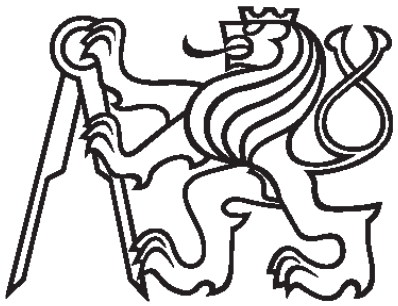


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Malé modulární reaktory a jejich možné uplatnění v Elektrárně Temelín

Zpracoval: **Bc. Tomáš CÁPAL**

Vedoucí práce: Vít Klein, Ph.D.

Praha 2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Cápal** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **459429**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**

Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**

Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Malé modulární reaktory a jejich možné uplatnění v Elektrárně Temelín

Název diplomové práce anglicky:

Small modular reactors and their possible application in the Temelín Power Plant

Pokyny pro vypracování:

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

Seznam doporučené literatury:

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

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **08.02.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **20.05.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.	doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.	prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

. | Datum převzetí zadání

Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Čestné prohlášení

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

V Praze dne 10. ledna 2023

Bc. Tomáš Cápal

Poděkování

Mé poděkování patří především mému vedoucímu diplomové práce Ing. Mgr. Vítu Kleinovi, Ph. D. za jeho odborné vedení, vstřícný přístup, pevné nervy, ale i jeho připomínky k této diplomové práci a konzultace vedoucí k nastartování mého kariérního uplatnění.

Dále bych rád poděkoval svým kolegům z Ministerstva průmyslu a obchodu za konzultace a získané zkušenosti v problematice malých modulárních reaktorů. Také bych rád poděkoval panu Ing. Viktoru Černému ze společnosti Elektrárna Temelín II, a.s. za sdílení důležitých informací a v neposlední řadě ostatním prezentujícím na seminářích, jednáních a workshopech.

Na závěr bych rád poděkoval mojí rodině, která mi byla oporou po celou dobu studia a při sepisování této diplomové práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá implementací malých modulárních reaktorů do prostředí České republiky, zejména do Jaderné elektrárny Temelín. V úvodu této práce je popsána problematika, týkající se malých modulárních reaktorů. V další části jsou popsány technologie malých modulárních reaktorů, včetně reaktorů lehkovodního typu. Tyto technologie jsou uvažovány pro budoucí výstavbu v České republice. V následující části je popsána reaktorová fyzika a jaderné štěpení. Další kapitola, popisující české designy a uplatnění malých modulárních reaktorů v České republice, má za cíl představit české designy a poukázat na potřebu zajištění energetické soběstačnosti za pomoci jaderné energetiky. Poslední kapitola se zabývá pohledem Skupiny ČEZ na malé modulární reaktory a jejich licenčními a povolovacími procesy v České republice. Na základě jednání a seminářů byl vytvořen koncept obsahující vylučující kritéria, dle kterých se následně provedl užší výběr projektů malých modulárních reaktorů do Jaderné elektrárny Temelín.

Klíčová slova

Malé modulární reaktory, SMR, LWR, BWR, ČEZ, SÚJB

Abstract

The diploma thesis deals with the implementation of small modular reactors in the environment of the Czech Republic, especially in the Temelín Nuclear Power Plant. In the introduction of this thesis, the issue related to small modular reactors is described. The next part describes the technology of small modular reactors, including light-water type reactors. These technologies are being considered for future construction in the Czech Republic. In the following section, reactor physics and nuclear fission are described. The next chapter, describing Czech designs and the application of small modular reactors in the Czech Republic, aims to present Czech designs and point out the need to ensure energy self-sufficiency with the help of nuclear energy. The last chapter deals with the CEZ Group´s view of small modular reactors and their licensing and permitting processes in the Czech Republic. Based on meetings and seminars, a concept was created containing exclusionary criteria, according to which a narrow selection of small modular reactor projects for the Temelín Nuclear Power Plant was subsequently made.

Keywords

Small modular reactors, SMR, LWR, BWR, ČEZ, SÚJB

OBSAH

ÚVOD 1
1. Úvod do problematiky malých modulárních reaktorů 2
2. Malé modulární reaktory 4
3. Typy malých modulárních reaktorů a jejich konstrukce 8
3.1. Lehkovodní modulární reaktory 8
3.1.1. VOYGR/NuScale Power Modules 9
3.1.2. System Integrated Modular Advanced Reactor 11
3.1.3. BWRX-300 12
3.1.4. Unite Kingdom Small Modular Reactor 14
3.1.5. SMR-160 16
3.1.6. NUWARD^{TM} 18
3.2. Pokročilá generace reaktorů 20
3.2.1. Lehkovodní pokročilé reaktory 20
3.2.2. Reaktory založené na roztavených solích 21
3.2.3. Reaktory s rychlými neutrony 22
3.2.4. Vysokoteplotní plynem chlazené reaktory 24
4. Reaktorová a jaderná fyzika 25
4.1. Stabilní nuklidy 25
4.1.1. Vazebná energie 26
4.1.2. Mez prahové energie 27
4.1.3. Jaderná reakce 28
4.1.4. Účinný průřez 29
4.1.5. Uvolněná kinetická energie 30
4.2. Neutronový a radiační záchyt 32
4.2.1. Elastický rozptyl neutronů 34
4.2.2. Korelace úhlu rozptylu a energetické ztráty 35
4.3. Souhrn kapitoly 38
5. Malé modulární reaktory v České republice 39
5.1. Výrobní kapacity elektrizační soustavy ČR 39
5.2. Současné projekty SMR 43
5.2.1. DAVID SMR 43
5.2.2. CR-100 44
5.2.3. TEPLATOR 45
5.2.3.1. Konstrukce 46

5.2.4. Energy Well 48
5.2.4.1. Konstrukce 49
6. Strategické přístupy a možnosti malých modulárních reaktorů v Elektrárně Temelín 51
6.1. Jednání se Skupinou ČEZ ohledně malých modulárních reaktorů 52
6.1.1. Silné stránky malých modulárních reaktorů dle Skupiny ČEZ 53
6.1.2. Slabé stránky malých modulárních reaktorů dle Skupiny ČEZ 53
6.1.3. Umístění malých modulárních reaktorů v Elektrárně Temelín a další potenciální lokality 54
6.1.4. Zvažované technologie malých modulárních reaktorů dle Skupiny ČEZ 56
6.1.4.1. Výhledy pro nasazení technologie malých modulárních reaktorů v České republice 58
6.1.4.2. Metodika výběru technologie malých modulárních reaktorů dle Skupiny ČEZ 60
6.2. Licenční a povolovací procesy 61
6.2.1. Licenční a povolovací procesy malých modulárních reaktorů dle Skupiny ČEZ 62
6.2.2. Licenční a povolovací procesy malých modulárních reaktorů dle Státního úřadu pro jadernou bezpečnost 64
6.3. Možnosti použití malých modulárních reaktorů v Elektrárně Temelín 66
6.3.1. Hlavní kritéria pro porovnání 67
6.3.2. Hodnocení technologií malých modulárních reaktorů dle kritérií 71
6.4. Souhrn práce a doporučení 74
6.4.1. Užší výběr technologií malých modulárních reaktorů 75
ZÁVĚR 79
SEZNAM LITERATURY 81
SEZNAM PŘÍLOH 88

Obrázky

Obrázek 1 - Porovnání velkých, malých a mikro reaktorů 3
Obrázek 2 - Ilustrace lehkovodního SMR 4
Obrázek 3 - Ilustrace převozu reaktorové nádoby nákladním automobilem 5
Obrázek 4 – Vybrané koncepty SMR s jejich parametry instalovaného elektrického výkonu a výstupní teploty 6
Obrázek 5 - Projekt VOYGR 9
Obrázek 6 - Vizuální pohled na elektrárnu NuScale Power Modules 10
Obrázek 7 - Projekt System Integrated Modular Advanced Reactor (SMART100) vyvíjený společností Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP) 11
Obrázek 8 - Projekt BWRX – 300 12
Obrázek 9 – Vizuální návrh elektrárny BWRX-300 13
Obrázek 10 - Vizuální náhled na elektrárnu UK SMR 14
Obrázek 11 - Elektrárna UK SMR 15
Obrázek 12 - Vizuální návrh elektrárny SMR-160 16
Obrázek 13 Reaktor SMR-160 17
Obrázek 14 - Vizuální návrh elektrárny NUWARD™ 18
Obrázek 15 - Dvojblok v elektrárně NUWARD™ 19
Obrázek 16 – Projekt vyvíjený společností International Reactor Innovative and Secure (IRIS) 21
Obrázek 17 - ilustrace rychlého neutronového reaktoru 22
Obrázek 18 – Vysokoteplotní plynem chlazení reaktor (High-Temperature Gas-Cooled Reactor) 24
Obrázek 19 - Křivka jaderné stability 25
Obrázek 20 - Vazebná energie na jeden nukleon 27
Obrázek 21 - Vznik jaderné reakce, která je vyvolaná částicí 28
Obrázek 22 - Štěpná jaderná reakce 29
Obrázek 23 – Účinný průřez štěpení pro $92233U$ 30
Obrázek 24 - Radiační záchytný průřez pro $92235U$ 33
Obrázek 25 - Rozptylový jev v laboratoři a CM systému 35
Obrázek 26 - Vztah mezi laboratorními a CM úhly rozptylu 36
Obrázek 27 - Netto výroba elektřiny v ES ČR v roce 2020 40
Obrázek 28 – Netto instalovaný elektrický výkon jaderných bloků ETE, EDU a NNJZ v jednotlivých letech 40
Obrázek 29 - Saldo importu a exportu evropských zemí pro Konzervativní scénář 2030 42
Obrázek 30 - Bokorys (vlevo) a půdorys (vpravo) TEPLATORu 45
Obrázek 31 – Schéma oběhového cyklu TEPLATORu 46
Obrázek 32 - Projekt Energy Well 48
Obrázek 33 – Rozložení nových jaderných bloků a SMR v lokalitě Temelín 54

Tabulky

Tabulka 1 - Tabulka izotopů, tepelných a štěpných neutronů 31
Tabulka 2 - Průměrný počet kolizí ke zmírnění neutronu od 2 MeV do 1 eV 37
Tabulka 3 - Parametry projektu TEPLATOR 47
Tabulka 4 - Parametry projektu Energy Well 50
Tabulka 5 - Technologie SMR, které Skupina ČEZ uvažuje pro implementaci v Elektrárně Temelín 56
Tabulka 6 - Hlavní kritéria pro výběr technologie SMR do prostředí ČR, včetně Elektrárny Temelín 71
Tabulka 7 - Shortlist technologií SMR do Elektrárny Temelín..... 78

Seznam zkratek

AZ	Atomový zákon
BWR	Boiling water reactor (Varný reaktor)
ČR	Česká republika
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
DAC	Design Acceptance Confirmation (Potvrzení o přijetí návrhu)
EDU	Elektrárna Dukovany
EIA	Environment impact Assesment (Posouzení vlivu na životní prostředí)
ES	Elektrizační soustava
ETE	Elektrárna Temelín
FJFI	Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
FNR	Fast neutron reactor (Reaktor s rychlými neutrony)
FO	Fyzická osoba
FOAK	First of a Kind (První svého druhu)
HDP	Hrubý domácí produkt
HTGR	High temperature gas reactor (Vysokoteplotní plynem chlazený reaktor
IAEA	International Atomic Energy Agency (Mezinárodní agentura pro atomovou energetiku)
INL	Idaho National Laboratory (Národní laboratoř v Idahu)
JB	Jaderná bezpečnost
JZ	Jaderné zařízení
LWR	Light-water reactor (Lehkovodní reaktor)
MMR	Mikro modulární reaktor
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky
MSR	Molten salt reactor (Reaktory založené na roztavených solích)
MZP	Ministerstvo životního prostředí České republiky
NEA	Nuclear Energy Agency (Agentura pro jadernou energii)
NJZ	Nový jaderný zdroj
NRC	Nuclear Regulatory Commission (Jaderný regulační úřad)

OZE	Obnovitelné zdroje
PÚR	Politika územního rozvoje ČR
PWR	Pressurized water reactor (Tlakovodní reaktor)
RP	Regulační plán
SEK	Státní energetická koncepce
SG	Steam generator (Parogenerátor)
SMR	Small modular reactor (Malý modulární reaktor)
SoDA	Statement of Design Acceptability (Prohlášení o přijatelnosti návrhu)
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost České republiky
ÚP	Územní plán
USA	United States of America (Spojené státy americké)
ŽP	Životní prostředí
ZÚR	Zásady územního rozvoje

ÚVOD

Za účelem zachování energetické stability je do budoucna nezbytné, vyřešit otázku nahrazení výroby elektřiny z uhelných zdrojů obnovitelnými a nízkouhlíkovými zdroji. Tuto otázku by pomohla vyřešit výroba elektřiny z jaderné energie, zejména prostřednictvím malých modulárních reaktorů (SMR). Mezi základní výhody výroby elektřiny, prostřednictvím malých modulárních reaktorů, patří udržení stability elektrizační soustavy. SMR jsou tak vhodným doplňkem k velkým jaderným blokům. Proto se tato diplomová práce zaměřuje na implementaci SMR do českého prostředí, zejména do Jaderné elektrárny Temelín.

Na počátku diplomové práce je shrnuta problematika SMR, zejména popis konstrukce, parametrů a porovnání SMR se stávajícími velkými jadernými elektrárnami. Dále jsou popsány základní principy jaderného štěpení v jaderném reaktoru.

Následující část se zabývá vývojem SMR v České republice (ČR) s přihlédnutím k současným problémům s implementací SMR do energetiky v českém prostředí. V této části jsou zmíněny konkrétní problémy jaderné energetiky, včetně otázky SMR přednesené na různých mezinárodních konferencích, workshopech a jednáních odborné veřejnosti.

Na závěr této práce jsou zhodnoceny jednotlivé vyvíjené technologie SMR a vybrány nejvhodnější varianty projektů, které je možné implementovat do českého prostředí, zejména do Jaderné elektrárny Temelín.

1. Úvod do problematiky malých modulárních reaktorů

V současné době se jaderná energetika ve světě potýká s výraznými ekonomickými a technickými obtížemi. Jedním z hlavních problémů je, že výstavba jaderného reaktoru vyžaduje vysokou úroveň kapitálu, který značně přesahuje finanční možnosti investorů, a státní subjekty ve velkých zemích jsou legislativně omezeni množstvím nainstalovaného elektrického výkonu z jaderné energetiky. Jaderná energetika je nákladná především kvůli vysokým stavebním nákladům a dlouhé době výstavby. Současně roste cena elektřiny vyráběná z fosilních paliv, jako je uhlí a zemní plyn. V posledním desetiletí však větrná a solární energie, které nevypouštějí oxid uhličitý, výrazně zlevnily oproti jaderné energii. V důsledku toho výrazně vzrostl objem instalovaného elektrického výkonu z obnovitelných zdrojů, v porovnání s jadernou energií.[1]

Odhadované ceny výstavby mohou navíc vysoce překročit očekávaný finanční limit, a to i v rámci desítek miliard dolarů. Jako příklad lze uvést výstavbu třetího a čtvrtého bloku jaderné elektrárny společnosti Georgia Power Co. ve Spojených státech Amerických (USA). Výstavba začala v roce 2009 s předpokládanými náklady kolem 14 miliard dolarů, přičemž termín dokončení projektu se odhadoval na rok 2016, který se nicméně odložil až na rok 2021. Celkové náklady jsou odhadnuty na cca 28 miliard dolarů.[2] Předpokládaný termín zahájení provozu je v současné době odhadován na druhé čtvrtletí roku 2023.[3]

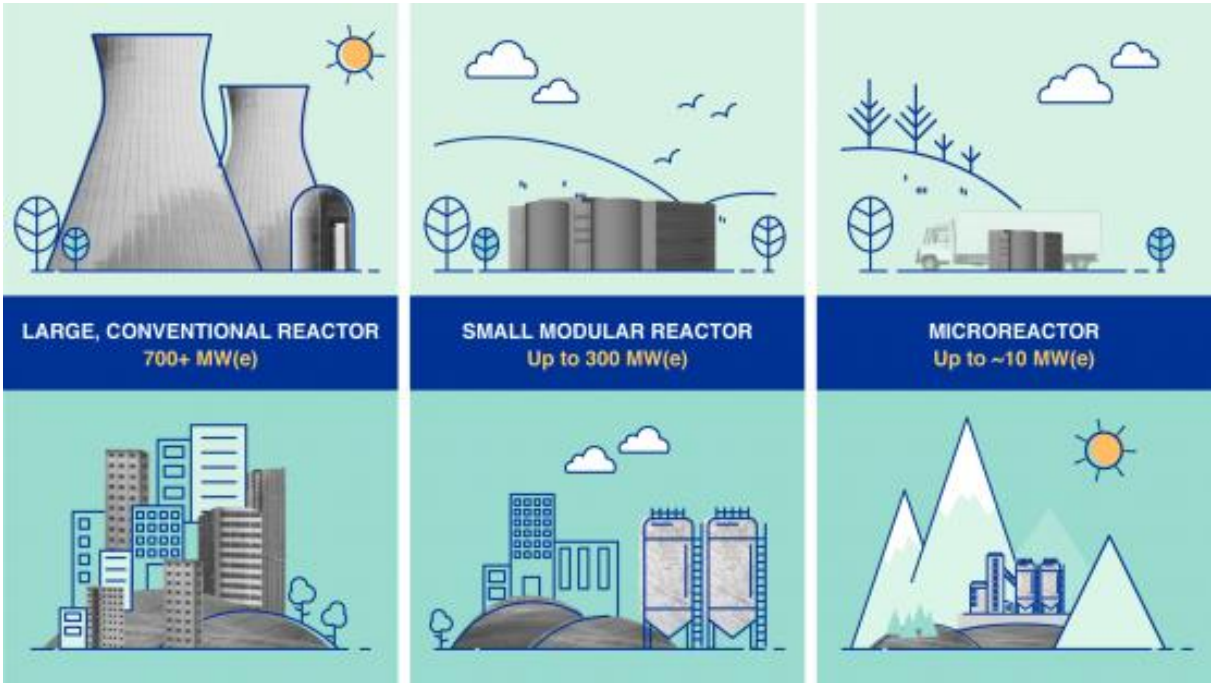
Kvůli této naskytnuté problematice se vyvinula nová technologie využívající stejný princip fungování, jen s rapidně menším reaktorem. Tento typ reaktoru sice také využívá jaderné palivo, ale v menším množství a v případě nouzového vypnutí má lépe navržené bezpečnostní systémy. SMR mají potenciál pomoci s řešením problémů konvenčních velkých jaderných reaktorů. Zejména s vysokou nákladovostí, snížením rizika vážných havárií a likvidací radioaktivního odpadu. Vyřešení výše uvedených obtíží spojených s provozem velkých jaderných bloků je klíčovým problémem

[1] Small Nuclear Power Reactors, 2021
[2] Georgia nuclear plant cost tops $27B as more delays unveiled, 2n. l.
[3] Vogtle Unit 3 starts nuclear fuel load, 2022

současného stavu jaderné energetiky, která je neschopna ekonomicky konkurovat jiným zdrojům elektřiny.[4]

Ve srovnání s konvenčními velkými jadernými reaktory, které je třeba stavět na místě a mají jedinečný design, lze SMR vyrábět v továrnách se standardizovaným designem. To znamená, že se může zvýšit jejich produkce a snížit náklady a riziko zpoždění při výstavbě jaderné elektrárny, využívající technologii SMR. Díky jejich velikosti je lze přemístit pomocí nákladních automobilů a přepravních kontejnerů.[5]

Tvůrci jaderné energetické společnosti a analytici po celém světě prokazují rostoucí zájem o potenciál SMR, jako konkurenceschopné nízkouhlíkové technologické součásti budoucích integrovaných energetických systémů. SMR skrývají příslib bezpečnostních prvků, zjednodušení a standardizace, díky nimž by bylo nasazení jaderné kapacity mnohem jednodušší a ekonomičtější. SMR umožní významné pokroky z hlediska celkové flexibility jaderné energie při plnění budoucích energetických potřeb. Vývojáři v současné době dosahují významného pokroku směrem k nasazení demonstračních zařízení SMR.[6]



Obrázek 1 - Porovnání velkých, malých a mikro reaktorů [5]

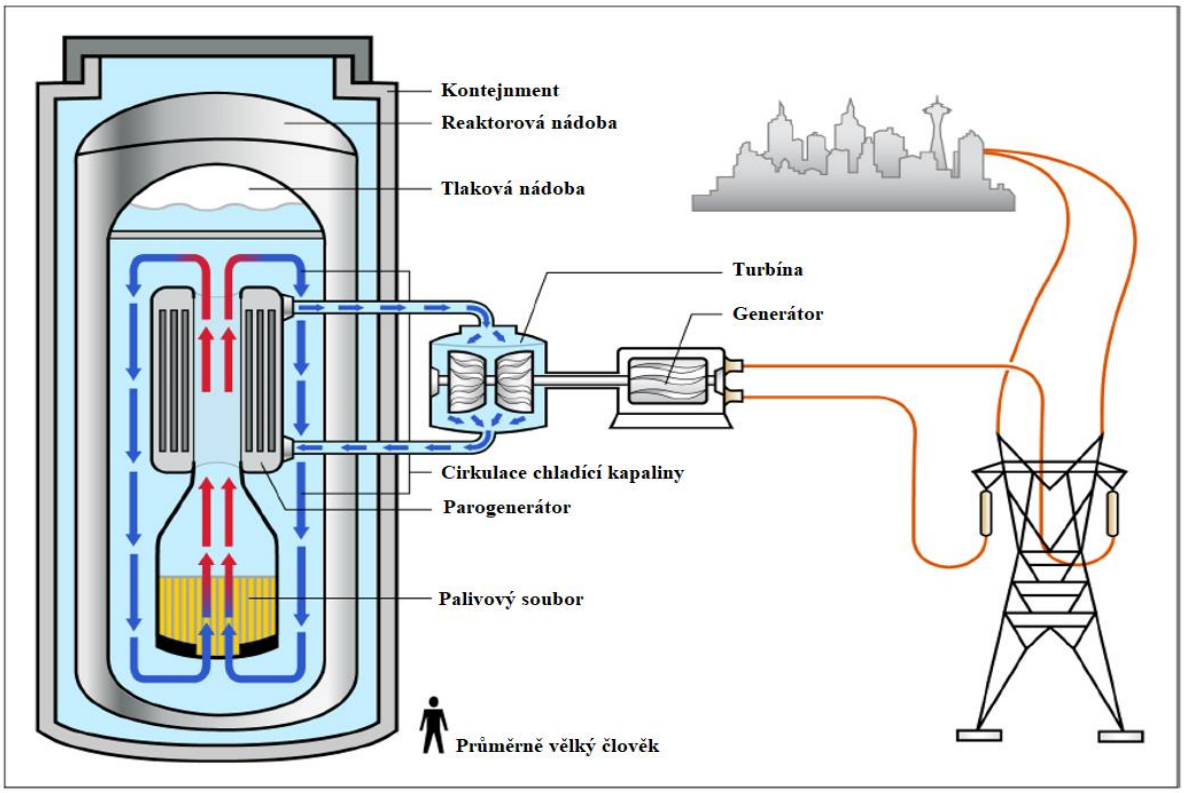
[4] Small Nuclear Power Reactors, 2021
[5] What are Small Modular Reactors (SMRs)?, 2021)
[6] Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, 2021 str. 3

