci

Mikroreaktor od společnosti Westinghouse nabízí škálovatelný výkon 1,6 MW_e. Jednotka by pracovala na principu již zmiňovaného „heatpipe“ reaktoru a sloužila by k výrobě elektrické energie či kogeneraci. Reaktor by měl desetiletou životnost a poté by se vrátil do továrny k doplnění paliva. Velmi optimistický plán společnosti Westinghouse je uvedení eVinci do provozu kolem roku 2025. [6]

7.11 Energy Well

Koncept Energy Well je český projekt vyvíjený v ÚJV Řež. Jedná se o návrh malého modulárního reaktoru s výkonem 8,4 MW_e, který jako chladiivo používá tekuté soli, konkrétně směs solí fluoridů lithného a berylnatého, která je známá pod zkratkou FLiBe. [12] Palivem jsou částice TRISO s obohacením okolo 15 %. Délka jedné kampaně je projektována na 7 let. Reaktor je velice malý a lze jej přepravovat v kontejnerech o stejné velikosti jako mají kontejnery pro

přpravu použitého jaderného paliva. Po ukončení kampaně tak lze reaktor v kontejneru odvést a nahradit novým. Na vývoji se stále pokračuje. Mezi největší výzvy patří problémy s uchováváním solí a chování materiálů v tekutých solích. [16]

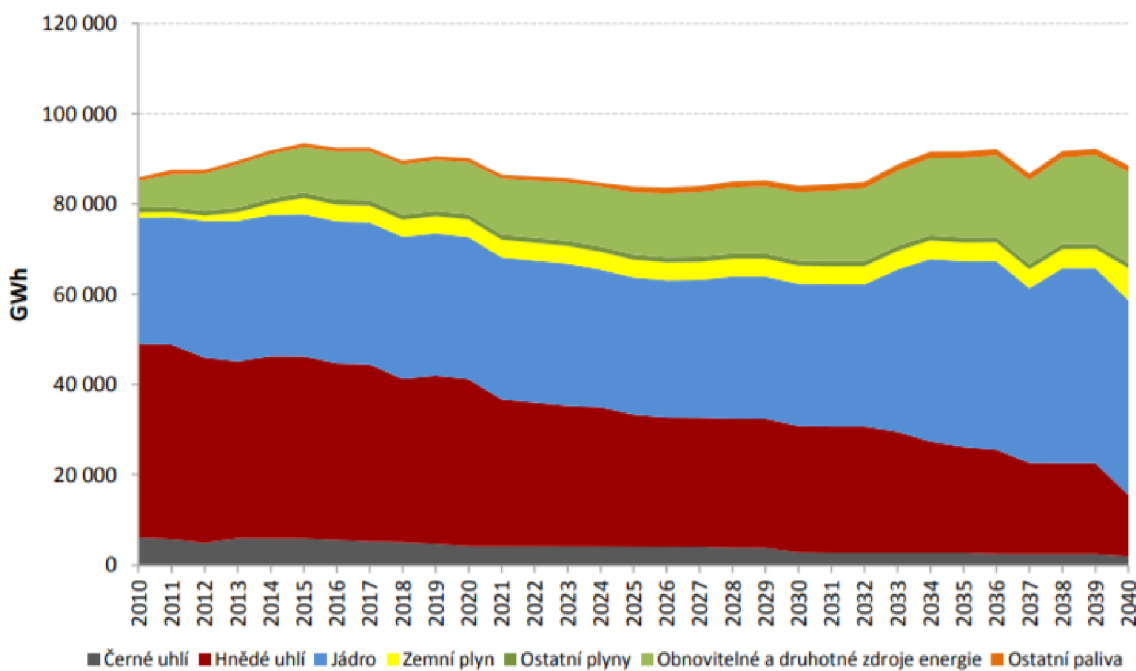


Obr. 7-11 Schéma návrhu reaktoru Energy Well [12]

8 MOŽNÁ POZICE SMR V ENERGETICE ČESKA

Spolehlivá a bezpečná dodávka energie pro potřeby obyvatelstva a ekonomiky Česka za konkurenceschopné a přijatelné ceny, a to způsobem šetrným k životnímu prostředí, je hlavním cílem Státní energetické koncepce (SEK). Klade za cíl zajistit nepřerušované dodávky energie v krizových situacích v rozsahu nezbytně nutném pro fungování nejdůležitějších složek státu a přežití obyvatelstva. [22]

První státní energetická koncepce byla schválena vládou ČR v roce 2004 a její součástí byla prognóza do roku 2030, dále také priority a cíle a způsoby pro jejich dosažení. Ovšem v následujících letech přišla řada významných událostí a ta měla i zásadní vliv na vývoj v oblasti energetiky. Za zmínku stojí vstup Česka republiky do EU, ekonomická krize v roce 2008 a následné zastavení růstu spotřeby elektrické energie, ale i vydatná státní podpora obnovitelných zdrojů a v neposlední řadě i dynamický vývoj energetické politiky v ostatních evropských státech. SEK z roku 2004 již přestala být aktuální a neodrážela skutečný směr a podobu energetiky v Česku. Pro to bylo nutné přijmout aktualizaci SEK i s přihlédnutím k plnění nových cílů EU – snižování emisí, decentralizace výroby, úspory ve spotřebě energie, podíl obnovitelných zdrojů v energetickém mixu. Nejnovější aktualizace SEK je z roku 2015, která obsahuje výhled do roku 2040. [22] [23]



Obr. 8-1 Předpokládaný vývoj výroby el. energie podle optimalizovaného scénáře ASEK [22]

V současné době je energetika ve světě ovlivněna značnou mírou vysoké nejistoty z dalšího vývoje z hlediska politického a ekonomického, rozvoje technologií a požadavků na ochranu životního prostředí a klimatu. Podstatná je i nutnost zajištění kvalitního energetického mixu a efektivní využití domácích zdrojů energie a surovin. Investice do výstavby nových energetických zdrojů zajišťují energetické společnosti a jejich rozhodování vychází z očekávané návratnosti investic. Stát prostřednictvím SEK stanovuje strategické cíle energetiky ČR a definuje strategické priority na období, ve kterém je obvykle zajištěna návratnost investic do všech druhů zdrojů. Státní energetická koncepce má za cíl poskytnout energetickým firmám dlouhodobě stabilní prostředí na

trhu, ale i možnosti pro nový technický a ekonomický vývoj. V dnešní době je problém těchto stabilních podmínek dosáhnout. Trh s energiemi provází rizika spojená především se změnami evropské legislativy a prosazováním politických cílů, které vedou investory k výstavbě právě těch zdrojů dotovanými státem. Energetické firmy v důsledku tohoto vývoje investují především do zdrojů, které jsou nějakým způsobem dotovány. Z toho vyplývá, že investice do zdrojů a sítí řídí spíše stát nikoliv samotný trh. Vývoj trhu bez korekcí státu za těchto podmínek směřuje k nevyrovnanému zdrojovému mixu s řadou strategických a systémových rizik pro budoucnost. [22]