2. Malé modulární reaktory

Malé modulární reaktory (SMR) jsou obecně definovány, jako pokročilé jaderné reaktory s výkonem mezi 10 MW_e až 300 MW_e na blok. SMR dokáže vyprodukovat jednu třetinu výrobní kapacity klasického velkého jaderného reaktoru. Reaktory s výkonem menším než 10 MW_e se označují jako mikromodulární reaktory (MMR).[7]

Termín „malý“ obecně označuje reaktory s ekvivalentním elektrickým výkonem menším než 300 MW_e, zatímco „modulární“ znamená, že jeden reaktor lze seskupit s dalšími moduly a vytvořit tak jadernou elektrárnu s větším výkonem.[8]

Je vyvíjeno několik variant SMR jako například lehkovodní reaktory (LWR), rychlé neutronové reaktory, grafitem moderované vysokoteplotní reaktory a různé druhy reaktorů s roztavenou solí. Lehkovodní reaktory mají nejnižší technologické riziko, ale rychlé neutronové reaktory mohou dosahovat vyšších výkonů.[9]



Obrázek 2 - Ilustrace lehkovodního SMR [9]

[7] Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, 2021 str. 9
[8] What are Small Modular Reactors (SMRs)?, 2021
[9] Small Nuclear Power Reactors, 2021

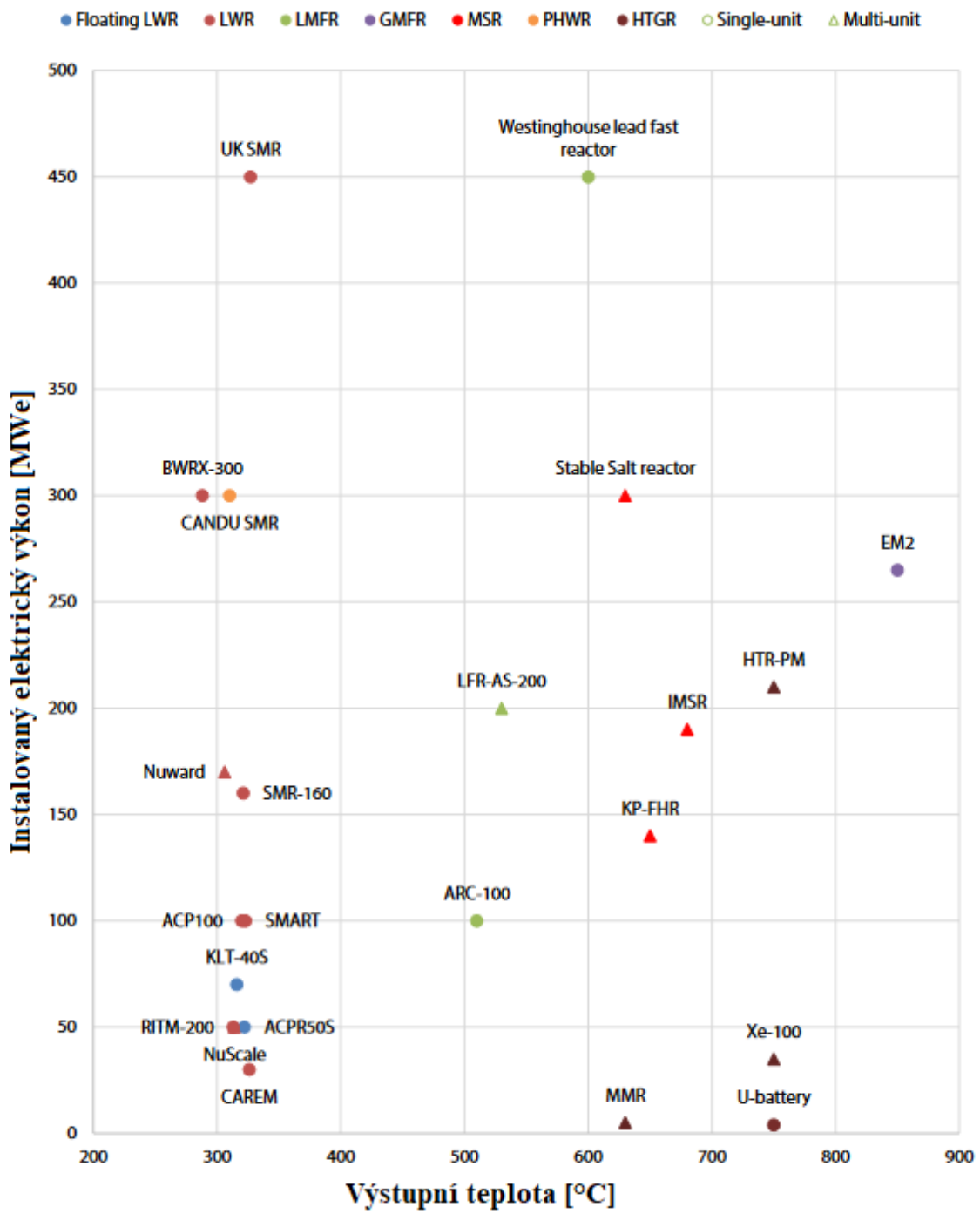
Termín SMR byl přijat po celém světě pro všechny malé reaktory. Ve světě existuje několik různých typů SMR. Tyto konstrukce SMR používají různé druhy chladicích kapalin a paliv. Nejvíce rozšířeným konceptem SMR jsou varianty lehkovodních reaktorů generace II a generace III/III+. Další koncepty SMR odpovídají reaktorům IV. generace, které obsahují alternativní chladicí kapaliny (tj. tekutý kov, plyn nebo roztavené soli), pokročilá paliva a inovativní konfiguraci systémů.[10]

SMR nejsou čistě teoretické, a ani se nejedná jen o projekty ve fázi vývoje. Ve skutečnosti jsou již v provozu desítky, možná i stovky podobných zařízení, které již několik let slouží na palubách ponorek, letadlových lodí a dalších vojenských plavidel. Nicméně vyvíjené elektrárny SMR jsou momentálně pouze koncepční návrhy.[11]

SMR mají několik technických vlastností, které zvyšují předvídatelnost výstavby a vedou k potenciálnímu snížení nákladů na výstavbu a zkrácení dodací lhůty. Menší velikost a kratší předpokládané dodací lhůty současně snižují počáteční investice potřebné pro výstavbu SMR. V důsledku toho mohou zákazníci a investoři čelit nižšímu finančnímu riziku, což by mohlo učinit SMR dostupnější a atraktivnější možností. Vzhledem ke své menší velikosti nabízejí SMR také větší flexibilitu v energetice, aby pokryly nárůst poptávky po elektrické energii.[11] Na Obrázku 4 jsou znázorněny momentální vyvíjené koncepty SMR s jejich výstupními parametry.

Obrázek 3 - Ilustrace převozu reaktorové nádoby nákladním automobilem [12]

[10] Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, 2021 str. 9
[11] Small Nuclear Power Reactors, 2021
[12] Nuclear AMRC and Rolls-Royce confirm modular reactor collaboration, 2017



Obrázek 4 – Vybrané koncepty SMR s jejich parametry instalovaného elektrického výkonu a výstupní teploty[13]

[13] Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, 2021 str. 17

SMR přinášejí na trh větší rozmanitost jaderných technologií s nižšími náklady. SMR jsou nízkouhlíkové zdroje, u kterých může probíhat kogenerace, tedy současná produkce elektrické a tepelné energie. Díky menší velikosti, jednotlivým nákladům pasivním a inherentním bezpečnostním prvkům mají SMR potenciál k rychlejšímu nasazení na širším spektru trhů. Dále se při výstavě SMR očekává, že bude potřeba menší množství kvalifikovaných členů stavebního týmu, což současně povede k dalšímu snížení nákladů. SMR budou využívat stávající přenosovou soustavu a energetickou infrastrukturu. Současně lze navíc použít SMR k výrobě vodíku a syntetických paliv. [14]

Díky některým SMR bude možné nahrazovat elektrárny spalující fosilní paliva, neboť mají stejnou výkonnostní škálu. Dále je možné používat SMR na venkovských místech, kde je omezená dodávka elektrické energie. V případě přírodních živlů by tyto oblasti mohly být více nezávislé na dodávce elektrické energie. V neposlední řadě lze SMR integrovat do hybridních energetických systémů. [15]

Některé společnosti vyvíjející SMR se zaměřují převážně na pasivní, či dokonce vlastní bezpečnostní prvky. Tyto společnosti se dále zaměřují na vývoj jednotlivých modulů nebo i vícemodulové elektrárny, jako například NuScale Power, čímž by měly snížit ekonomickou náročnost díky sériové výrobě, kratší konstrukci a jednoduššímu bezpečnostnímu designu. Současně SMR poskytují možnost pro vzdálené nepřístupné lokality mimo rozvodnou síť nebo mohou nahradit stávající uhelné elektrárny. [14]

[14] Small modular reactors in the Australian context, 2021, str. 4 - 11
[15] Aydogan, 2016, str 667

3. Typy malých modulárních reaktorů a jejich konstrukce

Přestože ve světě existuje celá řada konceptů nízkoenergetických modulárních reaktorů, mají několik společných rysů kvůli požadavkům, které jsou na ně kladeny. V první řadě by měly být SMR modulárního provedení. Například pro většinu takových konstrukcí využívajících vodu je typický integrovaný koncept reaktorové instalace, ve které je aktivní zóna reaktoru, parogenerátor, kompenzátor tlaku a řada dalších typů zařízení. Celá tato konstrukce se nazývá monoblok a je vyráběna v továrnách a dodávána v konečné sestavě přímo na místo. Většina SMR, které se budou realizovat, patří do následujících typů reaktorů: tlakovodní reaktory (PWR), rychlé neutronové reaktory nebo vysokoteplotní reaktory.[16]

3.1. Lehkovodní modulární reaktory

S ohledem na rozsáhlé množství variant tlakovodních reaktorů (PWR) se tato práce zabývá jen některými lehkovodními modulárními reaktory (LWR). LWR využívají jako moderátor a chlazení reaktoru obyčejnou vodu a mají nejnižší technologické riziko ze všech SMR. LWR používají převážně palivo s obohaceným uranem U-235 pod 5 %, s maximální odhadovanou životností paliva na 6 let.[17]

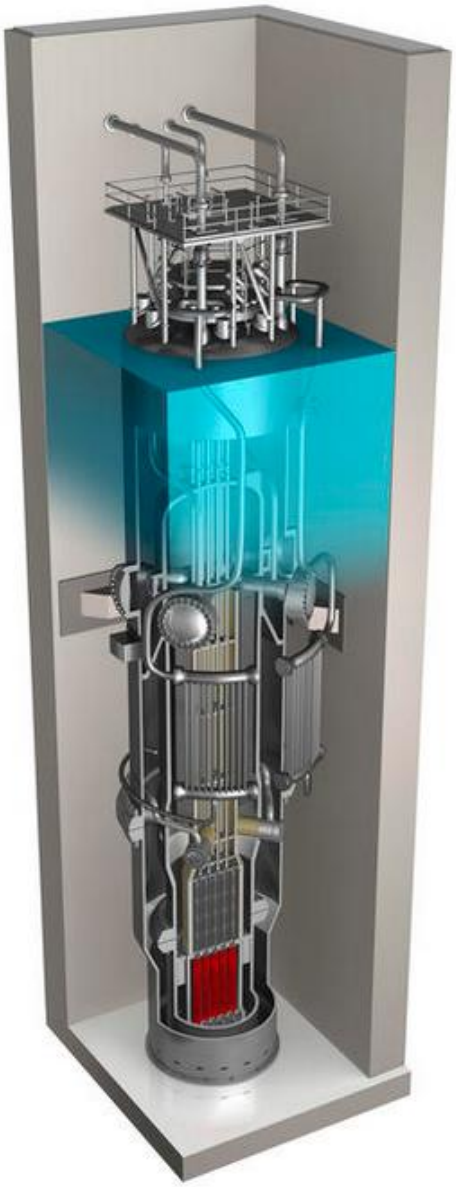
Většina nádob LWR má kompaktní a integrovanou konstrukci, která současně obsahuje tlakovou nádobu reaktoru, parogenerátor, chladící systémy reaktoru a další komponenty, takový reaktor se označuje iLWR. Typické výstupní teploty jsou u LWR kolem 300 °C. [18]

[16] E. Ricotti, 2020, str. 188
[17] Small Nuclear Power Reactors, 2021
[18] Aydogan, 2016, str 667

3.1.1. VOYGR/NuScale Power Modules

Společnost NuScale Power vyvíjí design SMR pojmenovaný VOYGR ve spolupráci s Idaho National Engineering Laboratory a University of Oregon už od roku 2009. Projekt využívá možnost variability výkonu jaderného zařízení prostřednictvím 1 až 12 modulů o individuálním výkonu dosahujícím 60 – 77 MW_e nebo 200 – 250 MW_t. Maximální výkon elektrárny je 924 MW_e a 3 000 MW_t. NuScale Power uvádí, že projekt VOYGR může zásobovat energií až 60 000 domácností. [19]

V jedné nádobě se nachází aktivní zóna reaktoru, kompenzátor tlaku a parogenerátor. Aktivní zóna reaktoru je složena z palivových souborů nazývaných NuFuel-HTP2, který je obdobný pro palivové soubory u velkých vodních reaktorů LWR. Každých 24 měsíců dochází k výměně paliva. Nádoba reaktoru je poté umístěna do široko stěnné oceli. Následně je celá struktura ponořena do bazénu, ve kterém se nachází vodní lázeň. Reaktor využívá pasivní bezpečnostní systémy a přirozenou cirkulací. V systémech se proto nenacházejí žádná oběhová čerpadla. Celá nádoba reaktoru je vysoká kolem 17,7 m s průměrem 2,7 m a životností v rámci 60 let.[19]



Obrázek 5 - Projekt VOYGR [20]

[19] E. Ricotti, 2020, str. 194–195
[20] Central WA is eyeing nuclear power again, 2022

První modulární reaktor se očekává v provozu v roce 2029 a pravděpodobně bude postaven v severozápadním Pacifiku, Idahu nebo centrálním Washingtonu v Grant Country. [21]

Společnost NuScale Power odhaduje, že do roku 2040 bude potřebovat 200 milionů dolarů, aby mohla pokračovat ve vývoji svého SMR. Společnost NuScale Power v dubnu roku 2022 získala od společnosti Spring Valley Acquisition Corp. kolem 341 milionů dolarů a má v současné době dostatek finančních prostředků na vývoj svého designu.[21]

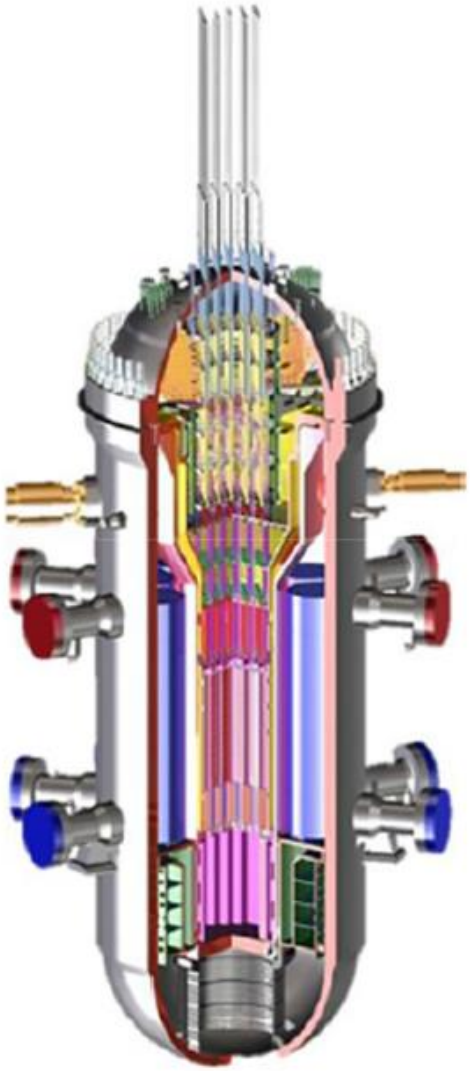
Pro 12 modulů se očekává požadovaná rozloha kolem 140 000 m^2. Moduly jsou vyráběny rovnou v továrnách a dimenzovány tak, aby bylo možné jejich přepravení prostřednictvím železniční a silniční sítě nebo i vodní dopravy. Díky pasivním bezpečnostním systémům se reaktor bezpečně odstaví a sám se ochladí, na dobu neurčitou bez nutnosti zásahu operátora nebo AC/DC napájení. [22]

Obrázek 6 - Vizuální pohled na elektrárnu NuScale Power Modules [23]

[21] Central WA is eyeing nuclear power again, 2022
[22] NUSCALE, 2022, str. 2
[23] Langdon, c2019, str. 13

3.1.2. System Integrated Modular Advanced Reactor

Společnosti Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) a Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP) spolupracují na vývoji návrhu lehkovodního reaktoru System Integrated Modular Advanced Reactor (SMART100) s elektrickým výkonem 107 MW_e a tepelným výkonem kolem 360 MW_t. SMART100 má potenciál k napájení větších měst, cca se 100 tisíci obyvateli. Design využívá dvoublok, což jsou často dva nezávislé reaktory, které jsou umístěny ve stejné budově. Reaktor využívá palivo s uranem obohaceným pod 5 % a strukturou obdobnou u velkých reaktorů, které se využívají u PWR. K výměně paliva dochází každý třetí rok a vyměňuje se pouze polovina palivových článků. Obdobně jako u velkých reaktorů PWR i zde dochází k řízení reaktivity pomocí kontrolních tyčí a kyseliny borité. Ve spirálovitých teplo-odolných trubkách se vyrábí přehřátá pára, která dále směřuje do parogenerátoru. Přenos teplonosné látky je zajištěn oběhovými čerpadly.[24]



Obrázek 7 - Projekt System Integrated Modular Advanced Reactor (SMART100) vyvíjený společností Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP) [25]

[24] E. Ricotti, 2020, str 196-198
[25] E. Ricotti, 2020, str. 198

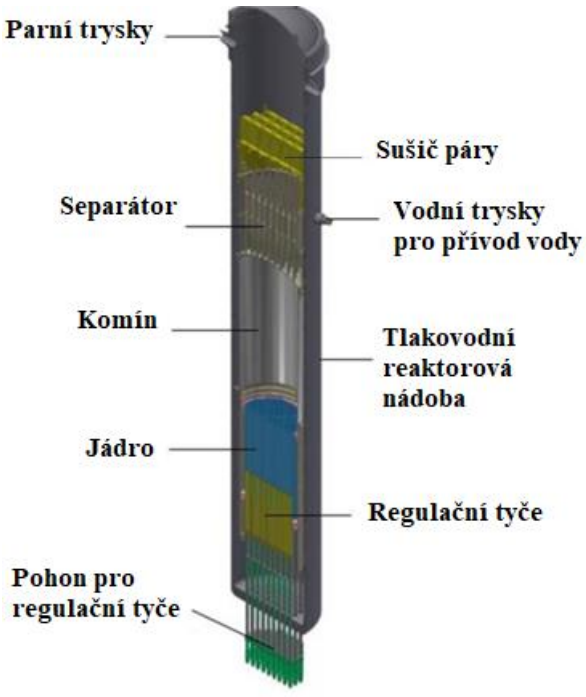
3.1.3. BWRX-300

Společnost GE-Hitachi Nulear Power vyvíjí lehkovodní reaktor BWRX-300, který je založen na technologii varného reaktoru (BWR). Kolem 78 varných vodních reaktorů je v provozu po celém světě od Japonska, Finska až po USA. Tento jaderný reaktor má výkon 300 MW_e a býval dříve podporován prostřednictvím programu Nuclear Power 2010. Reaktor obsahuje pasivní bezpečnostní systémy s přirozenou cirkulací. Reaktor BWRX-300 neprodukuje téměř žádný uhlík a je navržen tak, aby se snížily konstrukční a provozní náklady. [26]

BWRX-300 produkuje páru uvnitř tlakové nádoby reaktoru, aby se výrazně snížila složitost a velikost elektrárny. BWRX-300 odstraňuje prakticky všechny systémy potřebné k podpoře velkého reaktoru, s výjimkou systému izolačního kondenzátoru. Tento klíčový systém si zachová svou původní velikost, aby se optimalizoval jeho výkon v mnohem menším BWRX-300. Izolační kondenzátor přeměňuje páru na kapalinu, čímž spouští přirozenou cirkulaci a pasivní chlazení. Díky přidávání vody do bazénů izolačního kondenzátoru se umožní stálé ochlazování komponentů reaktoru. Tato vylepšená funkce umožňuje optimálně udržovat tlak a teplotu v reaktoru po dobu sedmi dnů bez napájení nebo zásahu operátora.[27]

Princip bezpečnosti designu BWRX-300 je postaven tak, že využívá vlastních rezerv, jako je větší objem konstrukce a zásob vody, k eliminaci problémů se systémem a snadnému přizpůsobení se s přechodnými jevy.[27] [30]

Projekt by mohl být dokončen již v roce 2028 v Kanadě v lokalitě Darlington za spolupráce se společností Ontario Power Generation (OPG), které přispělo know-how a konstrukčními technikami.



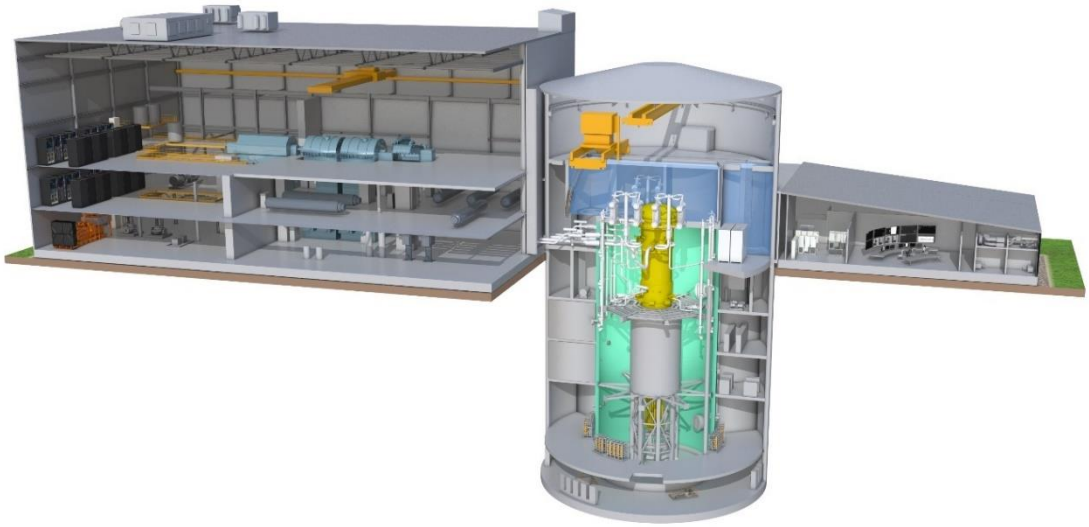
Obrázek 8 - Projekt BWRX – 300 [27]

[26] THE BWRX-300 SMALL MODULAR REACTOR, c2022
[27] Status Report – BWRX-300 (GE Hitachi and Hitachi GE Nuclear Energy), 2019, str. 10 − 15

O projekt projevily zájem Kanada, Polsko, Estonsko nebo Česká republika.[28]

Díky gravitaci a kondenzaci páry umožňuje BWRX-300 chladit po dobu minimálně sedmi dnů bez napájení nebo zásahu personálu. Stavební technologie začleněné do návrhu BWRX-300 využívají pokročilé betonové řešení a inovativní techniku. Odhaduje se, že díky těmto konstrukčním technikám lze projekt postavit za 24 - 36 měsíců. [29]

Požadavek na plochu pro BWRX-300 se odhaduje na 26 300 m^2. Plocha elektrárny může dosahovat rozlohy kolem 8 400 m^2. Dle seismických analýz je možné stavět BWRX-300 na široké škále půdních podmínek, jako jsou měkká, střední i skalnatá podloží. [30]



Obrázek 9 – Vizuální návrh elektrárny BWRX-300 [29]

[28] https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/bwrx-300
[29] THE BWRX-300 SMALL MODULAR REACTOR, c2022
[30] Status Report – BWRX-300 (GE Hitachi and Hitachi GE Nuclear Energy), 2019, str. 10 a 15

3.1.4. Unite Kingdom Small Modular Reactor

Elektrárna UK SMR bude produkovat nízkouhlíkovou elektrickou energii ve výši 470 MW_e a tepelnou energii 1 276 MW_t. UK SMR je primárně určen pro výrobu elektrické energie v základním zatížení. Nicméně projekt umožňuje se přizpůsobit pro další aplikace, jako je možnost dálkového vytápění, výrobu vodíku nebo syntetických paliv. Životnost elektrárny se odhaduje na 60 let. Rolls-Royce vychází ze zkušeností z výroby tlakovodních reaktorů pro ponorky a poskytování bezpečnostních systémů pro pevninské jaderné elektrárny. UK SMR je vyvíjen tak, aby byl cenově dostupný a měl nízkouhlíkovou schopnost výroby energie. Projekt UK SMR je založen na optimalizovaném a rozšířeném použití osvědčené technologie lehkovodních reaktorů, které jsou dobře známé ve světě a v Evropě. [31]

Projekt UK SMR používá tři smyčky pro chlazení obohacené o pasivní bezpečnostní systémy. Nicméně k cirkulaci chladící kapaliny projekt používá i tři odstředivá čerpadla, kde kapalina poté cirkuluje do parogenerátorů. Tedy konstrukce zahrnuje několik aktivních a pasivních bezpečnostních systémů. [32]

Obrázek 10 - Vizuální náhled na elektrárnu UK SMR [32]

Jedna elektrárna UK SMR zabere plochu zhruba šesti fotbalových hřišť, což odpovídá ploše 49 000 m^2. Díky těmto nárokům na rozlohu UK SMR zvyšuje flexibilitu na lokalitu a umožnuje tedy lepší nahrazení za stávající uhelné nebo plynové elektrárny. Ke snížení doby výstavby se podílí výroba některých komponentů v továrnách, které se poté transportují na místo výstavby. UK SMR je z 90 % vyroben v továrnách a doba výstavby elektrárny se odhaduje na 4 roky. Personální požadavky na výstavbu jsou odhadován zhruba na 500 zaměstnanců. [32]

[31] Rolls-Royce Small Modular Reactors, 2022
[32] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2020, str. 85 – 86

Rolls-Royce podepsal memorandum o porozumění s Estonskem, Tureckem a Českou republikou. V rámci České republiky podepsal například toto memorandum se Škoda JS. Memorandum o porozumění představuje příležitost pro nasazení UK SMR v České republice a ve středoevropských regionech. Obě společnosti budou spolupracovat, aby zjistily, jak může Škoda JS a.s. v oblasti jaderného inženýrství a výroby podpořit nasazení UK SMR v celé Evropě. Současně se Rolls-Royce aktivně účastní jednání s Ministerstvem obchodu a průmyslu České republiky o možné implementaci UK SMR v České republice. Rolls-Royce předpokládá, že program UK SMR vytvoří do roku 2040 až 40 000 pracovních míst ve Spojeném království Velké Británie a Severního Irska. [33]

Reaktorová nádoba designu UK SMR se očekává, že bude dosahovat výšky 11,3 m, šířky 4,5 m a hmotnosti 220 tun. Projekt bude používat palivo oxid uraničitý UO_2 s obohacením do 4,95 % s uspořádáním 17 x 17. Palivový cyklus bude probíhat každých 18 - 24 měsíců s odstávkou trvající 18 dnů. Díky absenci boru bude dosaženo nižšího environmentálního dopadu a provozním rizikům. [34]

Obrázek 11 - Elektrárna UK SMR [35]

[33] Rolls-Royce SMR signs Memorandum of Understanding (MoU) with Škoda JS, 2022
[34] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2020, str. 85–88
[35] ROLLS ROYCE NUCLEAR 'SMALL' MODULAR REACTORS ARE COMING!, 2022

3.1.5. SMR-160

Společnost Holtec International ve Spojených státech amerických vyvíjejí jaderná zařízení a dodávají hlavní komponenty v oblasti jaderné energetiky. V Jižní Koreji se společnost Holtec International podílel na výstavbě 18 jaderných elektráren a výstavbě čtyř bloků APR-1400 ve Spojených arabských emirátech. V současné době vytváří koncepci projektu SMR-160. Jedná se o pokročilý lehkovodní SMR, který může produkovat kolem 525 MW_t tepelné energie a 160 MW_e elektrické energie. Jejich konstrukce designu obsahuje ve větší míře pasivní bezpečnostní systémy z důvodů dosažení vysoké spolehlivosti před předpokládanými nehodami, jako mohou být sabotáže nebo neopatrné lidské jednání. Pro zvládnutí havarijní situace je design projektován tak, aby nebyla v této situaci potřeba zásahu operátora.[36]

Obrázek 12 - Vizuální návrh elektrárny SMR-160 [37]

Elektrárna SMR-160 je ve srovnání s konvenčními elektrárnami značně zjednodušena. Tím se zlepší její kontrolovatelnost a údržba. Elektrárna má v rámci primárního okruhu přirozenou cirkulaci vody. Modulární konstrukční plán pro SMR-160 zahrnuje výrobu největších komponentů před výstavbou elektrárny. Pro každou n-tou jednotku se předpokládá doba výstavby kolem 24 měsíců. [37]

[36] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2020, str. 97–99
[37] Holtec Advances Project Delivery Plan for SMR-160 in Czech Republic, c2022

SMR-160 je primárně určen pro výrobu elektřiny s možnou kogenerací. Díky tomu lze vyrábět elektrickou energii společně s výrobou vodíku nebo výrobou tepelné energie a jejím následným použitím pro dálkové vytápění. SMR-160 je možno umístit v místech s nedostatkem vody pomocí vzduchem chlazeného kondenzátoru, který patří mezi suché chladící systémy. U suchého chlazení pára kondenzuje uvnitř vzduchem chlazených žebrovaných trubek, kde dochází k odběru tepla. Dále je možné design SMR-160 použít v destinacích s nestabilními rozvodnými sítěmi. Reaktor SMR-160 umístěný v kontejnmentu je chráněn uzávěrem. Kontejnment a ochranný uzávěr jsou z velké části umístěni pod zemí. V této struktuře se současně nachází všechny bezpečnostní systémy a bazény na vyhořelé palivo. [38]

Společnost Holtec International během provozu a výstavby očekává širší účast českého průmyslu. Holtec připravuje návrh o spolupráci s českým dodavatelským řetězem. Dne 11. října 2022 Holtec uzavřel memorandum o dohodě se společnostmi Škoda Praha a Hyundai Engineering and Construction. Cílem této dohody je možná výstavba jejich projektu SMR-160 v České republice. Současně během září podepsali memorandum o dohodě se Skupinou ČEZ, se kterou Holtec spolupracuje již od roku 2019. Účelem této spolupráce je možné nasazení SMR-160 v Elektrárně Temelín, kde ČEZ plánuje nasadit pilotní SMR v roce 2032. Holtec aktivně jedná s Ministerstvem průmyslu a obchodu České republiky a aktivně sdílí potřebné informace pro implementaci jejich projektu v ČR. [39] Pro nasazení jedné jednotky SMR-160 se odhaduje zabrání kolem 20 000 m^2 území. Očekávaná doba od výstavby se odhaduje na 36 měsíců. Krátký cyklus stavby je možný, neboť některé komponenty budou již vyrobeny a montovány až na místě, což zkrátí dodací lhůtu a sníží náklady. [38]

Obrázek 13 Reaktor SMR-160 [38]

[38] SMR-160 Delivers High Performance with a Smaller Footprint, c2022
[39] Holtec Advances Project Delivery Plan for SMR-160 in Czech Republic, c2022

3.1.6. NUWARD™

Projekt NUWARD™ je návrh od francouzské společnosti Électricité de France S. A., známá také pod zkratkou EdF. Do projektu jsou zapojeni další subjekty, jako je Francouzská komise pro alternativní energie a atomovou energii (CEA), Naval Group, TechnicAtome a Framatome. [40] NUWARD™ je integrovaný tlakovodní reaktor generace III+ o instalovaném elektrickém výkonu 540 MW_e s dvoublokem, což jsou dva nezávislé reaktory s elektrickým výkonem 170 MW_e, které jsou umístěny ve stejné budově jaderné elektrárny. NUWARD™ je zaměřen na standardizaci a jednoduchost pro hromadnou výrobu v továrnách. Tento projekt je v souladu s bezpečnostními standardy Mezinárodní agentury pro atomovou energii (MAAE).[41]

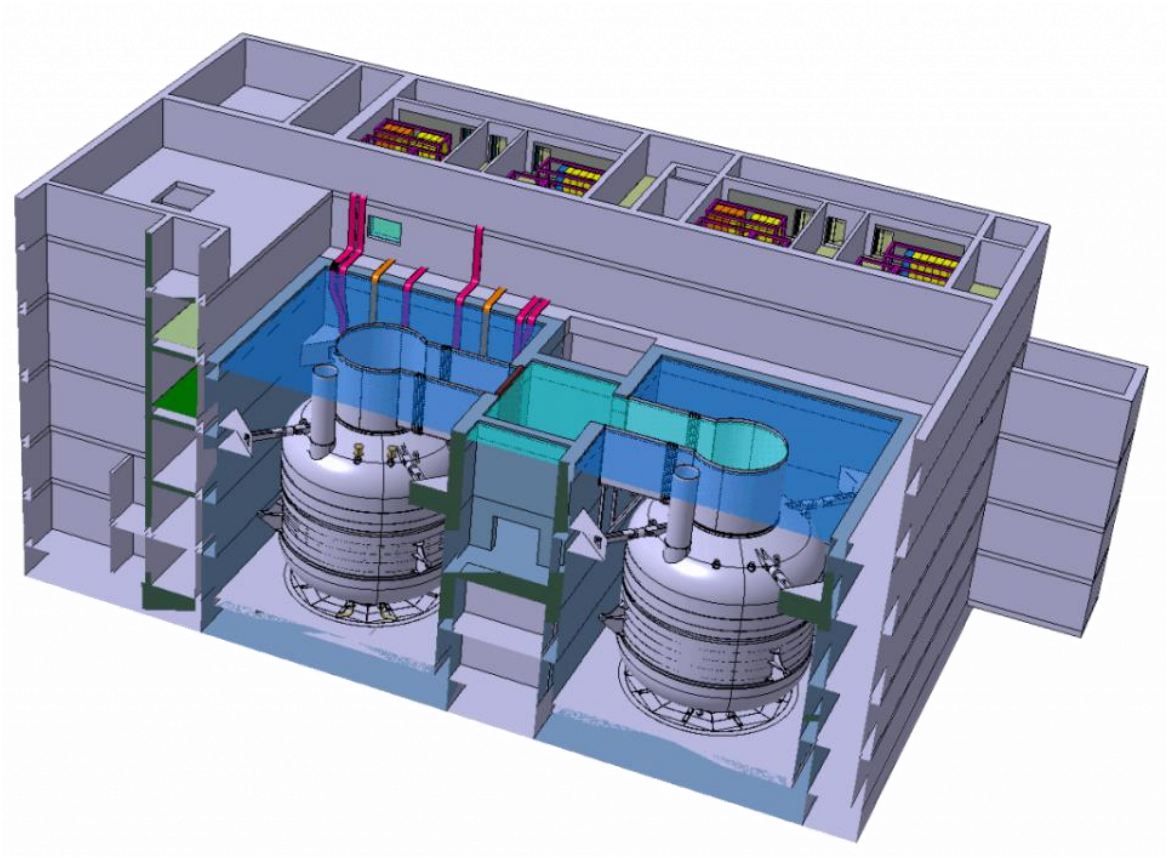
Společnost EdF se projektem NUWARD™ primárně zaměřuje na nahrazení stárnoucích uhelných elektráren s elektrickým výkonem v rozsahu 300 – 400 MW_e a dodávání nízkouhlíkové elektřiny do vzdálených obcí a energeticky náročných průmyslových areálů.[41]

Kromě výroby elektřiny je NUWARD™ navržen pro výrobu vodíku, kogeneraci tepla a elektřiny. Délka palivového cyklu pro elektrárnu NUWARD™ je odhadována na dva roky. [41]

Obrázek 14 - Vizuální návrh elektrárny NUWARD™ [41]

[40] NUWARD SMR to be test case for European regulatory review, 2022
[41] NUWARD™ SMR, leading the way to a low-carbon world, c2022

Společnost EdF oznámila, že návrh NUWARD™ bude hodnocen v rámci Evropského regulátoru. Tohoto společného hodnotícího procesu se také zúčastní Státní úřad pro jadernou bezpečnost v ČR (SÚJB) a Finský úřad pro radiační a jadernou bezpečnost (STUK). Podle společnosti EdF bude společný přezkum zřízen na aktuálních národních předpisech každého státu. Prostřednictvím technických diskusí pomůže SUJB, francouzský úřad pro jadernou bezpečnost (ASN) a STUK zvýšit jejich příslušné znalosti v regulačních postupech druhé strany a současně zlepší schopnost společnosti EdF předvídat mezinárodní licenční výzvy. [42]



Obrázek 15 - Dvojblok v elektrárně Nuward™ [43]

[42] NUWARD™ SMR, leading the way to a low-carbon world, c2022
[43] NUWARD SMR to be test case for European regulatory review, 2022

3.2. Pokročilá generace reaktorů

Tato generace pokročilých reaktorů se řadí mezi tzv. IV. Generaci reaktorů. První komerční elektrárny se očekávají až v letech 2040 – 2050. Koncepční návrhy nové generace reaktorů jsou zaměřeny na ekonomiku, zlepšení bezpečnosti a odolnost proti nešíření jaderných zbraní.

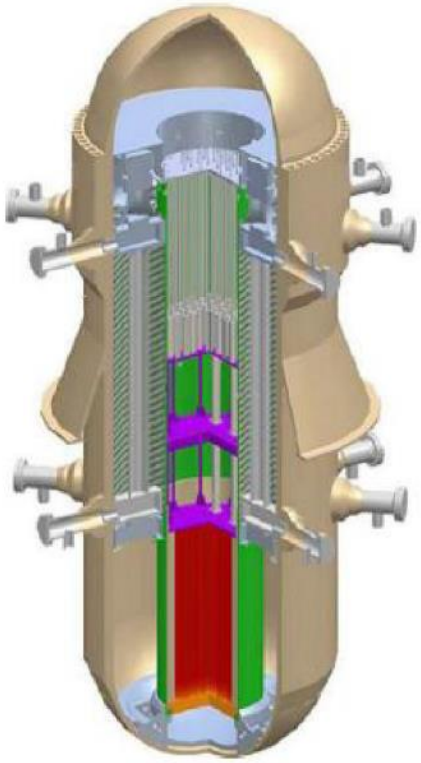
3.2.1. Lehkovodní pokročilé reaktory

Lehkovodní reaktory jsou dobře známou technologií a v rámci čtvrté generace reaktorů je cílem inovativních technologií řešit jejich klíčové požadavky jako je ekonomika, zvýšená bezpečnost, snížení radioaktivního odpadu a zlepšení odolnosti proti zneužití. Jedním z příkladů k vyvíjené IV. Generaci reaktorů je projekt International Reactor Innovative and Secure (IRIS). Tento projekt má hlavně zvýšit bezpečnost a efektivnost během provozu. Na jednotce IRIS se očekává účast co nejmenšího počet pracovníků, což by mohlo vést ke snížení provozních nákladů. Výstavba takového bloku se odhaduje na 3 roky.[44]

V reaktoru IRIS budou všechny hlavní komponenty primárního okruhu uvnitř jedné nádoby, včetně aktivní zóny reaktoru s pohony ovládající regulační tyče, parogenerátory s hlavními cirkulačními čerpadly a kompenzátory. Větší bezpečnost je docílena díky většímu poměru objemu k výkonu zvoleného pro kompenzátor IRIS, který umožňuje zlepšit instalovaný výkon reaktoru v přechodových dějích. Hlavní oběhová čerpadla instalovaná uvnitř společné nádoby nevyžadují během provozu žádnou údržbu. [44]

[44] E. Ricotti, 2020, str. 199-202

Mezi LW-SMR je průměr nádoby IRIS větší než u jiných LW-SMR, protože konstruktéři IRIS rozšířili systém chlazení reaktoru (Reactor Cooling Systém) a výkon IRIS je vyšší než u jiných LW-SMR. Tento systém současně slouží pro ochlazení rozpadového tepla a v případě havárie poskytuje flexibilitu pro bezpečnostní rezervy, zejména při použití různých předpisů týkající se nehod pro LWR.[45]



Obrázek 16 – Projekt vyvíjený společností International Reactor Innovative and Secure (IRIS) [46]