Národní akční plán rozvoje jaderné energetiky v ČR (NAP JE) je dokument navazující na SEK, který taktéž schvaluje a aktualizuje vláda minimálně jednou za pět let. Vymezuje dílčí cíle v oblasti jaderné energetiky vzhledem k SEK. [33]

Státní energetické koncepce ani Národní akční plán rozvoje jaderné energetiky nepočítá s výstavbou SMR v Česku. Oba dokumenty se zaměřují pouze na výstavbu nového velkého jaderného zdroje do roku 2040. Vzhledem k tomu, že v současnosti není žádný komerční SMR v provozu nedá se předpokládat, že by pro plánovanou výstavbu pátého bloku jaderné elektrárny v Dukovanech byly SMR technologie k dispozici. Skoro všechny návrhy SMR jsou v takovém stádiu vývoje, kde lze jen těžko odhadnout, kdy se začnou realizovat. Šance na masové komerční využití do roku 2030 jsou téměř nulové. Ovšem jejich využití v budoucnu není vyloučeno, a to dokazuje i Skupina ČEZ, která zahájila spolupráci s firmou GE Hitachi Nuclear Energy. Společnosti se dohodly na zkoumání potenciální výstavby reaktoru BWRX-300 v Česku [24]. Podobně spolupracuje Skupina ČEZ i s americkou firmou NuScale, firmy budou sdílet technické poznatky a posoudí možnost uplatnění SMR technologie v ČR [25]. Obě tyto partnerství poukazují na budoucí možnou alternativu výroby elektrické energie, kterou se SMR v Česku mohou stát.

Česko, co se týče rozlohy, je malá země s rozsáhlou přenosovou a distribuční sítí, která pokrývá spolehlivě území Česka a zajišťuje distribuci elektrické energie po celém území. Využití SMR v odlehlých, trvale zamrzlých či těžko dostupných oblastech tedy nepřipadá v úvahu. Malé modulární reaktory mohou být budoucností jaderné energetiky a také řešením pro bezemisní výrobu elektrické energie i tepla a tím se stát součástí národního energetického mixu. V Česku se stále více než polovičním podílem na výrobě elektrické energie podílí uhelné elektrárny [22]. Česko se hlásí k závazkům EU o snižování emisí CO₂ na absolutní minimum a bude muset postupně ukončovat uhelné elektrárny. Tady se naskytuje možnost pro SMR, které by se mohly stát bezemisními náhradami uhelných elektráren. Mezi odstavované zdroje budou patřit i více či méně významní producenti dodávkového tepla do CZT (Centrální zásobování teplem). U těchto větších zdrojů lze uvažovat o výstavbě náhrady v podobě jaderné teplárny založené na SMR. S přihlédnutím ke zvýšené pasivní bezpečnosti, jakou se SMR technologie prezentují, lze plánovat i umístění elektráren v blízkosti velkých měst. Velmi důležitou roli bude hrát proces licencování SMR v EU, ale i úprava legislativy týkající se výstavby SMR elektráren. Bez její úpravy se o výstavbě SMR v ČR nedá uvažovat. V Evropské unii i v ČR pro udělení licence chybí jasné definice a pravidla.

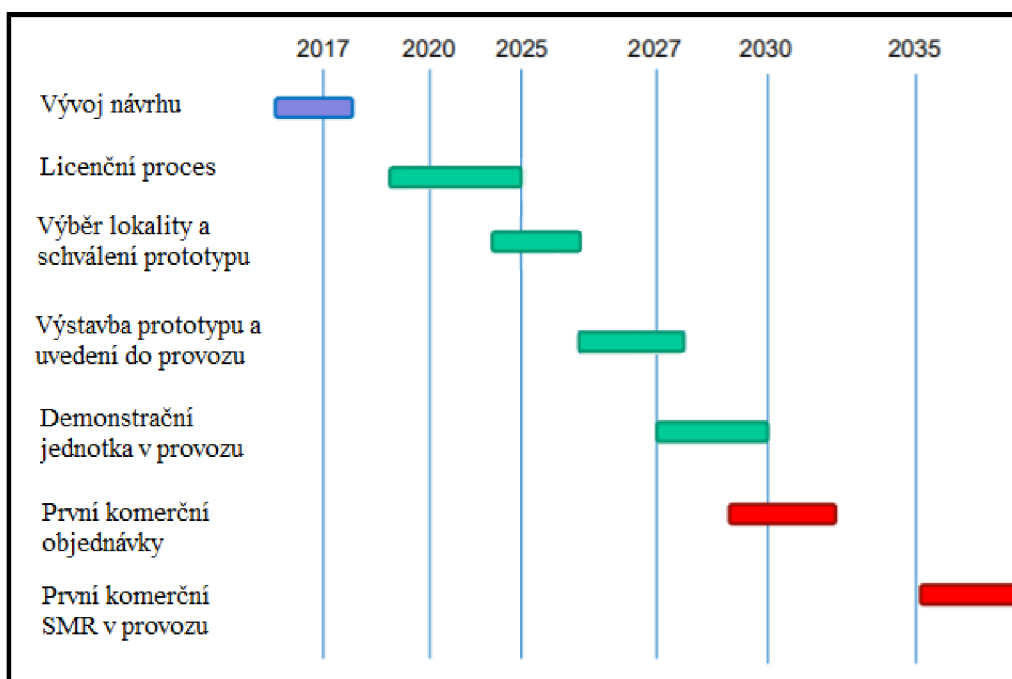
8.1 Využití a možnosti výstavby SMR

Jak již bylo zmíněno, SMR je poměrně nová technologie, se kterou SEK ani NAP JE nepočítá. To ovšem neznamená možnost uplatnění SMR v Česku a pomoci tak dosáhnout snížení emisí CO₂ a navýšit podíl výroby jaderné energie, jak si klade za cíl SEK (Obr. 8-2). Obnovitelné zdroje (OZE) budou mít velký vliv na transformaci energetiky. Česko má však na rozdíl například od

Německa omezený potenciál využívání obnovitelných zdrojů stanovený především přírodními podmínkami. Jaderná energie tak zůstane pilířem české energetiky. Malé modulární reaktory nejsou konkurencí pro OZE. SMR by vedle OZE byly zdroje zajišťující stabilitu s částečnou schopností regulace sítě.