3.2.2. Reaktory založené na roztavených solích

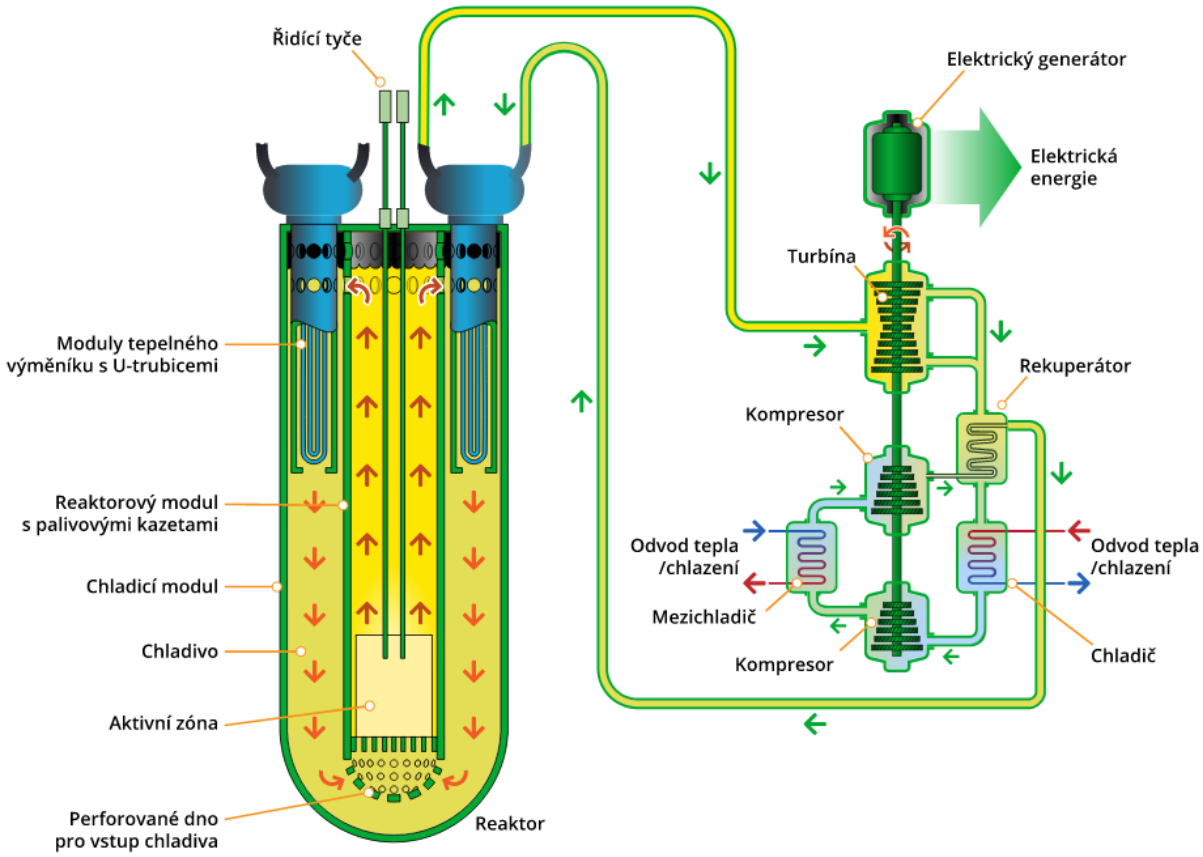
Tyto reaktory používají roztavené soli (MSR) jako primární chladivo při nízkém tlaku. Lithium-beryliumfluorid a soli fluoridu lithného zůstávají kapalné bez tlakování až do 1400 °C, na rozdíl od PWR, který pracuje při teplotě asi 315 °C a tlaku 15 MPa. Rychlospektrální MSR používají chladicí kapalinu chloridové soli. Ve většině konstrukcí je palivo rozpuštěno v primárním chladivu.[47]

Palivem MSR bývají roztavené směsi solí fluoridu lithného a berylnatého s rozpuštěným obohaceným uranem U-235 nebo U-233. Jádro se skládá z neplátovaného grafitového moderátoru uspořádaného tak, aby umožňoval průtok soli při nízkém tlaku a teplotě cca 700 °C. Mnohem vyšší teploty jsou možné, ale tyto reaktory ještě nebyly testovány.[47]

[45] Aydogan, 2016, str. 667
[46] E. Ricotti, 2020, str. 201
[47] Small Nuclear Power Reactors, 2021

3.2.3. *Reaktory s rychlými neutrony*

Reaktory s rychlými neutrony (FNR) jsou menší a jednodušší než LWR. Mají lepší palivové vlastnosti a mohou mít delší interval doplňování paliva (cca až 20 let), ale je třeba pro ně vytvořit nové bezpečnostní pouzdro. Jsou navrženy tak, aby využívaly celý energetický potenciál uranu. Současně nemají žádný moderátor, ale mají vyšší tok neutronů a jsou chlazeny tekutým kovem. Například jako je sodík, olovo nebo olovo-bismut s vysokou vodivostí a bodem varu. Pracují při atmosférickém tlaku a mají pasivní bezpečnostní prvky. Ztráta průtoku chladicí kapaliny vede k vyšší teplotě jádra, což zpomaluje reakci. Rychlé reaktory obvykle používají regulační tyče z karbidu boru. [48]



Obrázek 17 - ilustrace rychlého neutronového reaktoru [49]

[48] Small Nuclear Power Reactors, 2021
[49] Malé a mikro reaktory, 2020

Palivo je většinou obohaceno na 15 – 20 % a může jít třeba o nitrid uranu. Většina chladicích kapalin jsou tekuté kovy. Například sodík, který je hořlavý a prudce reaguje s vodou nebo olovo-bismut, který je korozivní a nereaguje se vzduchem ani vodou. [50]

FNR eliminuje potřebu a související náklady na dodatečné komponenty a bezpečnostní systémy vyžadované jinými technologiemi pro ochranu před úniky chladicí kapaliny. Obě chladicí kapaliny lze používat při atmosférickém tlaku, což zjednodušuje konstrukci a snižuje náklady.[50]

Malé FNR jsou navrženy tak, aby se mohly vyrábět v továrnách a mohly být rovnou transportovány nákladním automobilem nebo vlakem na místo jejich výstavby. Po konci jejich životnosti se tyto reaktory zasílají zpět do těchto továren, ve kterých byly vyrobeny. Tyto reaktory by byly převážně instalovány pod zemí. [50]

[50] Small Nuclear Power Reactors, 2021

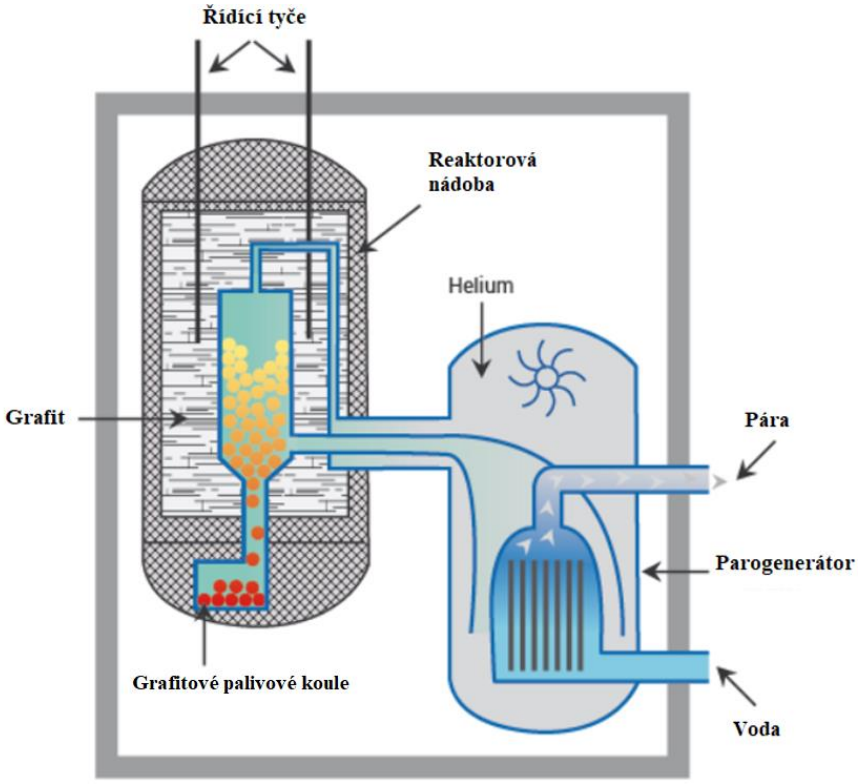
3.2.4. *Vysokoteplotní plynem chlazené reaktory*

Reaktory s vysokoteplotním plynem chlazeným reaktorem (HTGR) používají jako moderátor grafit a jako primární chladivo buď helium, oxid uhličitý nebo dusík. HTGR poskytují vysokoteplotní teplo (≥ 750 °C), které může být využito pro efektivnější výrobu elektřiny nebo pro různé průmyslové aplikace a kogeneraci.[51]

Momentálně se vyvíjejí nové vysokoteplotní plynem chlazené reaktory, které budou schopny dodávat vysokoteplotní helium (700 – 1000 °C) buď pro průmyslové aplikace prostřednictvím výměníku tepla nebo konvenční výrobou páry. [51]

Spotřebované palivo je (20 x) větší než za stejného výkonu v lehkovodním reaktoru, a to díky tomu, že palivové koule jsou převážně z grafite. Toto palivo je tvořené méně než jedním procentem uranu. Použité palivo je však celkově méně radiotoxické a díky vyššímu vyhoření produkuje méně rozpadového tepla. [51]

Existuje několik návrhů plynem chlazených rychlých reaktorů. Jedna malá konstrukce je General Atomics EM2 s heliovým chlazením nebo superkritický plynový rychlý reaktor s přímým cyklem, který je chlazen oxidem uhličitým. [51]



Obrázek 18 – Vysokoteplotní plynem chlazení reaktor (High-Temperature Gas-Cooled Reactor) [51]

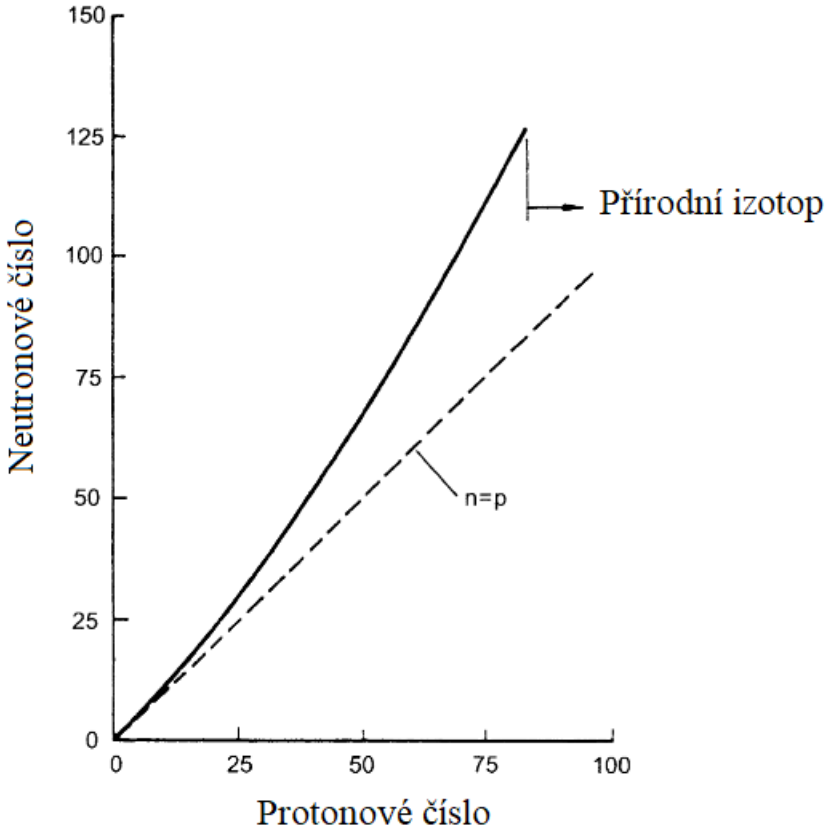
[51] Small Nuclear Power Reactors, 2021

4. Reaktorová a jaderná fyzika

V této kapitole jsou popsány základní principy jaderné fyziky, která je nedílnou součástí pro vznik jaderné štěpné reakce v jaderných reaktorech. Dále jsou v této kapitole popsaná jaderná data využívaná ve výpočtech fyziky reaktorů, a to z důvodu, že jaderné reakce v SMR lehkovodního typu jsou stejné jako u reaktorů velkých jaderných bloků.

4.1. Stabilní nuklidy

Jaderné síly krátkého dosahu působí mezi nukleony. Tyto síly jsou několikrát silnější než Coulombovy odpudivé síly působící mezi protony. Poměr atomové hmotnosti, což je počet protonů a neutronu, roste s atomovým číslem. Nicméně skutečná atomová hmotnost není součtem hmotností protonů a neutronů. Pokud bude narůstat atomové číslo budou stabilní nuklidy bohatší na neutrony. Nuklidy, které mají stejné atomové číslo se nazývají izotopy. Níže na Obrázku 19 je znázorněna křivka jaderné stability. K identifikaci se používá ${}^{A}_{Z}X$ jako například ${}^{235}_{92}U$.[52]



Obrázek 19 - Křivka jaderné stability [52]

[52] Stacey, c2007, str. 4

Stabilita izotopů je dána poměrem počtu neutronů ku počtu protonů v jádře. Při nízkých atomových hmotnostech je stabilní poměr přibližně 1 : 1. Na Obrázek 19 - Křivka jaderné stability [52] je tento poměr udáván čárkovanou křivkou *n* = *p*. Tento poměr se pro těžké prvky začne zvyšovat na 1,5 : 1, přibližně při čísle atomové hmotnosti kolem 20. Poměr je tedy stabilní, pokud je tato atomová hmotnost pod 20 a stabilní jádra jsou bohatými na neutrony. S vyššími počty protonů je potřeba více neutronů kvůli odpuzování elektrostatiky. Nicméně existují velké množství nestabilních izotopů nad pásmem, kde je příliš vysoká koncentrace neutronů, tak i pod pásmem, kde je příliš vysoký počet protonů. Toto pásmo je znázorněno plnou křivkou v Obrázek 19 - Křivka jaderné stability [52], které současně představuje stabilní izotopy. Izotopy, které jsou blíže stabilním izotopům jsou více stabilní než izotopy, které jsou dále od pásu. V případě, že je atomová hmotnost vyšší než 208, nenacházejí se zde žádné stabilní izotopy. [53]

4.1.1. Vazebná energie

Hmotnost atomového jádra se nerovná součtu hmotnosti protonů a neutronů. Stabilní nuklidy mají hmotnostní úbytek dány rovnicí:

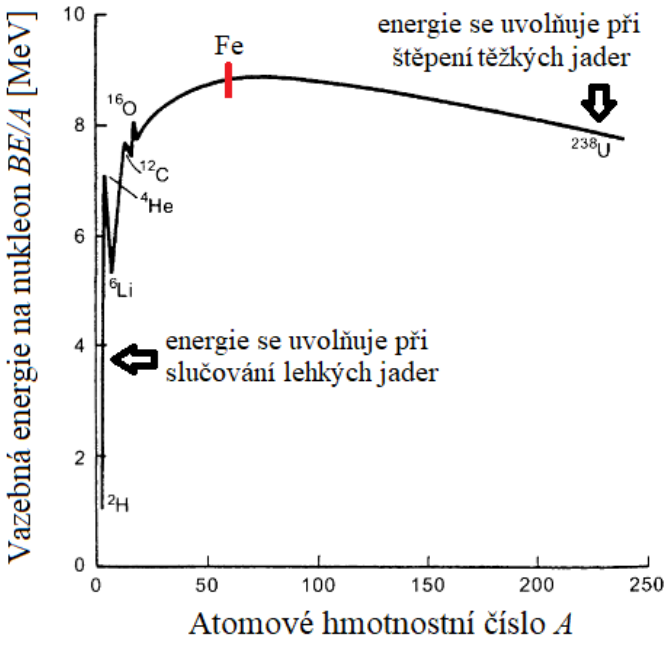
$$\Delta = \left[Zm_p + (A - Z)m_n\right] - {}^{A}_{Z}m \quad , \qquad \text{[kg; −, kg, −, kg, kg]} \qquad (1)$$

kde *A* je označení pro atomovou hmotnost, *Z* je protonové neboli atomové číslo a m_p, m_n je označení pro hmotnost protonů nebo neutronů. Hmotnostní úbytek je považován za přeměněnou energii $(E = \Delta c^2\ [eV])$ ve chvíli, kdy bylo vytvořeno jádro. Velikost dodané energie, které by muselo být přeměněno na hmotu při rozložení jádra na nukleony se nazývá vazebná energie jádra dána vztahem: [54]

$$BE = \Delta c^2, \qquad \text{[eV;eV]} \qquad (2)$$

kde *BE* je hmotnostní úbytek, *c* je rychlost světla ve vakuu. Proces přeměny nuklidů na jiné nuklidy s větší vazebnou energií vede k přeměně hmoty na energii. Při kombinaci nuklidů s nízkým obsahem atomové hmotnosti *A* za vzniků nuklidů s vyšší hodnotou *BE/A* a atomovou hmotností vede ke vzniku fúzních procesů pro uvolňování jaderné energie. Obdobně štěpné procesy jsou součástí jaderných reaktorů, které vzniká za velmi vysokých nuklidů A s vyšší hodnotou *BE/A*. [54]

[53] Band of Stability, c2013
[54] Stacey, c2007, str. 4–5



Obrázek 20 - Vazebná energie na jeden nukleon [55]

4.1.2. Mez prahové energie

Pravděpodobnost, že u nuklidu nastane štěpení je velká, pokud se excitovanému jádru dodá dostatečné množství vnější energie. Tedy pro vykonání jaderné reakce musí mít proton určitou prahovou energii pro překonání odpudivé elektrické síly jádra. Toto prahové množství excitační energie je potřebné k vyvolání štěpné reakce a závisí na struktuře jádra. Pro nuklidy, kde atomové číslo $Z < 90$ je prahová energie značně vyšší. Pro nuklidy, kde $Z > 90$ je prahová energie kolem 4 až 6 MeV.[56]

Když je neutron absorbován do těžkého jádra za vzniku složeného jádra, je hodnota *BE/A* pro složené jádro nižší než pro původní jádro. U nuklidů s vysokým atomovým číslem (např. $^{235}_{92}U$) je toto snížení hodnoty *BE/A* postačující, aby složené jádro s vysokou pravděpodobností prošlo štěpením, i když má neutron velmi nízkou energii. Tyto nuklidy se označují jako štěpné, a tedy může u nich dojít ke štěpení absorpcí nízkoenergetického neutronu. Pokud měl neutron kinetickou energii před tím, než byl absorbován do jádra, tak se tato energie přemění na další excitační energii složeného jádra. Všechny nuklidy $Z > 90$ projdou štěpením s vysokou pravděpodobností, když je absorbován neutron s kinetickou energií přesahující asi 1 MeV. U nuklidu $^{235}_{92}U$ bude docházet ke štěpení s neutrony, kde bude tato energie kolem 1 MeV nebo vyšší.[56]

[55] Stacey, c2007, str. 4–5
[56] Stacey, c2007, str. 5

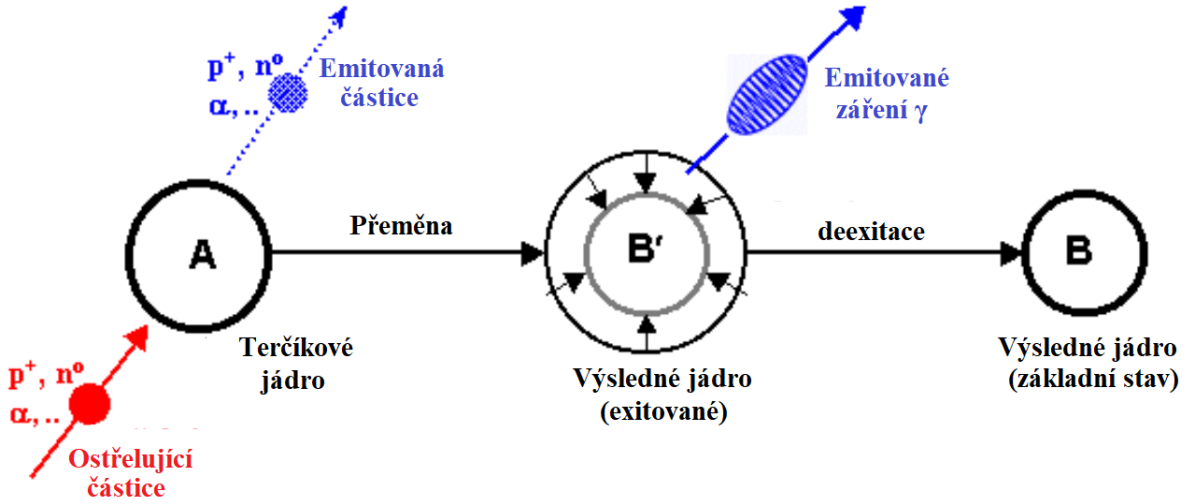
4.1.3. Jaderná reakce

Pod pojmem jaderná reakce si lze představit proces, kdy se dva nukleony, dvě jádra, nebo jiná částice a jádro, dostatečně blízko přiblíží na vzdálenost kolem 10^{-13} *cm* a vstoupí do působení silné jaderné interakce. Tato interakce může vést k další emisi částic, neboť se následně vybudí v jádrech změna konfigurace a počet nukleonů. Výsledkem reakce je transmutace jádra, kdy jádro vzniká na jiný izotop téhož prvku se změnou počtu neutronů, nebo na jádro jiného prvku, kdy se změní počet protonů. Nová jádra vznikají v tzv. vzbuzeném stavu. Během jaderných reakcí jsou jádra většinou radioaktivní.[57]

Jaderná reakce vzniká na principu ostřelování terčíkového jádra určitou částicí (p^+, n^0, α). Tato interakce částice s terčíkem vyvolá změnu jádra a vyzáří nové částice. Jaderná rovnice:

$$a + X \rightarrow Y + b + Q \qquad [-, -; -, -, \text{eV}] \qquad (3)$$

Toto uvedené schéma označuje nalétající částici *a,* terčíkové jádro *X,* vzniklé jádro během reakce *Y,* emitovanou částici *b*, kterou může být foton a energetickou bilanci *Q,* což je energie uvolněná při exotermické reakci nebo dodaná energie při endotermické reakci.[57]

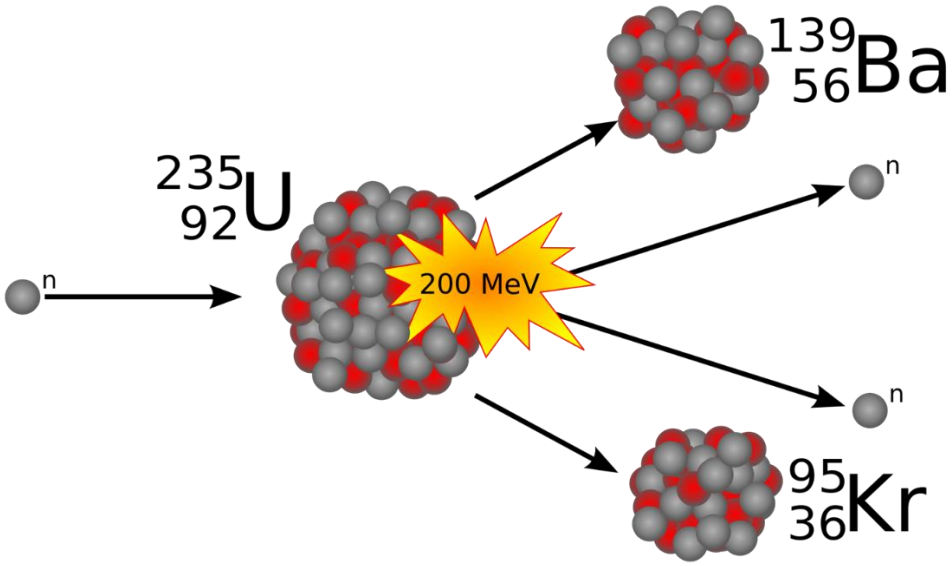


Obrázek 21 - Vznik jaderné reakce, která je vyvolaná částicí [57]

[57] Jaderná a radiační fyzika

V případě jaderného štěpení zde hrají důležitou roli těžká jádra, která obsahují vysoký počet nukleonů N > 230. Tato jádra se mohou rozštěpit pohlcením rychlého nebo pomalého neutronu. Toto štěpení současně uvolní jadernou energii, což je rozdíl $\frac{vazebná\ energie}{1\ nukleon}$ mezi lehčími a těžšími jádry. Štěpitelná jádra jsou například ^{232}Th, ^{233}U, ^{235}U, ^{238}U, ^{239}P. [58]

Nicméně pro štěpnou reakci se využívají jádra, která pohltí pomalé neutrony a uvolní alespoň další dva neutrony schopné iniciovat štěpení dalších jader nazývané štěpnými nuklidy. Pokud jsou tyto štěpné nuklidy v dostatečném kritickém množství a ve vhodné konfiguraci, jsou poté schopny udržet řetězovou štěpnou reakci. Mezi používanými nuklidy se řadí uran ^{235}U a plutonium ^{239}P. [58]



Obrázek 22 - Štěpná jaderná reakce [59]

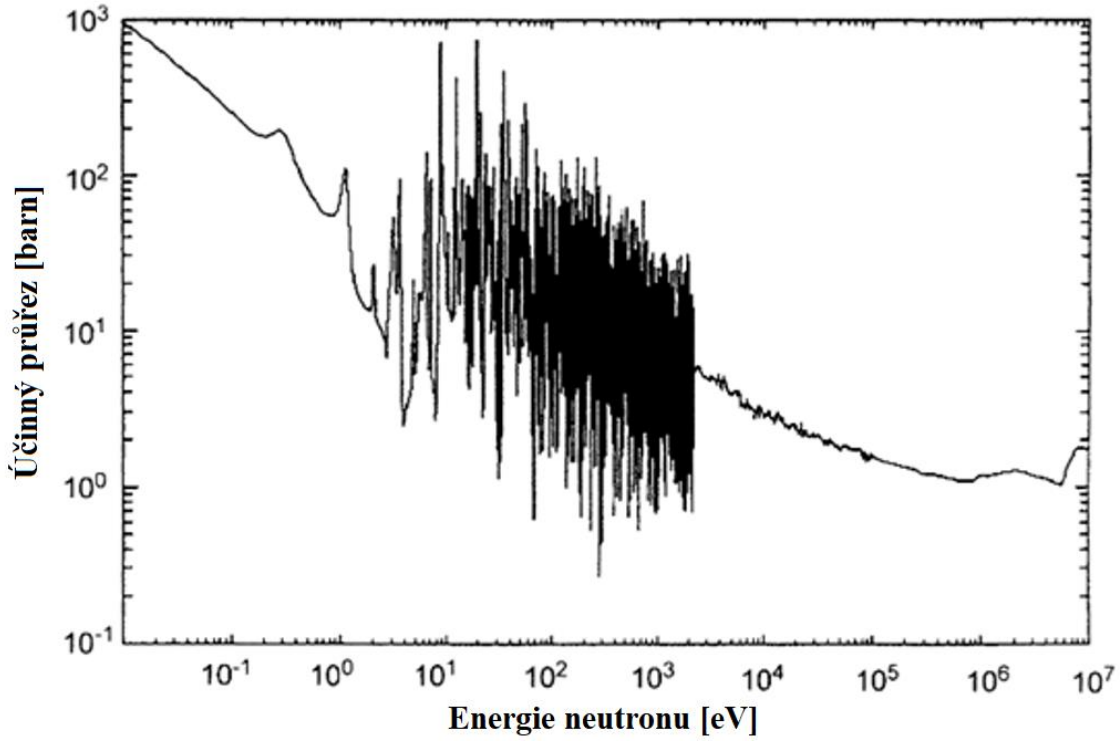
4.1.4. Účinný průřez

Pravděpodobnost, že dojde k jadernému štěpení lze vyjádřit veličinou účinného průřezu *σ*. Tato veličina je dána počtem neutronů *n* pohybujících se rychlostí *v* na vzdálenost *dx* v materiálu s *N* nuklidy na objem jednotky. Jednotkou účinného průřezu v soustavě SI je m^2. Ten je však neadekvátně velký, a tedy se používá jednotka barn, kde $1\ barn = 10^{-28}\ m^2$. [59]

$$\sigma = \frac{reakční\ rychlost}{n \cdot v \cdot N\ dx} \qquad [\text{barn; } s^{-1}, -, m^{-2} \cdot s^{-1}] \qquad (4)$$

[58] Jaderná a radiační fyzika
[59] Nuclear reactions, 2015

Účinný průřez σ je dán mírou pravděpodobnosti, kdy ostřelující částice bude interagovat s terčovým jádrem, které pak podléhá štěpení. Růst pravděpodobnosti interakce roste společně s velikostí účinného průřezu. Pravděpodobnost, že se vytvoří složené jádro, se výrazně zvýší, pokud relativní energie neutronu a původního jádra odpovídá rozdílu energie základního stavu a excitovaného stavu složeného jádra. Složené jádro je jádro, do kterého vnikne částice, která se sráží s nukleony. Při těchto srážkách částice ztrácí energii a není schopna opustit jádro a vzniká tzv. složené jádro.[60]



Obrázek 23 – Účinný průřez štěpení pro $^{233}_{92}U$ [60]

4.1.5. Uvolněná kinetická energie

Pro uskutečnění jaderné reakce má velký význam kinetická energie jaderné reakce. Ta je dána rozdílem celkové kinetické energie částice po reakci a před reakcí. Jedná se tedy o uvolněnou kinetickou energii při reakci E_k. Nabitých částic v palivovém článku je jen malý zlomek, a tedy energie zpětného rázu se účinně ukládá jen jako teplo v místě štěpení. [61]

[60] Stacey, c2007, str. 5-6
[61] Stacey, c2007, str. 10-13

Jak neutron difunduje, tak se zpomaluje rozptylovými srážkami s jádry, a nakonec je absorbován, čímž dochází k ukládání energie do okolního materiálu ve vzdálenosti 10 až 100 *cm*. Část těchto absorpcí neutronů má za následek záchyt neutronů, který je následovaný gama emisí. Při štěpení se uvolňuje v průměru kolem 7 MeV štěpné energie přímo jako gama paprsky, které se ukládají jako teplo v okolí 10 až 100 cm. Štěpná energie je ve formě kinetické energie elektronů asi 8 MeV a neutrin kolem 12 MeV. Kinetická energie neutronů emitovaných rozpadem štěpných produktů je téměř stejně velká jako energie neutronů rychlého štěpení. Existuje málo zpožděných neutronů z rozpadu štěpných produktů, že jejich příspěvek k distribuci štěpné energie je zanedbatelný.[61] Celkově se na jedno štěpení vyrobí zhruba 200 MeV. Jeden Watt tepelné energie pak odpovídá štěpení $3{,}1 \times 10^{10}$ jader za sekundu, neboť 1 *g* štěpného materiálu produkuje zhruba 1 megawatt-den tepelné energie. V následující Tabulce 1 jsou tepelné a štěpné neutrony izotopů. [62]

Izotop	Tepelný neutron [MeV]	Štěpný neutron [MeV]
^{233}U	190,0	-
^{235}U	192,9	-
^{239}Pu	198,5	-
^{241}Pu	200,3	-
^{232}Th	-	184,2
^{234}U	-	188,9
^{236}U	-	191,4
^{238}U	-	193,9
^{237}Np	-	193,6
^{238}Pu	-	196,9
^{240}Pu	-	196,9
^{242}Pu	-	200,0

Tabulka 1 - Tabulka izotopů, tepelných a štěpných neutronů [62]

[62] Stacey, c2007, str. 10 − 13

4.2. Neutronový a radiační záchyt

Pokud je neutron pohlcen jádrem za vzniku složeného jádra, je kromě štěpení v těžkých nuklidech možná řada reakcí. Při radiačním záchytu se složené jádro rozpadá díky emisí gama záření.[63]

Snížení vazebné energie v důsledku absorbovaného neutronu je ΔE_B *[eV]*. Pokud $E_C + E_B$ se blíží hladině excitované energie složeného jádra, pravděpodobnost tvorby složeného jádra se značně zvýší. Excitované složené jádro se bude obecně rozpadat emisí jednoho nebo více gama paprsků, jejichž kombinovaná energie se rovná rozdílu v excitovaných a základních energetických hladinách složeného jádra. [63]

Průřez radiačního záchytu se označuje σ_γ. Rezonanční povaha průřezů v určitých rozsazích odpovídá diskrétním excitovaným stavům složeného jádra, které se tvoří při záchytu neutronů. Breit-Wignerův jednoúrovňový rezonanční vzorec pro průřez neutronového záchytu je

$$\sigma_\gamma(E_c) = \sigma_0 \frac{\Gamma_\gamma}{\Gamma} \left(\frac{E_0}{E_c}\right)^{1/2} \frac{1}{1+y^2} \qquad \text{[barn; barn, eV, eV, eV, eV, −]} \qquad (5)$$

$$y = \frac{2}{\Gamma}(E_c - E_0), \qquad \text{[−; eV, eV, eV]} \qquad (6)$$

kde E_0 je energie v systému těžiště ve kterém nastává rezonanční vrchol, Γ označuje celou šířku při polovině maxima rezonance, σ_0 je maximální hodnota celkového průřezu, Γ_γ je šířka radiačního záchytu. Tato rovnice představuje průřez popisující interakci neutronu a jádra s relativní energií E_c. Nicméně jádra v materiálu jsou distribuována v energii, která je přibližná Maxwellovy distribuci charakterizovaná teplotou materiálu.[63]

Účinný průřez zprůměrovaný přes pohyb jader je dán vztahem

$$\bar{\sigma}(E,T) = \frac{1}{v(E)} \int dE' |v(E) - v(E')| \sigma(E_C) f_{max}(E',T), \qquad \text{[barn]} \qquad (7)$$

kde E a E' jsou energie neutronů a jader v laboratorním systému a f_{max} je Maxwellovo rozdělení energie

$$f_{max}(E') = \frac{2\pi}{(\pi kT)^{3/2}} \sqrt{E'} e^{-E'/kT} \qquad \text{[−; J·K}^{-1}\text{, K, eV]} \qquad (8)$$

Kde *k* je Boltzmannova konstanta a *T* je teplota. Při použití rovnic se získá

[63] Stacey, c2007, str. 13-19

průřez radiačního záchytu zprůměrovaný přes pohyb jader:

$$\bar{\sigma}_\gamma(E,T) = \frac{\sigma_0 \Gamma_\gamma}{\Gamma}\left(\frac{E_0}{E_c}\right)^{1/2} \psi(\xi, x) \qquad \text{[barn; barn, eV, eV, eV, eV, −]} \qquad (9)$$

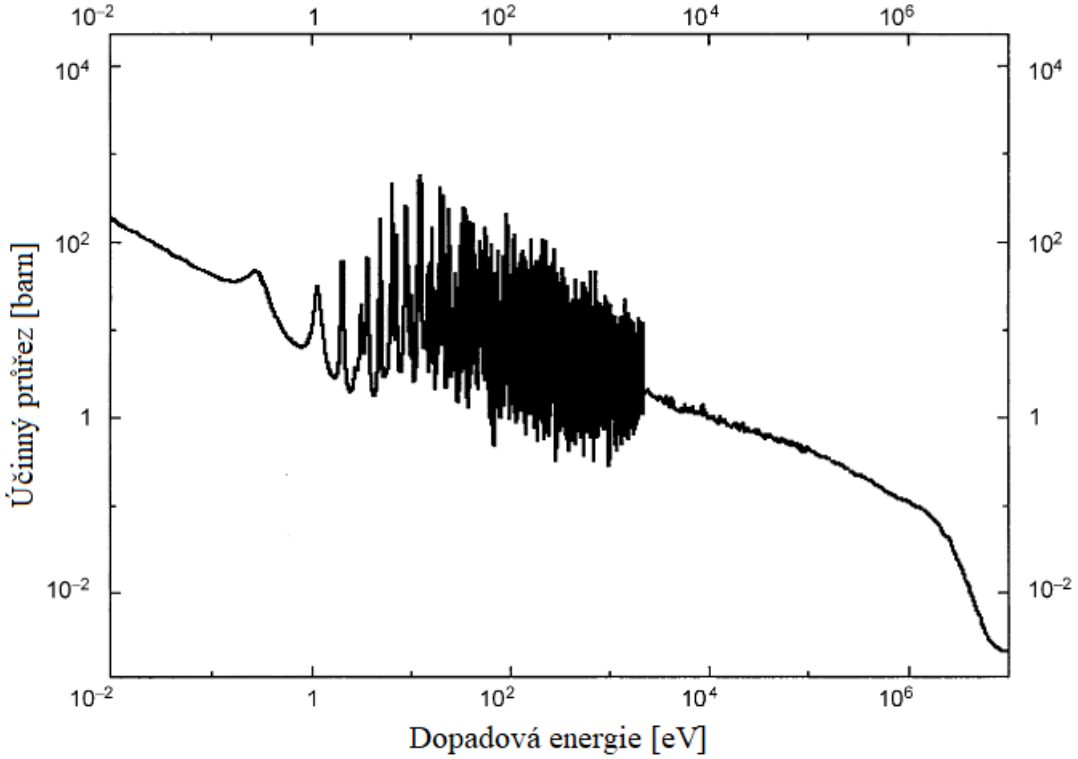
kde

$$x = \frac{2}{\Gamma}(E - E_0) \qquad \text{[−; eV, eV, eV]} \qquad (10)$$

$$\xi = \frac{\Gamma}{(4E_0 kT/A)^{1/2}} \qquad \text{[−; eV, eV, J·s, K, −]} \qquad (11)$$

Potom A je atomová hmotnost jádra a výsledný vztah je [64]

$$\psi(\xi, x) = \frac{\xi}{2\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-(1/4)(x-y)^2 \xi^2} \frac{dy}{1+y^2} \qquad \text{[−]} \qquad (12)$$



Obrázek 24 - Radiační záchytný průřez pro $^{235}_{92}U$ [64]

[64] Stacey, c2007, str. 15

4.2.1. Elastický rozptyl neutronů

K elastickému rozptylu dojde díky tvorby složeného jádra následovaného emisí neutronu, který vrátí složené jádro do jeho původního stavu. Při tomto rezonančním elastickém rozptylu je zachována kinetická energie původního systému neutron-jádro. Nicméně jádro i neutron mohou interagovat bez absorpce neutronů.[65]

V blízkosti rezonančních energií existuje kvantová mechanická interference mezi potenciálem a rezonančním rozptylem, která je konstruktivní těsně nad rezonanční energií a destrukční těsně pod touto energií. Jednoúrovňová Breit-Wignerova forma radiačního průřezu, upravená tak, aby zahrnovala rozptyl potenciálu a interference je rozepsaná do vztahu [65]

$$\sigma_S(E_c) = \sigma_0 \frac{\Gamma_n}{\Gamma}\left(\frac{E_0}{E_c}\right)^{1/2} \frac{1}{1+y^2} + \frac{\sigma_0 2R}{\lambda_0}\frac{y}{1+y^2} + 4\pi R^2, \qquad (13)$$

[barn; barn, eV, eV, −, m, m]

kde $\frac{\Gamma_n}{\Gamma}$ je pravděpodobnost, že poté co se složené jádro vytvoří, tak se rozpadne do jeho základního stavu původního jádra emisí neutronů, $R \approx 1.25 \times 10^{-13} A^{1/3}\ cm$ je jaderný poloměr, λ_0 je redukovaná neutronová vlnová délka. Zprůměrováním přes Maxwellovu distribuci pohybu jádra se získá průřez rozptylu pro neutronovou energii E a teplotu materiálu.[65]

$$\overline{\sigma_S}(E,T) = \sigma_0 \frac{\Gamma_n}{\Gamma}\psi(\xi,x) + \frac{\sigma_0 R}{\lambda_0}\chi(\xi,x) + 4\pi R^2 \qquad \text{[barn]} \qquad (14)$$

kde

$$\chi(\xi,x) = \frac{\xi}{\sqrt{\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} \frac{y e^{-(1/4)(x-y)^2\xi^2}}{1+y^2} dy. \qquad [-] \qquad (15)$$

Průřezy elastického rozptylu má téměř konstantní energii pod energiemi neutronů odpovídajícími excitovaným stavům složeného jádra. Při dostatečně malé energii neutronu je vlnová délka neutronu dána De Broglieho vlnou. [65]

De Broglieho vlna:

$$\lambda_0 = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{2.86\times10^{-9}}{\sqrt{E(eV)}}, \qquad \text{[cm; J·s, kg·cm·s}^{-1}\text{]} \qquad (16)$$

kde λ_0 je vlnová délka neutronu, h je Plankova konstanta a p je hybnost.

[65] Stacey, c2007, str. 20

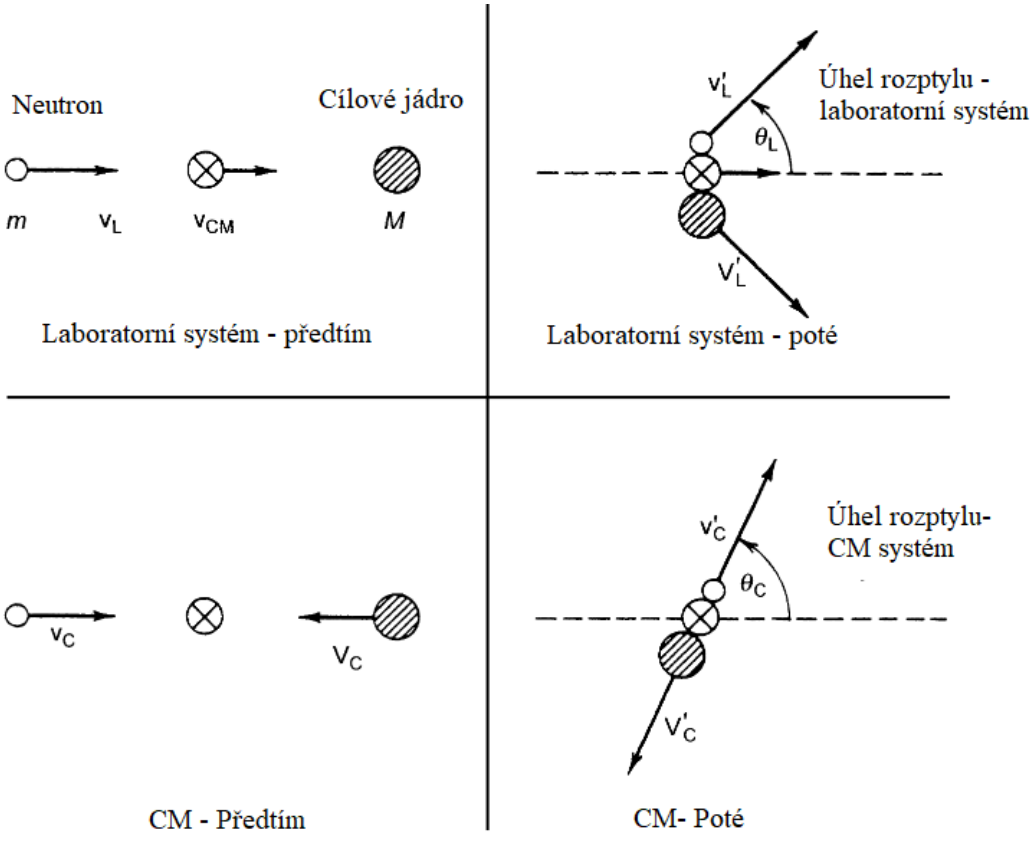
Vlnová délka se stává srovnatelná s meziatomovým rozestupem a neutron neinteraguje s jádrem, ale s agregátem vázaných jader. Pokud má materiál pravidelnou strukturu (např. grafit) neutron bude difraktován a energetická závislost průřezu bude odrážet energii neutronů odpovídající násobkům meziatomových vzdáleností. [66]

4.2.2. Korelace úhlu rozptylu a energetické ztráty

Uvažuje se neutron s energií

$$E_L = \frac{1}{2} m v_L^2 \qquad [\text{eV; kg, m}^2\cdot\text{s}^{-2}] \qquad (17)$$

v laboratorním systému dopadající na stacionární jádro o hmotnosti M. Kvůli důležitosti relativní hmotnosti se v kinematice zvolí, že *m=1* a *M = A,* kde relativní hmotnost je bezrozměrná jednotka. Dále je vhodné převést systém těžiště (CM), neboť elastický rozptyl je v systému těžiště obvykle izotropní.[67]



Obrázek 25 - Rozptylový jev v laboratoři a CM systému [67]

[66] Stacey, c2007, str. 20
[67] Stacey, c2007, str. 26-27

Rychlost neutronu a jádra v systému těžiště jsou

$$v_c = v_L - v_{cm} = \frac{A}{A+1} v_L \qquad [\mathrm{m \cdot s^{-1}};\ -,\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}] \qquad (18$$

$$V_c = -v_{cm} = \frac{-1}{A+1} v_L, \qquad [\mathrm{m \cdot s^{-1}};\ -,\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}] \qquad (19)$$

kde v_{cm} je rychlost CM systému v laboratoři. Potom energie neutronu v CM systému E_C souvisí s energií neutronu v laboratoři E_L. Vztah mezi energiemi je dán rovnicí

$$E_c = -v_{cm} \frac{1}{2} v_c^2 + \frac{1}{2} A V_c^2 = \frac{A}{A+1} \frac{1}{2} v_L^2 = \frac{A}{A+1} E_L, \qquad [\mathrm{eV};\ -,\ \mathrm{eV}] \qquad (20)$$