Řada projektů SMR blíží klasickému pojetí jaderné elektrárny – je vytvořen jeden velký jaderný blok a ten se skládá z několika reaktorových modulů a dohromady tvoří podobný výkon jako jeden velký jaderný reaktor (NuScale nebo HTR-PM). Tato konfigurace oproti klasickým velkým reaktorům má několik výhod. Hlavní, v této bakalářské práci již zmíněná, výhoda spočívá v menších investičních nákladech a možnosti náklady rozprostřít díky spouštění jednotlivých reaktorových modulů postupně, kde první vystavěný modul generuje zisk a ten lze použít k výstavbě dalšího modulu. Ovšem celkové náklady na vyprodukovanou kilowatthodinu se předpokládají vyšší než u velkých jaderných elektráren. Najdou se i jiné projekty, které jsou více inovativní a jejich způsob využití se blíží spíše kompaktní jaderné baterii, která by mohla sloužit jako lokální zdroj elektrické energie nebo tepla. Z nabízených možností se pro situaci Česka nejvíce hodí SMR pro výrobu elektrické energie nebo tepla pro CZT.

Největší překážkou v budování SMR v Česku je fakt, že většina projektů SMR elektráren se nachází ve fázi projektování nebo návrhů a veškeré výhody, které by mohly přinést jsou zatím vidět pouze na „papíře“, který prezentují společnosti navrhující SMR. Ekonomická výhodnost bude prokázána až sériovou výrobou a komerčním využitím. Následující obrázek znázorňuje teoretický harmonogram uvedení SMR do provozu.



Obr. 8-2 Ilustrativní harmonogram uvádění prvních SMR ve světě do provozu

[70]

V Česku by se SMR mohly začít stavět až po úspěšném získání licence a zahájení komerčního provozu v zahraničí. Zahájení výstavby v Česku se tak dá předpokládat nejdříve po roce 2040. V následující tabulce jsou uvedeny návrhy SMR, které byly v této práci vyhodnoceny jako nejpokročilejší z hlediska fáze vývoje a licencování. V tabulce chybí reaktor KLT-40S, který slouží

pouze pro použití na plovoucích jaderných elektrárnách a v současné době má již nástupce v podobě RITM-200 pro plovoucí jaderné elektrárny a RITM-200M pro použití na pevnině.

Tab. 8-1 Uvažované návrhy SMR a jejich specifikace [4] [6]

Návrh	Typ	Společnost	Počet reaktorových modulů	Celkový el. výkon [MWe]	Celkový tep. výkon [MWt]
CAREM	iPWR	CNEA & INVAP	1	30	100
HTR-PM	HTR	INET, CNEC & Huaneng	2	210	250
			6	630	750
			12**	1260	1500
NuScale*	iPWR	NuScale Power Inc.	12	720	2400
ACP100	iPWR	CNNC	1	125	385
RITM-200M	iPWR	OKBM	2	100	350
SMR-160	PWR	Holtec International	1	160	525
SMART	iPWR	KAERI	1	100	330
BWRX-300	iBWR	GE – Hitachi	1	300	910
IMSR®	iMSR	Terrestrial energy	1	190	400
UK SMR	PWR	Rolls-Royce a partneři	1	443	1276

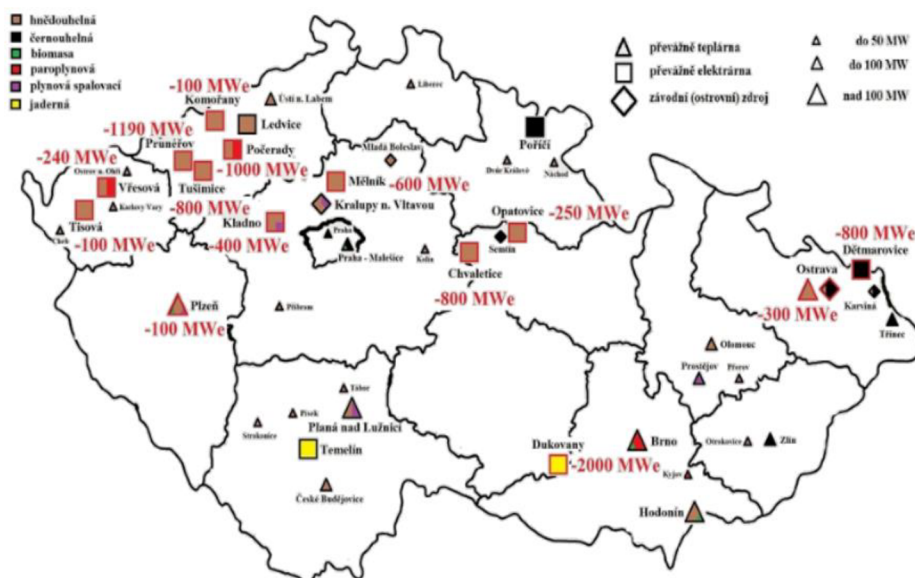
* Data o výkonu jsou převzata z [66]

** Zdroj [69]

V následující části bakalářské práce je vybráno a prezentováno několik možností nahrazení vybraných konvenčních zdrojů energie (především elektráren a tepláren na fosilní paliva) právě SMR technologií.

8.1.1 Analýza náhrady uhelných elektráren

V roce 2019 vyprodukovaly uhelné elektrárny na území Česka 41 386 GWh elektrické energie, to je celkem 47,6 % vyrobené elektrické energie v Česku za rok 2019 [54]. Současný instalovaný výkon hnědouhelných elektráren je v Česku přibližně 10 800 MWe [70] a podle SEK bude v následujících desítkách letech využití uhelných zdrojů významně klesat. Ubytek energetických zdrojů v Česku reprezentuje následující obrázek.



Obr. 8-3 Stav výroby elektrické a tepelné energie v roce 2045 [70]

Tab. 8-2 Uhelné elektrárny nad 700 MW instalovaného výkonu na území Česka [70][71]

Elektrárna	Instalovaný výkon [MW]	Palivo
Prunéřov I a II	1190	hnědé uhlí
Počerady	1000	hnědé uhlí
Chvaletice	820	hnědé uhlí
Tušimice II	800	hnědé uhlí
Dětmarovice	800	černé uhlí

Tabulka 8-2 zobrazuje 5 největších uhelných elektráren a jejich výkonnostní hladiny. Nejblíže k těmto výkonům má dvanácti modulová elektrárna NuScale s výkonem 720 MW_e a taktéž 12 modulový komplex reaktorů HTR-PM s výkonem 1260 MW_e.