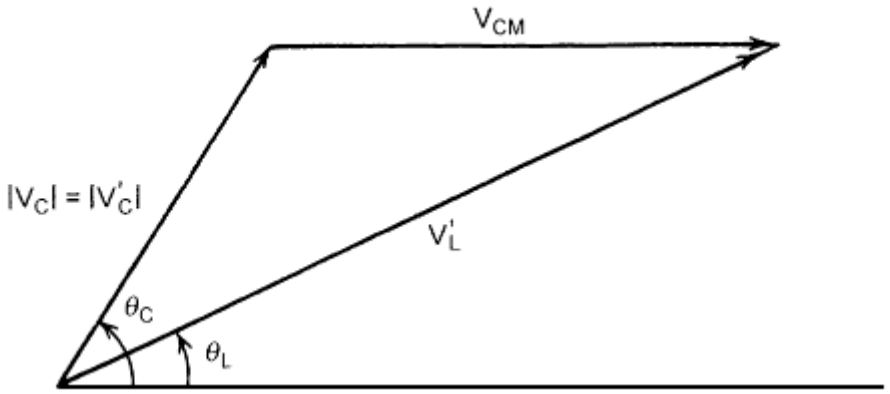
Při uvažování zachování hybnosti a kinetické energie se rychlosti neutronu a jádra v systému během rozptylu nemění.

$$v_c{}' = v_c = \frac{A}{A+1} v_L \qquad [\mathrm{m \cdot s^{-1}};\ -,\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}] \qquad (21)$$

$$V_c{}' = V_c = \frac{-1}{A+1} v_L. \qquad [\mathrm{m \cdot s^{-1}};\ -,\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}] \qquad (22)$$

Úhel rozptylu v laboratoři a systémech CM jsou ve vztahu podle následujícího obrázku

$$\tan \theta_L = \frac{v_c{}' \sin \theta_C}{v_{cm} + v_c{}' \cos \theta_C} = \frac{\sin \theta_C}{(1/A) + \cos \theta_C} \qquad [\mathrm{rad};\ \mathrm{m \cdot s^{-1}},\ \mathrm{m \cdot s^{-1}},\ \mathrm{rad}] \qquad (23)$$



Obrázek 26 - Vztah mezi laboratorními a CM úhly rozptylu [68]

Pokud se zkombinují vztahy, získá se vztah mezi dopadající a konečnou energii neutronu v laboratorním systému a úhlem rozptylu v CM systému [68]

$$\frac{\frac{1}{2} m (v_L{}')^2}{\frac{1}{2} m (v_L)^2} = \frac{E_L{}'}{E_L} = \frac{A^2 + 1 + 2A \cos \theta_C}{(A+1)^2} = \frac{(1+\alpha) + (1-\alpha) \cos \theta_C}{2}, \qquad [-] \qquad (24)$$

kde

$$\alpha = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2}. \qquad [-] \qquad (25)$$

[68] Stacey, c2007, str. 28-29

Z rovnice lze konstatovat, že poměr konečných a dopadajících energií v případě elastického rozptylu je korelován s úhle rozptylu v CM systému, který je zase korelován za pomoci rovnice. Průměrná ztráta energie v případě elastického rozptylu může být vypočtena ze vztahu [69]

$$\langle \Delta E_L \rangle = E_L - \int_{\alpha E_L}^{E_L} dE_L{}' \, E_L{}' P(E_L \rightarrow E_L{}') = \frac{1}{2}(1-\alpha)E_L, \qquad [eV] \qquad (26)$$

kde *P* je pravděpodobnost, že se neutron rozptýlí z energie E_L do diferenčního pásma energie $dE_L{}'$ o energii $E_L{}'$. Průměrná logaritmická ztráta energie může být vypočtena

$$\xi = \int_{\alpha E_L}^{E_L} dE_L{}' \ln\left(\frac{E_L}{E_L{}'}\right) P(E_L \rightarrow E_L{}') = 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \ln\left(\frac{A+1}{A-1}\right). \qquad [-] \qquad (27)$$

Počet srážek potřebný k tomu, aby byl neutron o energii E_0 zmírněn na tepelnou energii se odhadne ze vztahu [70]

$$\langle bez\ kolize \rangle \approx \frac{\ln[E_0(eV)/1.0]}{\xi} \qquad [-] \qquad (28)$$

Parametr ξ je měřítkem schopnosti moderování a klesá s hmotností nuklidu, což má za následek, že počet srážek, které jsou potřebné k moderování rychlého neutronu rostou s hmotností nuklidu. Účinnost nuklidu při moderování neutronu však závisí také na relativní pravděpodobnosti. Parametr $\xi \sum s / \sum a$ je označovaný jako moderační poměr a je mírou účinnosti zmírňujícího materiálu. Třeba voda H_2O je z hlediska počtu potřebných kolizí lepší moderátor pro termalizaci rychlého neutronu, deuterium D_2O je účinnějším moderátorem, protože absorpční průřez pro D je mnohem menší než pro H. Následující Tabulka 2 udává průměrný počet kolizí ke zmírnění neutronu. [70]

Moderátor	**ξ**	**Počet kolizí**	$\xi \sum s / \sum a$
H	1,0	14	-
D	0,725	20	-
H2O	0,920	16	71
D2O	0,509	29	5670
He	0,425	43	83
Be	0,209	69	143
C	0,158	91	192
Na	0,084	171	1134
Fe	0,035	411	35

Tabulka 2 - Průměrný počet kolizí ke zmírnění neutronu od 2 MeV do 1 eV [70]

[69] Stacey, c2007, str. 28-29
[70] Stacey, c2007, str. 29-31

4.3. Souhrn kapitoly

Cílem této kapitoly bylo popsat míru pravděpodobnosti štěpné reakce a důvod použití uranu v palivových souborech ve velkých lehkovodních jaderných reaktorech a v lehkovodních SMR. Princip fungování lehkovodních malých modulárních reaktorů je z pohledu reaktorové fyziky stejný v porovnání s velkými lehkovodními jadernými bloky. Reaktory moderované obyčejnou vodou využívají ke štěpení tzv. tepelné neutrony. Tepelné neutrony jsou neutrony, jehož kritická energie odpovídá teplotě aktivní zóny, která má na výstupu u velkých reaktorů kolem 300°C. Moderátorem u lehkovodních reaktorů je obyčejná voda H_2O, která obsahuje dva velké atomy vodíku oproti jednomu menšímu atomu kyslíku. Při průchodu neutronu moderátorem, dochází k jeho srážkám s atomy vodíku. Neutron se poté stává tepelným neutronem, až se srazí s vodíkem alespoň 10,5x. Jakmile se stane tepelným neutronem, tak má nejvyšší pravděpodobnost štěpit izotopy ^{235}U nebo ^{239}Pu, ^{240}Pu.

Uranová ruda obsahuje 99,3 % izotopu uranu ^{238}U a pouze 0,7 % ^{235}U. Uran ^{238}U se nazývá plodivo a ^{235}U nebo $^{239}Pu,$ ^{240}Pu se nazývá štěpivo. Pokud dojde ke srážce tepelného neutronu se štěpivem, dochází k jadernému štěpení na dva fragmenty a vyzáří se energie v podobě fotonů. V případě, že uran ^{238}U absorbuje tepelný neutron, dochází k jeho transmutaci na plutonium ^{239}Pu nebo ^{240}Pu, které je poté štěpitelné tepelnýma neutronem.

Když se tepelný neutron srazí se štěpivem ($^{235}U,$ $^{239}Pu,$ ^{240}Pu) dochází ke štěpení na lehký a těžký fragment a vyzáří se velké množství energie ve formě fotonů. Současně se po rozštěpení jádra excitují průměrně až 2,5x nové neutrony. Zároveň s pravděpodobností 0,67 % se z těžkého fragmentu excituje ještě jeden neutron navíc, kterému se říká zpožděný neutron. Pro udržení reaktoru v nadkritickém stavu, musí být v reaktoru přebytek neutronů. Na základě těchto zpožděných neutronů je celková bilance neutronového toku přebytková.

Palivo v elektrárně se obohacuje na 4 %, aby obsahovalo více štěpiva, a tedy se zvýšila pravděpodobnost štěpné reakce. To má za následek, že se dosáhne u jaderných reaktorů většího výkonu.

5. Malé modulární reaktory v České republice

V České republice je potenciál pro SMR především v souvislosti s odklonem od uhelné energetiky, který se plánuje k roku 2038. Ministerstvo průmyslu a obchodu tuto možnost bere jako jednu z možných variant k zajištění dostatečné produkce elektrické energie. Do energetického mixu České republiky se odhaduje, že SMR mohou být vhodné v kombinaci s OZE. Dále by SMR mohlo potencionálně zvládnout výrobu tepelné a elektrické energie a její distribuci do domácností. Nicméně v ČR pro ně chybí platforma ohledně nepřipravenosti lokalit, legislativ a podnikatelů, což je v ČR činí možně použitelnými až po roce 2030.[71]
Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky se zabývá širšími aplikacemi pro SMR jak pro dálkové vytápění, tak pro průmyslové procesy. Současně MPO vyhodnocuje možnosti podpory pro tuzemský design SMR a jeho možné uplatnění v českých podmínkách.

V rámci MPO byla vytvořena Pracovní skupina pro uplatnitelnost malých a středních reaktorů v České republice (PS SMR). Zde společně s účastníky, včetně SÚJB a MPO spolupracují a diskutují o pokrocích v implementaci SMR v ČR. [72]

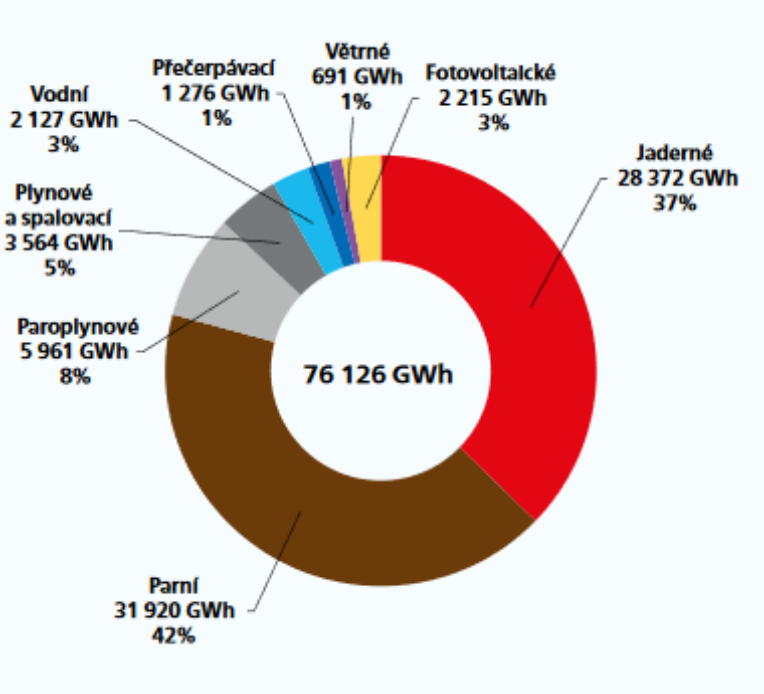
5.1. Výrobní kapacity elektrizační soustavy ČR

Účel této kapitoly je zjistit přibližnou momentální situaci výrobní kapacity elektrizační soustavy (ES) ČR a zaměřit se na možný budoucí její vývoj. V ČR se momentálně řeší současná energetická krize kvůli válce na Ukrajině a budoucí bezpečnost energetiky. Kvůli dožívání energetických zdrojů a v návaznosti na dosažení evropského právního rámce snížit emise do roku 2030 alespoň o 55 %, je snaha se odklonit od spalování fosilních paliv. Jedním z potenciálních řešení je jaderná energetika.

Níže uvedený graf na Obrázek 27 - Netto výroba elektřiny v ES ČR v roce 2020 ukazuje výrobu elektrické energie v roce 2020 a momentální strukturu výroby energetického mixu ČR. Tyto statistiky každoročně provádí ČEPS zahrnující všechny elektrárny s instalovaným výkonem nad 10 MW_e. Z grafu lze konstatovat, že nejvyšší produkcí stále převládají zdroje využívající fosilní paliva jako je černé a hnědé uhlí. Nicméně tato výroba dosáhla většího poklesu v důsledku nastalé pandemie. Obdobně

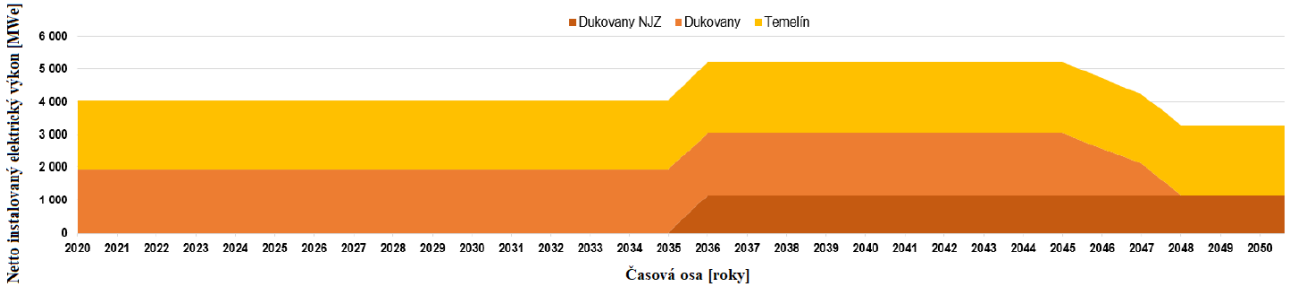
[71] Jaderná energie, 2021, str. 67 a 74
[72] Jednání se Skupinou ČEZ dne 15.3.2022, Viktor Černý místopředseda představenstva

i jaderné zdroje dosáhly menšího propadu vůči roku 2019. V následujících analýzách je výroba elektřiny více zaměřena na instalovaný výkon z jaderných zdrojů, kterými se tato práce zabývá.[73]



Obrázek 27 - Netto výroba elektřiny v ES ČR v roce 2020 [74]

Hodnocení zdrojové přiměřenosti je zpracováno v souladu s Nařízením Evropského parlamentu a Rady EU 2016/943 o vnitřním trhu s elektřinou. Evropské hodnocení zdrojové přiměřenosti vychází z předpokladů neustálého vyrovnávání výrobních zdrojů a zatížení s využitím metodologie. Cílem hodnocení zdrojové přiměřenosti je určení možných rizik a identifikace příčin vedoucí ke vzniku příčin. MAF nezahrnuje dopad jaderné energetiky do taxonomie udržitelných financí. [75]



Obrázek 28 – Netto instalovaný elektrický výkon jaderných bloků ETE, EDU a NNJZ v jednotlivých letech [76]

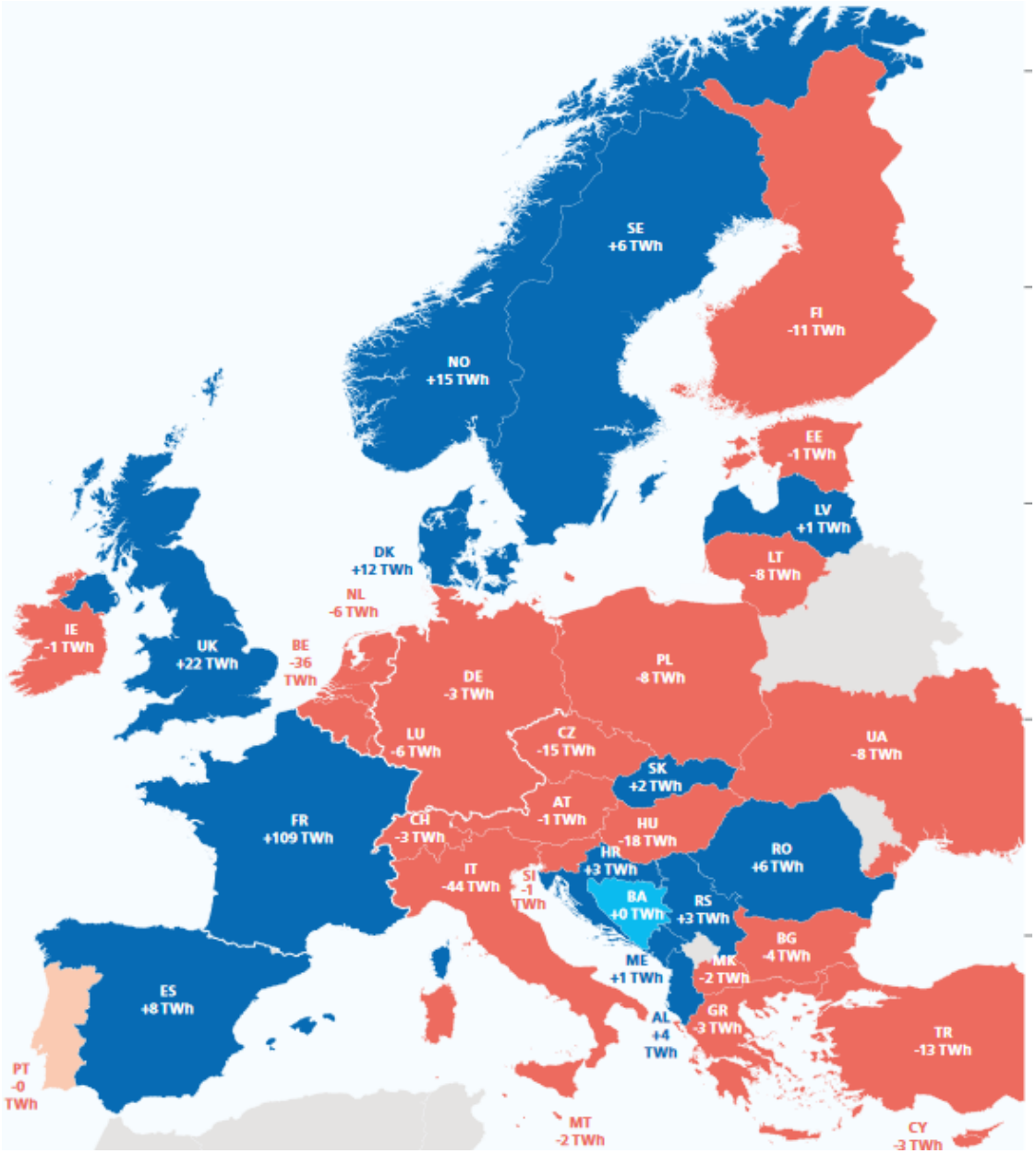
[73] Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ), 2021, str. 4 – 5
[74] Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ), 2021, str. 12
[75] Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ), 2021, str. 12 – 17

Taxonomie EU je ekonomický nástroj vytvořený Evropskou komisí, který umožňuje klasifikovat udržitelnost ekonomických aktivit. Taxonomie porovnává ekonomickou výhodnost zdrojů energie, kde hlavní roli hraje dostupnost financování, která je ovlivněná životním prostředím. Jaderná energie byla v červenci roku 2022 přidána do taxonomie udržitelných financí. Toto zařazení může přilákat investory do jaderných technologií a zatraktivnit toto odvětví, včetně potřebných budoucích investic do SMR.[76]

Kvůli postupnému odstavování uhelných zdrojů s plánovaným odklonem od uhlí k roku 2030-2038, odstavováním stávajících jaderných bloků v Dukovanech v druhé polovině čtyřicátých let a změně strategie a politiky v oblasti energetiky bude úroveň instalovaného elektrického výkonu pozvolna klesat dle analýz od ČEPSu. Pří výstavbě Dukovan byly původní plány provozu elektrárny odhadované na třicet let. Nyní s možností prodloužení chodu elektrárny do roku 2045 až 2047 na mez 60 let. Roční netto výroba elektřiny ze všech bloků se odhaduje na 14 až 15 TWh/rok. V současné době jsou v Dukovanech provozovány čtyři elektrárenské bloky o instalovaném výkonu kolem 477 MW. V porovnání s dvěma bloky využívající elektrárna Temelín je tento výkon 1069 MW.[76]

Dle analýz se očekává, že importní saldo ČR v roce 2025 přesáhne hranici 10 % spotřeby elektřiny ČR. Kvůli rychlému odklonu od uhlí a nárustu spotřeby vlivem elektrifikace ve všech odvětvích ekonomiky, se očekává nárust importu elektřiny v roce 2025. S ohledem na ohrožení zdrojové přiměřenosti je investice do NJZ nezbytná a po roce 2040 bude třeba znovu diskutovat o dalším prodloužení doby životnosti stávajících jaderných bloků nad horizontem 2045 a o výstavbě nových jaderných bloků.[77]

[76] Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ), 2021, str. 12 - 17
[77] Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ), 2021, str. 31 a 64 - 65



Obrázek 29 - Saldo importu a exportu evropských zemí pro Konzervativní scénář 2030 [78]

Konzervativní scénář uvažovaný v hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR bere v úvahu útlum uhelných zdrojů a jejich úplné vyřazení po roce 2038. Hodnota spolehlivostního ukazatele Loss of Load Expectation (LOLE) se uvažuje ve výši 22 hodin za rok. Tato hodnota udává počet hodin v daném období, kdy je hodnota zatížení větší než předpokládaná výroba včetně importu. Soustava by v roce 2040 byla za těchto předpokladů zdrojově nepřiměřená, neboť nebude splněn požadavek LOLE do 15 hodin/rok. [79]

[78] Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ), 2021, str. 45
[79] Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ), 2021, str. 40

5.2. Současné projekty SMR

Energetická společnost ČEZ, a.s. plánuje výstavbu SMR v ČR. Provoz prvního modulárního reaktoru by měl nastat kolem roku 2032 v Elektrárně Temelíně. Dle vlastních predikcí a analýz ČEZu, a.s. ohledně spotřeby elektrické energie do roku 2050 očekávají chybějící elektrický výkon kolem 3 GW_e. Tuto poptávku po elektrické energii plánuje SkupinaČEZ pokrýt technologiemi SMR. V úvaze je výstavba celkem deseti malých modulárních reaktorů kolem výkonu 300 MW_e. Tento počet SMR v ČR není přímo predikovaný a bude silně ovlivněn technickými parametry dle lokality a celkovou poptávkou po této technologii průmyslem a regiony ČR. Současně Skupina ČEZ věří, že malé modulární reaktory budou vhodným doplňkem k velkým jaderným blokům.[80]

Dále Česká republika vyhrála několik projektů v rámci Euratom. Například ECC-SMART koordinovaný výzkumným institutem Centrum výzkumu Řež, s.r.o. Projekt na výzkum SMR na bázi superkritické vody podporující i koordinaci aktivit ze zemí mimo EU. Dále výzkum APAL koordinovaný Centrem výzkumu Řež, s.r.o.[81]

Nicméně v České republice již existují stávající projekty podporující SMR. Jedním z těchto projektů je TEPLATOR vyvíjen univerzitou ČVUT, SMR DAVID nebo projekt Energy Well vyvíjený společností Centrum výzkumu Řež, s.r.o.[81]

5.2.1. DAVID SMR

Skupina WITKOWITZ, a.s. jsou členem Czech Power Industry Alliance (CPIA) a spolupracující s Czechatom a CVUT FJFI na projektu DAVID SMR.[82] Současně tým specialistů zabývající se tímto projektem, již podobné projekty tvořil, a to při stavbě dvou současných jaderných elektráren v České republice. Projekt DAVID SMR je tlakovodní reaktor (PWR) s instalovaným výkonem 175 MW_t a 50 MW_e. Tento typ reaktoru je vhodný pro dálkové vytápění. V roce 2021 skupinka návrhářů představila první verzi konstrukčního řešení. Komerční provoz projektu SMR DAVID je odhadován až po roce 2027. [82]

Typ zvoleného reaktoru byl určen podle používané technologie pro jaderné reaktory ve světě. Důvodem zvolení tohoto typu bylo hlavně kvůli bezpečnosti. Navíc jejich

[80] Seminář dne 13.12.2022, Petr Závodský předseda představenstva ČEZ, ČVUT FJFI
[81] Jaderná energie, 2020, str. 67
[82] Ve Vítkovicích vzniká projekt malé jaderné elektrárny, 2021

navrhovaný vzor reaktoru bude ještě vylepšen, co se týká bezpečnostních systémů. Budoucnost projektu silně závisí na možné budoucí spolupráci se Skupinou ČEZ. Skupina WITKOWITZ, a.s. spolupracuje s Ukrajinou a na první prototyp se uvažuje realizovat v Černobylské zóně. [83]

5.2.2. CR-100

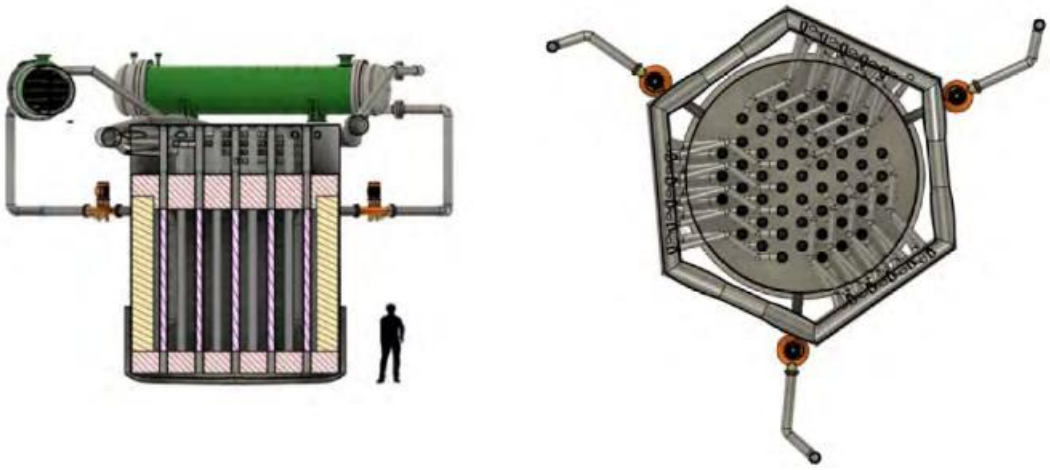
Skupina ÚJV vyvíjí projekt CR-100, což je lehkovodní typ reaktoru s tepelným výkonem 100 MW_t. Tento projekt je zaměřen na kogeneraci tepla a elektřiny. Projekt vychází z technologie VVER-1000 a je navrhován jako kogenerační náhrada za fosilní zdroje využitelná v centrálním zásobování teplem. Díky malým komponentům obsažených v projektu lze dosáhnout lepší transportovatelnosti. Tyto komponenty by měly dodávat tuzemští výrobci včetně tlakové nádoby.[84]

[83] Energetika, 2021, str. 389-391
[84] Attache trip dne 14.10.2022, Jiří Duspiva, ÚJV Řež, a.s.

5.2.3. TEPLATOR

Projekt TEPLATOR vzniká ve spolupráci s Českým institutem informatiky, robotiky a kybernetiky, který je součástí Českého vysokého učení technického v Praze (ČVUT). Jedná se o koncept procesní výroby energie dálkového vytápění pro města se 100 000 obyvateli. Díky bezemisnímu zdroji, který TEPLATOR využívá by mohlo dojít k nahrazení tepláren na fosilní paliva. Zařízení TEPLATOR využívá ne zcela vyhořelé palivo z lehkovodních reaktorů LW-PWR. Proto by toto zařízení bylo vhodnou konstrukcí pro země s vysokým obsahem vyhořelého jaderného paliva z LWR v meziskladových kontejnerech nebo v úložných bazénech.[85]

Ve světě existuje více variací TEPLATORu. Ty jsou navrženy, podle již použitého palivového článku ozářeného určitým typem reaktoru (např. PWR). TEPLATOR pracuje s výkonem kolem 50 MW(t) s palivem VVER-440. Vypočítané investiční náklady na zařízení TEPLATOR činí kolem 30 milionů EUR. Konečná cena vyrobeného tepla je 4 EUR/GJ vztažena k cenové úrovni k roku 2019.[86]



Obrázek 30 - Bokorys (vlevo) a půdorys (vpravo) TEPLATORu [85]

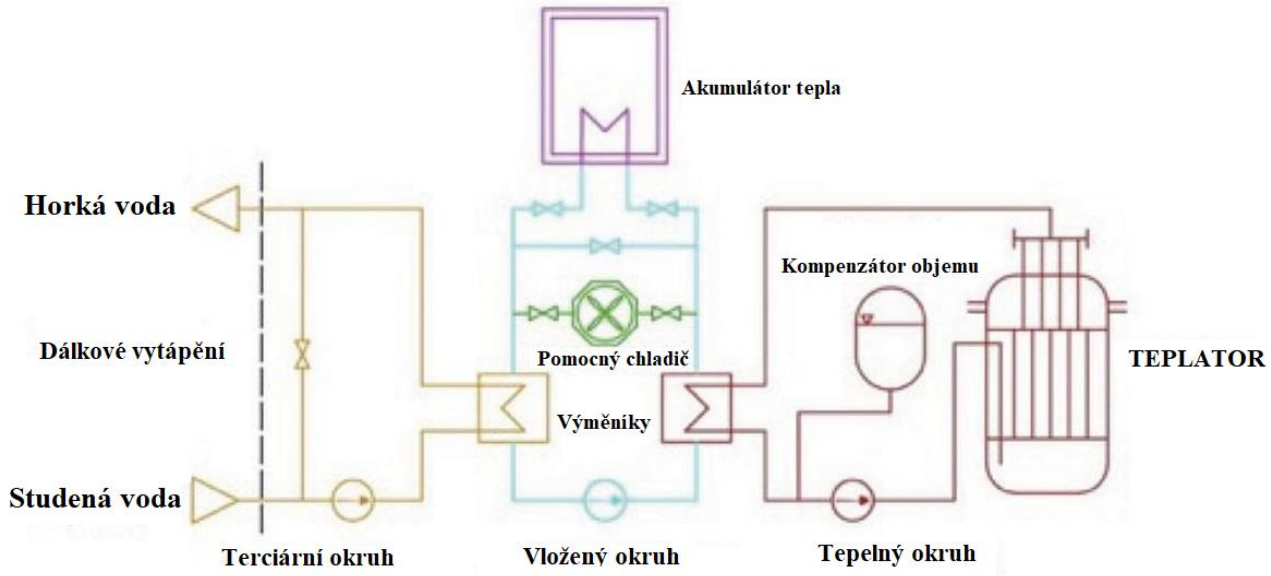
[85] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2020, str. 33
[86] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2020, str. 34

5.2.3.1. Konstrukce

Celý systém kontejnmentu TEPLATORu se skládá ze železobetonové konstrukce. Samotné zařízení TEPLATOR se sestává ze tří hlavních okruhů. V primárním okruhu se nacházejí výměníky tepla, čerpadla a současně aktivní zóna s vyhořelým palivem použitým v reaktoru LWR. Samotné jádro je vyrobeno ze zirkoniových kanálů, do kterého je vloženo vyhořelé palivo. Prostory mezi kanálky je vyplněn těžkou vodou sloužící jako moderátor systému. Primární stranou výměníku tepla prochází použité chladivo a vrací se zpět přes čerpadlo do palivových kanálků.[87]

Sekundární okruh předává poté teplo z primárního okruhu do obvodu dálkového vytápění za pomoci vody či jiné kapaliny. Tento okruh je nazýván jako meziokruh a současně obsahuje akumulační nádrže pro akumulaci přebytečné energie pro případnou možnost snížení poptávkových špiček. Dále dokáží absorbovat rozpadové teplo z aktivní zóny, a tak akumulovat zbytkové teplo. [87]

Terciární okruh distribuuje teplo k zákazníkovi a mezi vloženým a terciárním okruhem jsou vloženy tepelné výměníky, jak je zobrazeno na Obrázek 31. [87]



Obrázek 31 – Schéma oběhového cyklu TEPLATORu [88]

[87] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2020, str. 34
[88] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2020, str. 36

TEPLATOR je obohacen o pasivní a aktivní bezpečností prvky, které splňují vlastnosti základní konstrukce reaktoru LWR. Toto rozšíření poté zlepšuje celkovou bezpečnost. Díky sekundárnímu okruhu je dodáváno do TEPLATORu dostatek chladící kapaliny, které ochlazuje jádro v případě nouzového stavu nebo nehody. Všechna reaktivní zařízení jsou uložena v nízkoteplotním a nízkotlakém moderátoru. Dále obsahuje dva vypínací systémy. Jsou to rychle-vypínací prostředky nezávislé na sobě. Systém odvodu rozpadového tepla je integrován jako systém akumulace energie propojený se sekundárním okruhem. Jakmile dojde k odstavení nebo výpadku, je teplo v TEPLATORU přirozené cirkulováno uvnitř chladící smyčky. Teplo, které cirkuluje, se poté odvádí výměníkem umístěným v primárním okruhu.[89]

Typ projektu	**TEPLATOR**
Výzkumná společnost	Západočeská univerzita v Plzni & České vysoké učení technické (ČVUT) - Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky
Typ reaktoru	HW-PWR
Průměr reaktorové nádoby	3,7 m
Výška reaktorové nádoby	6,5 m
Hmotnost reaktoru	Není známá
Chlazení	Těžká voda D_2O
Tepelný výkon	50 MW
Elektrický výkon	-
Způsob cirkulace	Nucený oběh
Obohacení paliva	<1,2 %
Tlak v soustavě	(okolní tlak) MPa
Vstupní/výstupní teploty jádra	45/98 °C
Typ paliva	Vyhořelé jaderné palivo z vodo-vodního energetického reaktoru VVER-440
Palivový cyklus	10 měsíců
Počet palivových článků	55
Životnost	60 let

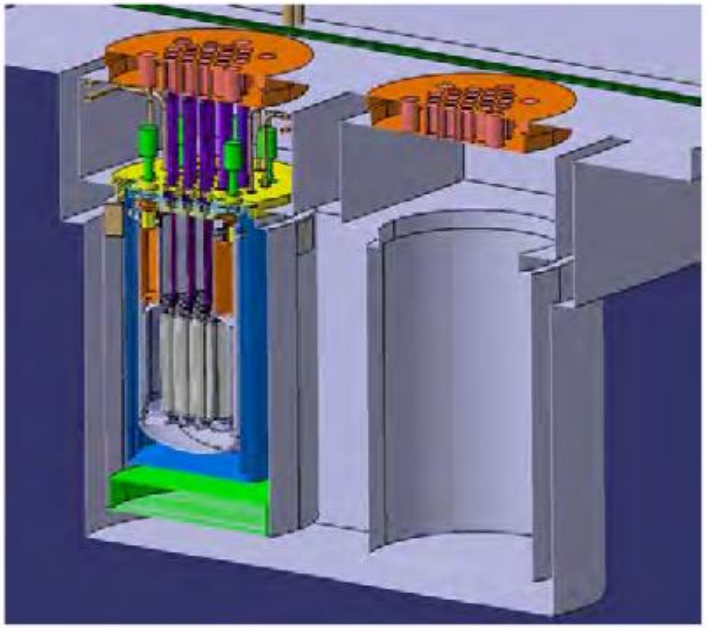
Tabulka 3 - Parametry projektu TEPLATOR [90]

[89] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2020, str. 35
[90] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2020, str. 33

5.2.4. Energy Well

Jedná se o vysokoteplotní reaktor s tepelným výkonem kolem 20 MW_t, chlazený fluoridovou solí zvanou FLiBe (fluorid lithno-berylnatý se složením Li_2BeF_4). Projekt je garantován Ministerstvem průmyslu a obchodu. Hlavním úkolem projektu je vyvinout pokročilý a přirozeně bezpečný nízkovýkonový vysokoteplotní reaktor. Současně cílem projektu je poskytnout čistý a stabilní zdroj energie. Zařízení je určeno převážně pro ostrovní režim nebo odlehlé oblasti. Dále se zaměřuje na provoz ve vzdálených či obydlených oblastech. Energy Well vyrábí jak elektrickou, tak tepelnou energii. Současně se projekt zabývá i akumulací energie z tepla, energie či vodíku.[91]

V roce 2020 v ČR dostal Projekt Energy Well patent od Úřadu průmyslového vlastnictví (číslo 309095) a mohl zahájit své experimenty na nejaderné jednotce. Tato jednotka má za hlavní cíl ověřovat materiálovou kompatibilitu a návrh reaktoru. Tato jednotka se zprovozní do deseti let. Poté i zároveň celý projekt přestoupí do simulátorového provozu.[92]



Obrázek 32 - Projekt Energy Well [91]

[91] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2020, str. 285
[92] Jaderná energie, 2020, str. 66

5.2.4.1. Konstrukce

Energy Well je bazénový typ reaktoru s roztavenou solí FLiBe jako primární chladící kapalina. Součástí elektrárny jsou tři chladící okruhy. Jako kapalina pro přenos tepla se používá kapalná fluoridová sůl v primárním i sekundárním okruhu. V terciálním okruhu je použito médium s CO_2 (Oxid uhličitý v superkritickém stavu).[93]

Primární chladící okruh se skládá z aktivní zóny reaktoru s ovládacími tyčemi, nádobou reaktoru, grafitovým reflektorem a dalšími komponenty. Roztavená sůl proudí vzhůru aktivní zónou a vstupuje do primárního výměníku tepla. Celý tento systém primárního okruhu je umístěn v transportním kontejneru, který lze využít k přepravě s čerstvým či vyhořelým palivem. Řízení výkonu je prováděno regulačními tyčemi. [93]

Sekundární okruh odděluje primární a terciární okruh a vytváří tlakovou bariéru v případě netěsností ve výměníku. V terciálním okruhu poté dochází k přeměně tepelné energie na energii elektrickou. Díky využité pracovní látce s CO_2 je možné snížit požadavky na kompresor a není nutné mezichlazení. Nicméně využitím s CO_2 dochází ke změnám vlastností média, což může výrazně komplikovat konstrukci komponentu.[93]

[93] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2020, str. 286

V případě nouzového stavu dojde k pádu všech regulačních tyčí do aktivní zóny a k zapnutí sekundárního nezávislého obvodu. Odvod zbytkového tepla poté prochází přes stěnu nádoby reaktoru, stěnami kontejneru a poté do okolí.[94]

Ke konci palivového cyklu dochází k ponechání paliva v jaderném okruhu, což zvyšuje pasivní bezpečnost. Poté je rektor přesunut zpět k výrobci. Je navržen tak, aby byl přepravitelný s novým, či vyhořelým palivem. Odhadovaný cyklus paliva je stanoven na 7 let u projektu Energy Well.[95]

Typ projektu	**Energy Well**
Výzkumná společnost	Centrum výzkumu Řež, s.r.o.
Typ reaktoru	Fluoridový vysoko-teplotní reaktor
Průměr reaktorové nádoby	3 m
Výška reaktorové nádoby	6 m
Váha reaktoru	<100 tun
Chlazení	Roztavená sůl FliBe
Tepelný výkon	20 MW
Elektrický výkon	8 MW
Způsob cirkulace	Mechanické pumpy
Obohacení paliva	15 %
Tlak v soustavě	0,1 MPa
Vstupní/výstupní teploty jádra	650/700 °C
Typ paliva	TRISCO
Palivový cyklus	7 let
Počet palivových článků	19
Životnost	nedefinováno

Tabulka 4 - Parametry projektu Energy Well [96]

[94] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2020, str. 287
[95] Jaderná energie, 2020, str. 66
[96] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2020, str. 285

6. Strategické přístupy a možnosti malých modulárních reaktorů v Elektrárně Temelín

Značná část výše uvedených přístupů závisí na analýzách a výsledcích externích studií, zpracovaných od výzkumných institucí (ÚJV Řež, a.s.), energetických společností (Skupina ČEZ) anebo státních orgánů (ČEPS, a.s). Možné nasazení malých modulárních reaktorů (SMR) v ČR záleží na výsledcích jednání se stakeholdery a na vyřešení otázky nalezení vhodného investora, kterým může být soukromá společnost, ale i státní subjekt.

V následujících podkapitolách je souhrn z jednání se Skupinou ČEZ a z různých seminářů a workshopů k uplatitelnosti SMR v ČR a určení hlavních kritérií pro výběr technologie SMR a jejich implementaci do zázemí ČR a Elektrárny Temelín (ETE).

6.1. Jednání se Skupinou ČEZ ohledně malých modulárních reaktorů

Společnost ČEZ vidí v SMR vhodný doplněk do elektrizační sítě, neboť se zvyšujícím se podílem obnovitelných zdrojů (OZE) vzniká nejistota dodávky elektrické energie. SMR jsou více flexibilní než velké jaderné bloky, které jsou určeny hlavně k základnímu zatížení a stabilní výrobě elektrické energie. ČEZ by rád instaloval první SMR tlakovodního typu v lokalitě Temelín. V budoucnu je klíčové, aby v síti byl dostatečný počet točivých zdrojů, a aby síť byla dostatečně stabilní, neboť kvůli OZE vzniká nestabilita sítě. V časovém horizontu 2050 se očekává úplná dekarbonizace ČR. Proto jsou SMR klíčové pro udržení energetické stability, jako nízkouhlíková náhrada za uhelné zdroje. [97]

ČEZ aktivně komunikuje s vytipovanými zahraničními společnostmi, které připravují technologie SMR. Připravuje studii proveditelnosti pro výstavbu SMR v okolí Temelína. Realizace SMR by neměla ovlivňovat výstavbu velkých bloků, neboť velké bloky mají přednost před výstavbou SMR. Současně ČEZ aktivně komunikuje se státem, kdy byla v rámci MPO vytvořena pracovní skupina pro uplatnitelnost SMR v ČR. V této skupině jsou kromě Skupiny ČEZ a MPO také SÚJB, MŽP, MMR, ČEPS a ÚJV Řež. V této pracovní skupině se diskutuje problematika převážně spojená s SMR v České republice, například otázky přizpůsobení legislativy k technologii SMR, vyhledávání potenciálních lokalit nebo financování SMR.[97]

V současné době ČEZ vytvořil předběžnou studii proveditelnosti, kde hlavním cílem bylo zmapovat technologie v oblasti SMR a vytipovat potenciální lokality. ČEZ analyzoval jednotlivé technologie, jejich připravenost a možné využití v ČR. Dále ČEZ provedl průzkum potenciálních lokalit, které jsou v rámci ČR použitelné pro výstavbu SMR. Na tyto lokality se v rámci bližších studií a analýz aplikovala vylučující kritéria z hlediska jevů, které by mohly představovat potenciální nebezpečí pro umístění SMR, jako například poddolovaná oblast, záplavová oblast, seismicita atd. ČEZ také vytvořil rozsáhlý dotazník, obsahující komerční i technické dotazy na vytipované dodavatele technologií. Na základě výstupu z této studie proveditelnosti se zpracovala Kvalifikační studie.[97]

[97] Jednání se Skupinou ČEZ dne 15.3.2022, Viktor Černý místopředseda představenstva

6.1.1. Silné stránky malých modulárních reaktorů dle Skupiny ČEZ

Pro skupinu ČEZ je jedním z hlavních pozitiv snížení prvotní investice a eliminace rizik spojených s výstavbou velkých jaderných bloků. Důležité pro Skupinu ČEZ je zkrácení času výstavby, snížení nároků na množství kvalifikovaného personálu a možnosti postupného vybudování SMR. Dalším kladem SMR je možnost výroby klíčových komponentů ve fabrikách a tím zmenšené nároky na logistiku. [98]

Jako převažující pozitivum SMR spatřuje Skupina ČEZ ve vysoké míře pasivní bezpečnosti, kdy veškeré uvažované technologie jsou převážně s pasivními bezpečnostními prvky. U SMR nevzniká potřeba zvýšených nároků na bezpečnostní chlazení reaktoru a podpůrné elektrické zdroje energie. Dalším kladem jaderných zdrojů obecně je, že jsou málo citlivé na cenu paliva, neboť mají vysoký podíl fixních nákladů a malý podíl variabilních nákladů. To znamená, že cena je prediktovatelná a málo citlivá na cenu paliva.[98]