Elektrárna NuScale a její možnost škálovatelnosti 12 modulů z ní dělá ideální náhradu uhelných zdrojů. Škálovatelná konstrukce umožňuje dosáhnout plného výkonu elektrárny v 95 % provozní doby [66]. Při doplňování paliva bude jeden reaktor odstaven a zbylých 11 může stále produkovat 660 MW_e. Technologie NuScale je vhodná pro integraci s OEZ, a to díky jedinečné schopnosti regulace výkonu, která dokáže reagovat na aktuálních změn v síti. Existují tři způsoby, jak změnit výstupní výkon z elektrárny NuScale [66]:

- Odstavení jednoho nebo více modulů kvůli dlouhodobému snížení poptávky el. energie nebo trvalého výkonu obnovitelných zdrojů.
- Možnost upravování výkonu jednoho nebo více reaktorů za účelem kompenzace hodinových změn v síti.
- Odvedení páry z reaktoru přímo do kondenzátoru (pára neprochází přes turbínu) pro rychlou reakci na změnu zatížení sítě.

Konstrukce elektrárny NuScale umožňuje vysokou flexibilitu, co se týče využití energie, například některé moduly mohou být vyhrazeny na výrobu elektrické energie, zatímco jiné moduly mohou poskytovat výrobu tepla pro CZT.

Tab. 8-3 Vybrané uhelné elektrárny v rozmezí 200-600 MW instalovaného výkonu na území Česka [70] [71]

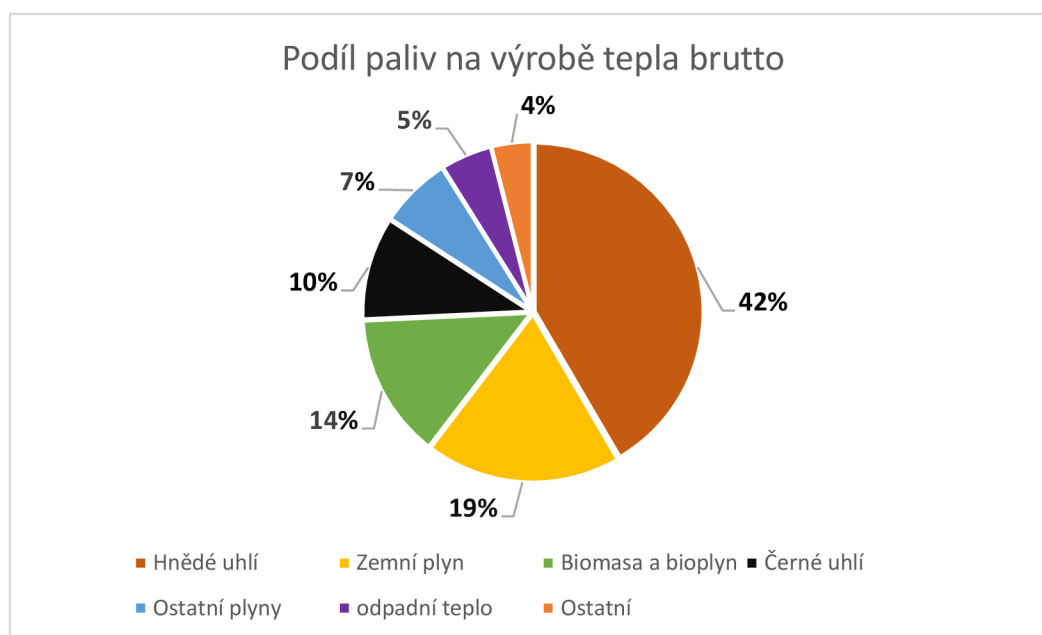
Elektrárny	instalovaný výkon [MW]	palivo
Mělník II	220	hnědé uhlí
Mělník III	500	hnědé uhlí
Ledvice IV	378	hnědé uhlí
Opatovice	378	hnědé uhlí
Kladno	406	hnědé uhlí

V tabulce 8-3 jsou vybrané uhelné elektrárny s podobnou výkonnostní hladinou jakou nabízí dvojice návrhů BWRX-300 a UK SMR. Elektrárny Mělník III. a Ledvice IV. jsou využívány výhradně k výrobě elektrické energie, stejně jako mají být i dva zmíněné návrhy SMR. Elektrárna Mělník II. funguje jako kogenerační jednotka, kdy až 20% energie je použito na výrobu tepla [70]. Ačkoli jsou návrhy BWRX-300 a UK SMR projektovány na výrobu elektrické energie, možnost kogenerace není (dle společností pracujících na vývoji) vyloučena. Naopak v případě elektráren Kladno a Opatovice, kde se jedná spíše o teplárny lze provozovny nahradit návrhem SMR od Terrastrial Energy v podobě reaktoru IMSR[®], který je díky použité technologii vhodnější pro

dodávku tepla než klasické lehkovodní reaktory. Výstupní teplota z reaktoru ISMR[®] může být až 600 °C [62].

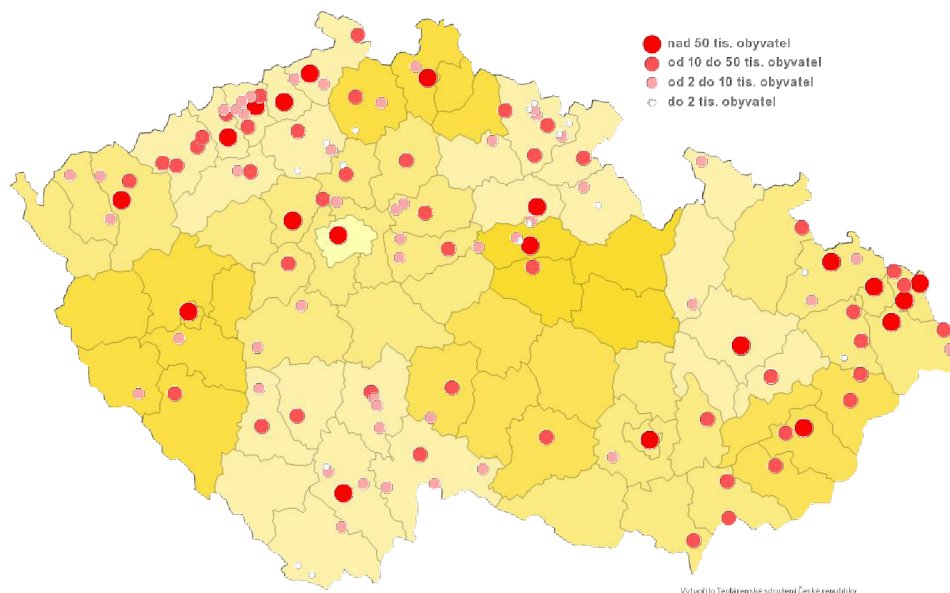
Myšlenka využití jaderných reaktorů k primární výrobě tepla není v Česku nová, o využití jaderného tepla k vytápění se zabývala Československá komise pro atomovou energii již v roce 1976 [72]. V roce 2010 obnovilo myšlenku využití jaderné teplárny město Jablonec a o 4 roky později Plzeňské teplárny [19]. Hlavní motivace pro vybudování jaderné teplárny pomocí SMR je dáno sníženými nároky na umístění SMR díky pasivní bezpečnostní a umístění reaktoru pod zemí s více bezpečnostními pláští. Z toho to důvodu může být uvažováno umístění elektráren v blízkosti měst a napojení tak na CZT. V současnosti lze v Česku nalézt rozsáhlé soustavy CZT. Jedná se o centrální výrobu tepla a následný rozvod do míst spotřeby. Soustavy jsou velmi rozmanité a liší se použitou technologií výroby i velikostí. Centrálně vyráběné teplo dnes využívá cca 4 mil. občanů [34]. Infrastrukturu CZT zahrnuje 7,5 tis. km dlouhá síť, přes 2000 licencovaných provozoven tepla a celkově v oblasti rozvodu a výroby tepelné energie v Česku podniká více než 1 100 subjektů [37].

V následujícím grafu lze vidět podíl jednotlivých paliv na dodávkách tepla za rok 2018 (Dodávkou tepla se rozumí množství tepelné energie dodané do soustavy zásobování teplem).



Obr. 8-4 Graf vyobrazující podíl paliv na výrobě tepla [35]

Jak zobrazuje obrázek 8-5 města Jablonec a Plzeň jsou jen jedny z mnoha lokalit, které využívají CZT se zdrojem na fosilní paliva, a právě tyto lokality jsou budoucí potenciální možnosti nasazení SMR technologie.



Obr. 8-5 Lokality na území Česka s CZT [36]

Mapa na obrázku 8-5 zobrazuje místa s rozvinutou sítí CZT, kde je zajištěn i odbyt elektrické energie. Výkon SMR by se pro danou lokalitu posuzoval individuálně, v závislosti na počtu obyvatel připojených k CZT.

9 ZÁVĚR

Malé modulární reaktory mohou být součástí budoucnosti jaderného průmyslu. Jsou připraveny splnit řadu technologických aspektů, které se v současné době kladou na nové jaderné zdroje – snadno vybudovatelné a ekonomicky přívětivé, flexibilní, co se týče možnosti využití, ekologické, a především s pokročilým bezpečnostním řešením. Stále ovšem existuje mnoho překážek, které je potřeba překonat. Z technického hlediska a řešení bezpečnosti SMR však splňují svá očekávání. Návrhy SMR zmíněné v bakalářské práci se prezentují pokročilými bezpečnostními prvky, téměř většina z nich má primární okruh integrovaný do jedné tlakové nádoby, a to umožňuje zmenšit a zjednodušit konstrukci. Odvod tepla je díky menšímu jmenovitému výkonu, menším rozměrům AZ a většímu poměru chladiwa ku palivu zajištěn lépe než u velkých jaderných reaktorů. Výsledkem jsou bezpečné reaktory, které se v případě mimořádné události, bez nutnosti zásahu obsluhy, bezpečně odstaví. Samotná technologie se jeví konkurenceschopně a není zde (až na výjimky typu reaktorů chlazených solí) překážka pro výstavbu SMR. Ovšem i zde je prostor ke kritice – modularizace jaderných elektráren není jednoduchý proces. Výrobní proces a sériová výroba vyžadují vysokou úroveň technologické připravenosti a je potřeba zajistit dodavatele součástí s dostatečnou odborností pro splnění cílů návrhu SMR. Nejistoty týkající se výrobních procesů se také promítají do nejistot ohledně ekonomické stránky SMR. Předpokládá se, že snížení nákladů na výstavbu se docílí především modularizací, sériovou výrobou a s tím i spojenou krátkou dobou výstavby. Dokud však nebudou v provozu první komerční elektrárny vybavené technologií SMR, nelze v současné době s jistotou říct, jak dobře SMR splňují tyto vytyčené cíle. Největším důvodem, proč ještě nejsou SMR komerčně nasazeny, je licencování, které v některých případech může být problematické a zdlouhavé.

Malé modulární reaktory nabízí mnoho způsobů využití: výroba elektrické energie, výroba tepla pro vytápění, odsolování mořské vody nebo výroba tepla pro průmysl. V současné době, kdy se svět snaží zbavit závislosti na fosilních palivech, se SMR zdají být vhodné jako dobrý doplněk do energetického mixu. Vše bude záležet na ekonomické výhodnosti. Ta (jak již bylo zmíněno) spočívá v sériové výrobě stejných modulů, jejichž cena klesá s počtem vyrobených kusů. V případě potřeby většího výkonu lze doplnit elektrárnu dalšími moduly.

Některé státy, které se nejaktivněji podílí na vývoji SMR již provozují nebo mají ve výstavbě první SMR. V Číně se blíží dokončení reaktoru HTR-PM [57] a plánuje se výstavba reaktoru ACP100 [5]. Rusko úspěšně spustilo reaktory KLT-40S na plovoucí elektrárně Akademik Lomonosov [43]. Dále také provozuje reaktory RITM-200 na ledoborcích [50] a plánuje výstavbu elektrárny s reaktory RITM-200M [56]. Ve Spojených státech amerických vypadá nejslibněji projekt NuScale, nacházející se v procesu licencování a podle posledních odhadů by se měl dočkat spuštění první elektrárny kolem roku 2030 [66].

Státní energetická koncepce České republiky z roku 2015 s možnou výstavbou SMR zatím nepočítá, avšak nedávno uzavřené dohody o porozumění mezi společností ČEZ a americkými firmami, NuScale a GE Hitachi, dokazují z naší strany zájem o technologii SMR. Zájem v této oblasti dokazuje i první český koncept malého modulárního reaktoru – Energy Well od skupiny ÚJV. Vzhledem k velikosti a geografickým vlastnostem území Česka nelze SMR využít pro odsolování mořské vody, zásobováním těžko dostupných území elektrickou energií, nebo k výrobě tepla pro trvale zamrzlá území. Perspektivní možností využití SMR je nahrazení neobnovitelných zdrojů energie za účelem snížení emisí a zbavení se závislosti na fosilních palivech. Díky značné diverzifikaci projektu SMR lze vybírat výkonovou hladinu i účel, zda má elektrárna sloužit primárně k výrobě elektrické nebo tepelné energie či kogeneraci. Jako náhradu za velké uhelné

elektrárny, které jsou především zdrojem elektrické energie, lze vybrat reaktor společnosti NuScale Power. Projekt elektrárny NuScale může díky své škálovatelnosti (až 12 modulů o výkonu 60MW_e) dosáhnout podobného elektrického výkonu jako současné velké uhelné elektrárny na území Česka. Stejně početný komplex modulové elektrárny nabízí i projekt HTR-PM (1260 MW_e). Díky vyšší výstupní teplotě by tento reaktor mohl najít využití v podobě výroby tepla pro CZT nebo průmysl. U této elektrárny není vyloučen ani kogenerační provoz. Reaktory BWRX-300 a UK SMR – Rolls Royce jsou jedno-modulové elektrárny, které by našly podobné uplatnění v nižší výkonnostní hladině. Podobně je to i s reaktorem IMSR[®], který lze využít k výrobě tepla pro lokální CZT. Nelze ovšem s jistotou říct v jakém stavu se bude nacházet teplárenství a zda bude CZT hojně využíváno i v době, kdy se začne technologie SMR komerčně využívat, protože realizace prvních SMR v Česku se neočekává dříve, než v roce 2040.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *International Atomic Energy Agency* [online]. Vídeň, 2019 [cit. 12.12.2019]. Dostupné z: <https://www.iaea.org>
- [2] *IAEA: Indicators for Small Modular Reactors* [online]. Vídeň, 2018. ISBN 978–92–0–105718–1 [cit. 12.12.2019]. Dostupné z: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1854web.pdf>
- [3] *NuScale technologie overview* [online]. Portland, 2019 NuScale Power, 2020 [cit. 12.12.2019]. Dostupné z: <https://www.nuscalepower.com/technology/technology-overview>
- [4] *IAEA: Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* [online]. Vídeň, 2018 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book_2018.pdf
- [5] *WORLD NUCLEAR NEWS. CNNC launches demonstration SMR project* In: *world-nuclear-news.org* [online]. United Kingdom, 22.7.2019 [cit. 12.12.2019]. Dostupné z: <https://world-nuclear-news.org/Articles/CNNC-launches-demonstration-SMR-project>
- [6] *WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Small Nuclear Power Reactors* [online]. United Kingdom, 2019 [cit. 12.12.2019]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
- [7] *HOLTEC INTERNATIONAL. SMR-160 Overview* In: *smrllc.com* [online]. USA, 2015 [cit. 13.12.2019]. Dostupné z: <https://smrllc.com/technology/smr-160-overview/>
- [8] PADRAZA, Jorge Morales. *Small modular reactors for electricity generation: An Economic and Technologically Sound Alternative*. Springer International Publishing AG, 2017. ISBN 978-3-319-52215-9
- [9] SKLENKA, Lubomír. *Malé a modulární jaderné reaktory a jejich potenciální využití v České republice* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, 2014 [cit. 13.12.2019]. Dostupné z: <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2014-01-Sklenka.pdf>
- [10] KARAFIAT, Petr: *Malé jaderné reaktory – jak jsme na tom v roce 2019?* [online]. All for Power, 2019 [cit. 13.12.2019]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/male-jaderne-reaktory-jak-jsme-na-tom-v-roce-2019/>
- [11] *IAEA: CAREM Prototype Construction and Licensing Status* [online]. [cit. 13.12.2019]. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1500_CD_Web/htm/pdf/topic5/5S01_D.%20Delmastro.pdf
- [12] *ÚJV Řež, a. s.: Skupina ÚJV představila Energy Well v Atlantě*. In: *ujv.cz* [online]. Řež, 2018 [cit. 14.12.2019]. Dostupné z: <https://www.ujv.cz/cs/aktuality/skupina-ujv-predstavila-energy-well-na-konferenci-v-atlante-11504>
- [13] *IAEA: Status report 77: System-Integrated Modular Advanced Reactor (SMART)* [online]. Vídeň, 2011 [cit. 14.12.2019]. Dostupné z: <https://aris.iaea.org/PDF/SMART.pdf>
- [14] *GE HITACHI NUCLEAR ENERGY: Introducing the BWRX-300* [online]. 2020 [cit. 27.1.2020]. Dostupné z: <https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/bwrx-300>
- [15] *BWRX-300: bude Polsko průkopníkem malých reaktorů v bývalém východním bloku?* In: *proelektrotechniky.cz* [online]. 24.10. 2019 [cit. 27.1.2020]. Dostupné z <http://www.proelektrotechniky.cz/vyroba-a-prenos/182.php>
- [16] ŠEVEČEK, Martin. *Malé modulární reaktory u nás a ve světě*. In: *oenergetice.cz* [online]. 7. 3.2018 [cit. 27.1.2020]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/male-modularni-reaktory-u-nas-ve-svete>

- [17] *What is U-Battery?* In: *u-battery.com* [online]. Urenco, 2019 [cit. 27.1.2020]. Dostupné z: <https://www.u-battery.com/what-is-u-battery>
- [18] *Typy jaderného paliva* In: *atominfo.cz* [online]. Praha, 2016 [cit. 27.1.2020]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2016/06/typy-jaderneho-paliva/>
- [19] TRAMBA, David. *Jaderný reaktor do každého města*. In: *enviweb.cz* [online] 22.3.2015 [cit. 5.5.2020]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/102240>
- [20] *Typy reaktorů*. In: *svetenergie.cz* [online]. Praha: Skupina ČEZ, 2019 [cit. 27.1.2020]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/jaderne-elektrarny/typy-reaktoru>
- [21] VOBOŘIL, David. *Modulární reaktor U-Battery zahajuje kanadský před-licenční proces*. In: *oenergetice.cz* [online]. 6. 3. 2017 [cit. 2020-01-27]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/technologie/modularni-reaktor-u-battery-zahajuje-kanadsky-pred-licencni-proces>
- [22] *Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR. Státní energetická koncepce*. [online]. 2015 [cit. 2.2.2020]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/statni-energeticka-politika/statni-energeticka-koncepce--223620/>
- [23] KOHUTKA, Jiří. *Státní energetická koncepce ČR ve světě plynové krize*. In: *odbornecasopisy.cz* [online]. 2009 [cit. 2.2.2020]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/statni-energeticka-koncepce-cr-ve-svetle-plynove-krize--11027>
- [24] KRÍŽ, Ladislav. *Společnosti GE Hitachi nuclear energy a ČEZ zahajují spolupráci při zkoumání technologie malého modulárního reaktoru v České republice*. In: *cez.cz* [online]. 3.2.2020 [cit. 5.2.2020]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/spolecnosti-ge-hitachi-nuclear-energy-a-cez-zahajuji-spolupraci-pri-zkoumani-technologie-maleho-modularniho-reaktoru-v-ceske-republice-80832>
- [25] *Společnosti GE Hitachi nuclear energy a ČEZ zahajují spolupráci při zkoumání technologie malého modulárního reaktoru v České republice*. In: *cez.cz* [online]. 26.9.2019 [cit. 5.2.2020]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/cez-uzavrel-partnerstvi-s-americkou-firmou-nuscale.-spolecne-prezkoumaji-moznosti-malych-modularnich-reaktoru-67677>
- [26] AHARNE, John F. *Budoucnost jaderné energie*. *Časopis Vesmír* [online] 1995/8 [cit. 5.2.2020]. ISSN 1214-4029. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/1995/cislo-8/budoucnost-jaderne-energie.html>
- [27] PUCHNAR, Jiří. *Plavidla na jaderný pohon: Ponorky* In: *oenergetice.cz* [online]. 10.9.2015 [cit. 5.2.2020]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/ostatni/plavidla-na-jaderny-pohon-ponorky>
- [28] *WORD NUCLEAR ASSOCIATION: Outline history of nuclear energy*. [online]. United Kingdom, 2020 [cit. 6.2.2020]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx>
- [29] VALKOVIČ, Radek. *Sovětské a ruské stíhací ponorky*. In: *military.cz* [online]. [cit. 6.2.2020]. Dostupné z: <http://www.military.cz/russia/navy/submarin/stihaci/default.htm>
- [30] INGERSOLL, D., T. *Deliberately small reactors and the second nuclear era* [online]. In: *Progress in Nuclear Energy*. Elsevier, 2009 [cit. 7.2.2020]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197009000171>.
- [31] LAWRENCE, H.Suid, *The Army's Nuclear Power Program : The Evolution of a Support Agency* [online]. ABC-CLIO, 1990 [cit. 7.2.2020]. ISBN: 9780313272264. Dostupné z: <https://flibe-energy.com/pdf/ArmyNuclearPowerProgram.pdf>

- [32] WAGNER, Vladimír. *Plovoucí jaderné elektrárny*. In: *osel.cz* [online] 30.11.2016 [cit. 7.2.2020]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/9119-plovouci-jaderne-elektrarny.html>
- [33] Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, Ministerstvo financí ČR. *Národní akční plán rozvoje jaderné energetiky v ČR*. In: *mpo.cz* [online] 3. 6. 2015 schváleno vládou ČR [cit. 10.5.2020]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/54251/61936/640148/priloha001.pdf>
- [34] Energetický regulační úřad. *Teplárenství* In: *eru.cz* [online]. [cit. 10.5.2020]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/462920/01_Teplarenstvi.pdf/63cb4cfe-efde-4c4c-83cc-846998ecb42f
- [35] Energetický regulační úřad. *Roční zpráva o provozu teplárenských soustav ČR 2018*. In: *eru.cz* [online]. 2019 [cit. 10.5.2020]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/5391330/Zprava_o_provozu_TS_2018.pdf/bec4c828-cc45-4c94-89dd-f156bf49165c
- [36] Teplárenské Sdružení ČR. *Vytápěné lokality*. In: *tscr.cz* [online]. [cit. 10.5.2020]. Dostupné z: <http://www.tscr.cz/%3Fpg%3D0213%261437402326%23>
- [37] Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, Ministerstvo financí ČR. *Zpráva o vývoji energetiky v oblasti tepla za rok 2018*. In: *mpo.cz* [online] 3. 6. 2015 schváleno vládou ČR [cit. 10.5.2020]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/2020/3/Zprava-o-vyvoji-energetiky-v-oblasti-tepla-za-rok-2018.pdf>
- [38] PUCHNAR, Jiří. *Memorandum o porozumění zahájilo studii o umístění SMR na Ukrajině*. In: *oenergetice.cz* [online] 22.2.2020 [cit. 24.3.2020]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/memorandum-porozumeni-zahajilo-studii-umisteni-smr-ukrajine>
- [39] Idaho National Laboratory. *Carbon free power project*. In: *inl.gov* [Online] [cit. 17.5.2020]. Dostupné z: <https://inl.gov/trending-topic/carbon-free-power-project/>
- [40] U.S.NRC. *Early Site Permit Application – Clinch River Nuclear Site*. In: *nrc.gov* [Online] 2019. [cit. 17.5.2020]. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/clinch-river.html>
- [41] Nuclear Energy Institute. *NRC Staff Agrees Small Modular Reactors Won't Need Large-Scale Emergency Zones*. In: *nei.org* [Online] 2018. [cit. 17.5.2020]. Dostupné z: <https://www.nei.org/news/2018/nrc-staff-agrees-smrs-wont-need-large-epzs>
- [42] *WORD NUCLEAR ASSOCIATION: Nuclear Power in China*. [online]. United Kingdom, 2019 [cit. 21.3.2020]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/informationlibrary/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power.aspx>
- [43] *Plovoucí jaderná elektrárna Akademik Lomonosov byla uvedena do plného provozu* In: *oenergetice.cz* [online] 23.5.2020 [cit. 30.5.2020] Dostupné z: <https://oenergetice.cz/zahranicni/plovouci-jaderna-elektrarna-akademik-lomonosov-byla-uvadena-plneho-provozu>
- [44] *WORLD NUCLEAR NEWS. China plans demonstration nuclear heating project* In: *world-nuclear-news.org* [online]. United Kingdom, 12.2.2018 [cit. 21.3.2020]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/NN-China-plans-demonstration-nuclear-heating-project-1202184.html>
- [45] *WORLD NUCLEAR NEWS. CGN to build floating reactor* In: *world-nuclear-news.org* [online]. United Kingdom, 13.2.2016 [cit. 22.3.2020]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/CGN-to-build-floating-reactor>

- [46] Canadian Nuclear Laboratories. *Technology developers advance in CNL's process to site a small modular reactor* In: *cnl.ca* [online] 29.7.2019 [cit. 22.3.2020]. Dostupné z: <https://www.cnl.ca/en/home/facilities-and-expertise/smr/update-on-cnl-s-smr-invitation-process.aspx>
- [47] Canadian Nuclear Safety Commission. *Small modular reactors*. In: *nuclearsafety.gc.ca* [online] 3.10.2020 [cit. 22.3.2020]. Dostupné z: <https://nuclearsafety.gc.ca/eng/reactors/research-reactors/other-reactor-facilities/small-modular-reactors.cfm>
- [48] Energy Technologies Institute. *DECC Small Modular Reactor TechnoEconomic Assessment – Project 2 Report*. [Online] 20.5.2016 [cit. 22.3.2020]. Dostupné z: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/665198/TEA_Project_2_Summary_Report_-_Systems_Optimisation_Modelling_SMRs.pdf
- [49] *WORD NUCLEAR ASSOCIATION: Nuclear Power in the United Kingdom*. [online]. United Kingdom, 2019 [cit. 21.3.2020]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-kingdom.aspx>
- [50] *Rosatom pokračuje v sériové výrobě malých reaktorů RITM-200, vyrábí je pro čtvrtý jaderný ledoborec*. In: *atominfo.cz* [online] 12.5.2020 [cit. 27.5.2020]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2020/05/rosatom-pokracuje-v-seriove-vyrobe-malych-reaktoru-ritm-200-vyrabi-je-pro-ctvrty-jaderny-ledoborec/>
- [51] *NUVIA. Market and Technical Assessment of Micro Nuclear Reactors*. [online]. 31.3.2016 [cit. 4.4.2020]. Dostupné z: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/787411/Market_and_Technical_Assessment_of_Micro_Nuclear_Reactors.pdf
- [52] Friends of the Earth Australia. *Inquiry into the prerequisites for nuclear energy in Australia*. [online] 2019 [cit. 4.4.2020]. Dostupné z: <https://www.aph.gov.au/DocumentStore.ashx?id=7a9318c0-aad6-405e-832f-66212a87d158&subId=669038>
- [53] *IAEA: Innovative small and medium sized reactors: desing features, safety approachies and r&d trrends*. [online]. Vídeň, 2015. ISBN 92–0–103205–6. [cit. 4.6.2020] Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1451_web.pdf.
- [54] Energetický regulační úřad. *Čtvrtletní zpráva o provozu ES ČR 2019*. In: *eru.cz* [online]. 2019 [cit. 10.5.2020]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/5381883/Ctvrtletni_zprava_2019_IV_Q.pdf/78ade820-c6b2-41e0-8a72-56bd8d20a94d
- [55] *Plovoucí elektrárna Akademik Lomonosov už dodala do sítě 21 GWh elektřiny*. In: *atominfo.cz* [online] 12.3.2020 [cit. 20.5.2020]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2020/03/plovouci-elektrarna-akademik-lomonosov-uz-dodala-do-site-21-gwh-elektriny/>
- [56] *OKBM Afrikantov* [online] © 1999-2020 [cit. 20.5.2020]. Dostupné z: <http://www.okbm.nnov.ru/>
- [57] *WORLD NUCLEAR NEWS. Key components of second HTR-PM reactor connected* In: *world-nuclear-news.org* [online]. United Kingdom, 25.3.2016 [cit. 6.4.2020]. Dostupné z: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Key-components-of-second-HTR-PM-reactor-connected>
- [58] Nuclear Engineering. *HTR-PM: Making dreams come true*. In: *neimagazine.com* [Online]. 26.2.2019 [cit. 6.4.2020]. Dostupné z: <https://www.neimagazine.com/features/featurehtr-pm-making-dreams-come-true-7009889/>
- [59] *WORD NUCLEAR ASSOCIATION: Nuclear Fuel and its Fabrication*. [online]. United Kingdom, 2020 [cit. 21.4.2020]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-kingdom.aspx>

- [60] Čínský „obrázkový“ reaktor se blíží dokončení. In: *technickytydenik.cz* [online]. 13.3.2018 [cit. 21.4.2020]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/energetika-teplo/cinsky-oblazkovy-reaktor-se-blizi-dokonceni_43525.html
- [61] *Infografika: Malé modulární reaktory (SMR) v pokročilé fázi vývoje* In: *oenergetice.cz* [online] 20.2.2020 [cit. 11.3.2020]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/infografika-male-modularni-reaktory-smr-pokrocile-fazi-vyvoje>
- [62] *Terrestrial Energy* [online] © 2020 *Terrestrial Energy Inc.* [cit. 16.4.2020]. Dostupné z: <https://www.terrestrialenergy.com>
- [63] *Rolls-Royce. UK SMR – Technical Summary.* [online] 2017 [cit. 16.4.2020]. Dostupné z: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/nuclear/smr-technical-summary.pdf>
- [64] *Rolls-Royce to explore SMR potential with Turkish utility.* In: *namrc.co.uk* [online] 19.3.2020 [cit. 16.4.2020]. Dostupné z: <https://namrc.co.uk/industry/smr-turkey-study/>
- [65] *WORD NUCLEAR ASSOCIATION: Molten Salt Reactors.* [online]. United Kingdom, 2018 [cit. 30.4.2020]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/molten-salt-reactors.aspx>
- [66] *NuScale Power.* [online] © 2020 NuScale Power, LLC. [cit. 1.5.2020]. Dostupné z: <https://www.nuscalepower.com/>
- [67] GE Hitachi. *PRISM.* In: *nuclear.gpower.com* [online] 2020 [cit. 1.5.2020] Dostupné z: <https://nuclear.gpower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/prism1>
- [68] *WORLD NUCLEAR NEWS. USA launches test reactor project* In: *world-nuclear-news.org* [online]. United Kingdom, 4.3.2019 [cit. 1.5.2020]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/US-launches-test-reactor-project>
- [69] ZHANG, Z. et al. *The Shandong Shidao Bay 200 MWe High-Temperature GasCooled Reactor Pebble-Bed Module (HTR-PM) Demonstration Power Plant: An Engineering and Technological Innovation.* *Engineering* [online] 2016 [cit. 5.5.2020]. Dostupné z: <http://engineering.org.cn/EN/10.1016/J.ENG.2016.01.020#1>
- [70] *České energetické závody.* [online] © 2020 ČEZ, a. s. [cit. 10.5.2020]. Dostupné z: www.cez.cz
- [71] *Energetický regulační úřad.* [online] © 2014-2020 Energetický regulační úřad. [cit. 10.5.2020]. Dostupné z: www.eru.cz
- [72] *Československá komise pro atomovou energii. Využití tepla z jaderných energetických zdrojů* [online]. Praha, 1976 [cit. 1.6.2020]. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/09/367/9367743.pdf