6.1.2. Slabé stránky malých modulárních reaktorů dle Skupiny ČEZ

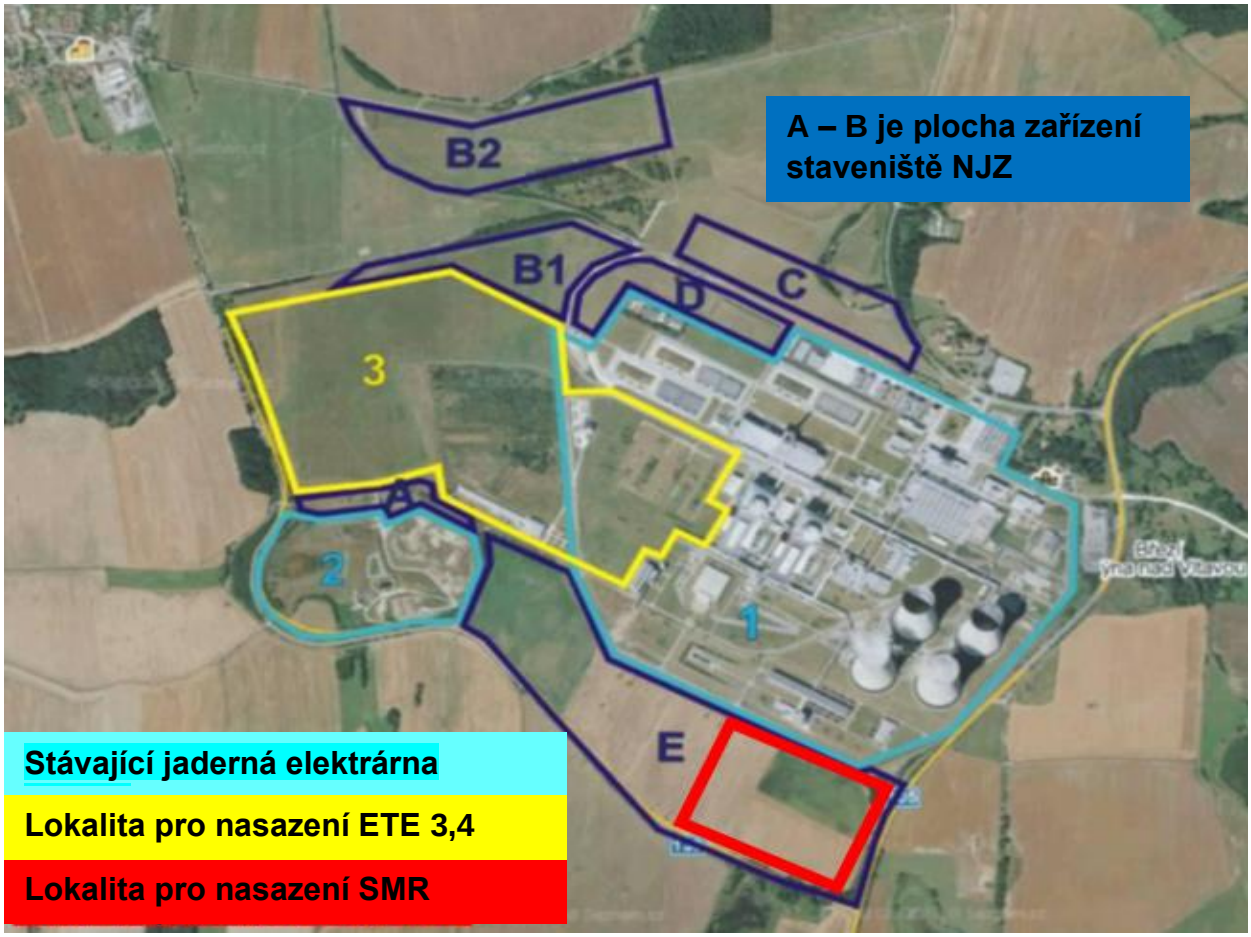
Mezi slabé stránky technologie SMR lze zařadit možný odpor ze strany společnosti. Stále se jedná o jaderné zařízení, na které může společnost pohlížet s obavami. Dle průzkumů, by dokonce velká část populace, nechtěla mít jaderný zdroj blízko své rezidence. [98]

Další slabou stránkou je nedostatečná připravenost SMR pro prostředí v ČR, potažmo ve světě. Zároveň se jedná o novou technologii v tomto jaderném oboru, která není prozatím dostatečně otestována a chybí zkušenosti s provozem SMR v reálném světě. Současně není známé ekonomické hledisko této inovativní technologie, a tedy není připravená ke komerčnímu nabízení. ČEZ očekává, že u SMR bude vyšší jednotková investiční cena, tedy na instalovanou jednu kW se zaplatí víc oproti velkým blokům.[98]

[98] Jednání se Skupinou ČEZ dne 15.3.2022, Viktor Černý místopředseda představenstva

6.1.3. Umístění malých modulárních reaktorů v Elektrárně Temelín a další potenciální lokality

Níže na Obrázek 33 lze vidět plánované umístění SMR v lokalitě Temelín. Tmavě modré označení A - B jsou rezervované plochy pro staveniště nového jaderného zdroje (NJZ). Během výstavby NJZ se využijí tyto plochy například na výstavbu skladů, betonárek, jeřábů atd. Všechny tyto pozemky jsou v majetku Elektrárny Temelín. [99]



Obrázek 33 – Rozložení nových jaderných bloků a SMR v lokalitě Temelín [99]

Kromě lokality Temelín, mají z pohledu geologie, záplavové oblasti a ekonomického hlediska největší potenciál lokality ČEZu Tušimice a Dětmarovice, které se budou do budoucna blíže analyzovat. Kromě výše zmíněných dvou lokalit jsou také uvažovány oblasti Prunéřov, Ledvice a Poříčí. Nicméně lze očekávat i jiné lokality, které nespadají pod Skupinu ČEZ.[99]

[99] Seminář na ČVUT FJFI dne 13.12.2022, Skupina ČEZ, Petr Závodský předseda představenstva

Například firma Synthos Kralupy, a.s. má lokalitu Kralupy nad Vltavou, kde by ráda postavila SMR na produkci elektrické a tepelné energie. Nicméně, tato lokalita se nachází v záplavové oblasti, a je proto nevhodná. Podobně jsou na tom Třinecké železárny, a.s., které chtějí mít vlastní zdroj elektřiny, neboť dle jejich analýz očekávají vysokou spotřebu elektrické energie.[100]

K možnému využití SMR jsou i tzv. brownfieldy pro výstavbu SMR, což jsou oblasti zastavěných pozemků, které se již nevyužívají k žádné činnosti. Tyto oblasti byly dříve využívané pro průmyslové nebo komerční účely, kdy v důsledku tohoto užívání došlo ke znečistění, anebo kontaminaci půdy.[100]

[100] Seminář na ČVUT FJFI dne 13.12.2022, Skupina ČEZ, Petr Závodský předseda představenstva

6.1.4. Zvažované technologie malých modulárních reaktorů dle Skupiny ČEZ

Projekt	Technologie	Výrobce	Země	Komentář
VOYGR/NuScale Power Modules	PWR	NuScale Power	USA	• 11.9.2020 udělen Standard Design Approval (SDA) od The U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) • 2026 plánováno zahájení výstavby • 2029 plánováno spuštění elektrárny v Idaho National Laboratory (INL)
SMART100	PWR	KHNP	J. Korea	• Design licence v Koreji v 7/2012 a 5/2022 • 2024 plánováno zahájení výstavby v Saúdské Arábii • 2027 plánováno spuštění elektrárny v Saúdské Arábii
SMR-160	PWR	Holtec International	USA	• Plánována design licence v Kanadě 2022 • 2025 plánováno zahájení výstavby • 2029 plánováno spuštění elektrárny v Kanadě
NUWARD™	PWR	EdF	Francie	• 2025 uveden termín ukončení basic designu • 2030 plánováno zahájení výstavby • 2035 plánováno spuštění elektrárny
UK SMR	PWR	Rolls-Royce	UK	• 2023 plánován Design Acceptance Confirmation (DAC), Statement of Design Acceptability (SoDA) • 2027 plánováno zahájení výstavby • Po roce 2030 plánováno spuštění elektrárny
BWRX-300	BWR	GE Hitachi	USA a Japonsko	• 2024 plánováno zahájení výstavby • 2028 plánováno spuštění elektrárny

Tabulka 5 - Technologie SMR, které Skupina ČEZ uvažuje pro implementaci v Elektrárně Temelín [101]

[101] Jednání se Skupinou ČEZ dne 15.3.2022, Viktor Černý místopředseda představenstva

Ve výše uvedené Tabulce 5 se nacházejí uvažované technologie SMR v Elektrárně Temelín a v budoucích lokalitách ČR. Se společnostmi vyvíjejícími designy SMR si Skupina ČEZ aktivně vyměňuje informace a analyzuje vhodnost nasazení konkrétního projektu v ČR. [102]

NuScale Power vyvíjí interesantní řešení jejich projektu SMR umístěného ve velkém bazénu, ve kterém je postaveno maximálně dvanáct modulů o výkonu kolem 77 MW_e. U jednotlivých modulů je možné vyměnit palivo přímo pod vodou, za provozu ostatních reaktorů. NuScale Power má licenci od amerického regulačního úřadu (NRC) a připravuje výstavbu SMR v Idaho National Laboratory (INL) s očekávaným spuštěním v roce 2029. Z pohledu licencování mohou nastat komplikace, při řešení otázky zda považovat všech 12 jednotek za jeden reaktor, anebo každou jednotku brát zvlášť. [102]

SMART100 je korejský design s instalovaným elektrickým výkonem 100 MW_e. Design vyvíjí společnost Korea Hydro & Korea Power Co., Ltd. (KHNP). Má uzavřenou dohodu o spolupráci v rámci Saúdské Arábie a očekává se výstavba první jednotky v roce 2027. [102]

Holtec International vyvíjí americký design SMR-160 s výkonem 160 MW_e. První jednotku SMR plánují uvést do provozu v roce 2029. [102]

Project NUWARD^{TM} obsahuje dvojblok, který má instalovaný elektrický výkon 2x170 MW_e. Na vývoji tohoto projektu se podílí francouzská společnost Électricité de France S.A. (EdF), která je v současné době i potenciálním dodavatelem pro velké jaderné bloky v ČR. Společnost EdF plánuje spustit jejich projekt v roce 2035. Nicméně design je v současné době ve velmi raném stádiu. [102]

Společnost Rolls-Royce je vývojářem projektu s největším elektrickým výkonem. Jedna jednotka má elektrický výkon 470 MW_e, což odpovídá výkonu jednoho velkého jaderného bloku v Dukovanech. Společnost získala na rozvoj svého projektu finanční podporu od britské vlády. V roce 2030 se očekává spuštění jejich pilotní jednotky ve Spojeném království Velké Británie a Severního Irska. [102]

[102] Jednání se Skupinou ČEZ dne 15.3.2022, Viktor Černý místopředseda představenstva

BWRX-300 je varný reaktor vyvíjený společností GE-Hitachi Nuclear Energy. Jedná se o reaktor s instalovaným elektrickým výkonem 300 MW_e. Očekávají, že jejich projekt bude v Kanadě uveden do provozu v roce 2028. Společnost je velmi aktivní v Evropě, zejména v Polsku a Estonsku, kde má podepsaná memoranda o spolupráci. [103]

6.1.4.1. Výhledy pro nasazení technologie malých modulárních reaktorů v České republice

Skupina ČEZ z politických a bezpečnostních důvodů vyřadila čínské společnosti ze seznamu potencionálních dodavatelů SMR. V rámci programu SMR společnosti Elektrárna Temelín II, a.s. se Skupina ČEZ soustřeďuje na lehkovodní reaktory s elektrickým výkonem nad 100 MW_e. V rámci kvalifikační studie se tyto technologie dále posuzují. Jedním z důležitých parametrů pro implementaci SMR v ČR je, aby dodavatelé byli schopni získat licence v ČR.[104]

Skupina ČEZ má vlastní predikce a analýzy spotřeby elektrické energie do roku 2050. V souvislosti s výrobou vodíku a elektrifikací průmyslu očekává, že bude chybět v elektrifikační soustavě kolem 3 000 MW_e elektrického výkonu. Tento deficit by Skupina ČEZ chtěla pokrýt prostřednictvím technologií SMR. Zahájení komerčního použití pilotního SMR v Temelíně se očekává v roce 2032.[104]

V plánu je postavit cca 10 malých modulárních reaktorů s předpokládaným elektrickým výkonem kolem 300 MW_e. Skupina ČEZ nepredikuje přímo tuto výši četnosti SMR a výkon přesně 300 MW_e. Záleží na dopočtu potřebného elektrického výkonu, tedy pokud bude vybrán SMR s větším výkonem, pak se postaví menší počet SMR v ČR.[104]

V roce 2023 by Skupina ČEZ ráda vytvořila tzv. shortlist, tedy užší seznam společností z momentálního seznamu uvažovaných technologií SMR uvedený v Tabulka 5. Aktuálně je zvažován výběr jednoho dodavatele technologie SMR pro spolupráci v blízké budoucnosti. Jelikož je pro různé lokality možné použít i jiné technologie SMR, tak Skupina ČEZ uvažuje, že do budoucna naváže kontrakt i s dalšími společnostmi vyvíjejícími SMR. [104]

Skupina ČEZ vidí přínos SMR v oblasti teplárenství, výrobě elektřiny a příležitost pro český průmysl. S ohledem na výstavbu, kolem deseti SMR a čtyř velkých jaderných

[103] Jednání se Skupinou ČEZ dne 15.3.2022, Viktor Černý místopředseda představenstva
[104] Seminář na ČVUT FJFI dne 13.12.2022, Skupina ČEZ, Petr Závodský předseda představenstva

bloků, se očekává vysoká náročnost na personální požadavky. V jaderném sektoru se do budoucna odhaduje výrazný nedostatek kvalifikovaného personálu, a proto se v rámci Ministerstva průmyslu a obchodu a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy vytvořila tzv. Pracovní skupina pro zajištění lidských zdrojů pro rozvoj jaderné energetiky. Kromě velkých jaderných bloků a SMR, bude potřeba personál i ve Státním úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) a v dalších českých firmách zabývajících se jaderným průmyslem nebo obecně v dalších institucích.[105]

V dlouhodobém časovém horizontu se chce Skupina ČEZ více zaměřit na vysokoteplotní plynem chlazené reaktory (HTGR). Tato technologie začíná být ve světovém měřítku dobře známá, především v Japonsku nebo Čínské lidové republice, kde se spouštějí pilotní projekty. Tyto reaktory mají velký potenciál v chemickém průmyslu, a to zejména pro výrobu vodíku, případně tepla a elektřiny. V porovnání s lehkovodními reaktory mají HTGR výhodu v jejich chlazení prostřednictvím hélia. Díky héliu jsou reaktory poté schopny dosáhnout až na 1 000 °C.[106] V současné době připadají v úvahu dvě možnosti přechodu na vodíkovou technologii. První možností je výroba vodíku elektrolýzou vody z přebytku elektrické energie v síti, za použití obnovitelných zdrojů. Druhou variantou je výroba vodíku za použití jaderné technologie. Vodík lze dlouhodobě skladovat nebo kombinovat se zemním plynem. V zimním období ho lze použít na výrobu elektrické energie, anebo jej využít v dopravě či průmyslu.[107]

[105] Seminář na ČVUT FJFI dne 13.12.2022, Skupina ČEZ, Petr Závodský předseda představenstva
[106] Jednání se Skupinou ČEZ dne 15.3.2022, Viktor Černý místopředseda představenstva
[107] Konference „Nuclear in the production of Hydrogen“ dne 11.10.2022, ČVUT FJFI

6.1.4.2. Metodika výběru technologie malých modulárních reaktorů dle Skupiny ČEZ

K metodice výběru technologie SMR se využívá komplexní model, kdy jeho sestavení, odlaďování a propracování lze očekávat i v řádu několika let. Pro typickou analýzu výběru jaderného zařízení se využívá tzv. multikriteriální hodnocení. Nejprve se stanoví hodnotící kritéria, ke kterým se určí priority jednotlivých kritérií. Následně se zkoumají a generují možná rizika a ty se převádějí do finálního finančního ohodnocení. Veškeré hodnocení se přepočítávají z hlediska rizik na předpokládané hypotetické náklady za vyrobenou MWh.[108]

Do základního ekonomického modelu tak vstupují celkové investiční a provozní náklady, doba výstavby a další faktory. V další fázi se identifikují rizika, která jsou spojená s daným projektem. Tyto rizika se následně oceňují a započítávají do výsledné ceny energie. Výsledkem je tedy imaginární přepočtená cena energie, do které spadají bezpečnostní rizika, rizika prodloužení výstavby, rizika nekvality, zvýšení provozních nákladů atd. [108]

[108] Jednání se Skupinou ČEZ dne 15.3.2022, Viktor Černý místopředseda představenstva

6.2. Licenční a povolovací procesy

K realizaci SMR je nezbytné nalézt vhodnou oblast pro jejich umístění, přičemž existují dvě varianty výběru konkrétní lokality. První možností je iniciativa státu, která podporuje jadernou energetiku a definuje Státní energetickou koncepci (SEK). Druhá možnost je iniciativa soukromého investora, který chce umístit a provozovat v daném území jaderné zařízení (JZ). [109]

Ministerstvo pro místní rozvoj koordinuje pro celé území ČR tvorbu a aktualizaci zásad územního rozvoje (ZÚR), a to v rámci politiky územního rozvoje (PÚR), která podléhá schválení vládou ČR. ZÚR udávají základní požadavky na účelné a hospodárné uspořádání území kraje, vymezují plochy nebo koridory a stanoví požadavky na jejich využití. ZÚR pořizuje kraj a schvaluje ji ministerstvo. Nejdůležitějším dokumentem je územní plán (ÚP), který udává prostorové a funkční uspořádání území obce a způsob jejího využití. Tento plán pořizuje obecní zastupitelstvo a vydává jej pro území celé obce. Musí být v souladu se ZÚR a s PÚR. Regulační plán (RP) stanoví podrobné podmínky pro využití pozemků, umístění a prostorové uspořádání staveb, ochranu hodnot a charakteru území. Regulační plán zpracovává zastupitelstvo obce.[109]

Soukromý investor, který chce vystavět a provozovat v daném území JZ, musí zajisti, aby umístění JZ bylo v souladu se Státní energetickou koncepcí, PRÚ a ZÚR. Pokud ve stávajícím ÚP již existuje nějaký (jaderný, či nejaderný) zdroj, měl by investor předložit zastupitelstvu návrh, že chce zřídit jaderný zdroj a měl by předložit podklady na úpravu ÚP pro JZ. Pro úpravu ÚP je potřeba zpracovat studii, která musí být v souladu s RP a s vyhodnocením vlivů na udržitelný rozvoj území a vlivů na životní prostředí (SEA) nebo (EIA) dle zákona č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů, ve znění pozdějších předpisů.[109]

Při plánování umístění JZ je potřeba brát v potaz tři vzájemně provázané povolovací procesy. Prvním povolovacím procesem je *Hodnocení vlivu na životní prostředí (EIA)* dle zákona č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů, ve znění pozdějších předpisů. EIA udává závazné stanovisko, které je třeba získat v řízení dle zákona č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu, ve znění pozdějších předpisů. Druhým povolovacím

[109] Seminář k licenčním a povolovacím požadavkům pro potenciální investory SMR, 22. listopadu 2022 v Řeži, Milan Krivda, Skupina ÚJV

procesem je *Zajištění jaderné bezpečnosti, technické bezpečnosti a fyzické ochrany* dle zákona č. 263/2016 Sb. Atomový zákon (AZ), ve znění pozdějších předpisů. Ten definuje povolení pro realizaci a provoz jaderného zařízení, což je umístění, výstavba a likvidace JZ. Dále definuje nezbytná povolení potřebná k činnosti související s realizací a provozem JZ. Například expoziční situace, nakládání s radioaktivním odpadem (RAO), přeprava radioaktivních a štěpných látek a nešíření jaderných zbraní. Dokumentace, která je potřebná k jednotlivým krokům, je definována v přílohách AZ. Třetí povolovací proces zajišťuje *ochranu veřejných zájmů* stanovených zákonem č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu, v platném znění. Tento zákon definuje povolení realizace a užívání stavby. Povolovací procesy a jejich vzájemné vazby jsou v Příloze 1.[110]

6.2.1. Licenční a povolovací procesy malých modulárních reaktorů dle Skupiny ČEZ

Pro implementaci SMR je nezbytné nejprve mít připravenou technologii projektu, která je ve fázi komercionalizace a ve fázi basic designu. Zároveň je vhodné vybrat technologii, která prošla licenčním řízením a je licencovatelná i v ostatních zemích. Další kritickou částí pro implementaci SMR v ČR je prokázání vhodnosti lokality. Tento proces výběru může trvat řádově 3 – 5 let podle typu lokality a potřebných analýz. Jako další možnou podmínkou pro úspěšnou implementaci SMR v ČR je zajištění podpory státu, financování a návratnosti investice.[111]

Do budoucna se očekává, že podíl elektřiny na spotřebě energií poroste, neboť bude probíhat proces dekarbonizace a proces konverze fosilních paliv na jiné technologie. Dnes se celková spotřeba elektrické energie očekává kolem 61 TWh/rok. V roce 2050 se předpokládá nárůst spotřeby elektrické energie až na 90 - 110 TWh/rok. Tento nárůst je dán rostoucí spotřebou elektrické energie na základě rostoucího bohatství společnosti a očekávané konverze automobilového průmyslu na elektromobily a konverze ocelářského průmyslu na technologie šetrnější ke klimatu. OZE v budoucnu nepokryje potřebnou poptávku po elektrické energii v roce 2050, kdy se spotřeba

[110] Seminář k licenčním a povolovacím požadavkům pro potenciální investory SMR, 22. listopadu 2022 v Řeži, Jakub Vyvadil, Skupina ÚJV
[111] Seminář k licenčním a povolovacím požadavkům pro potenciální investory SMR, 22. listopadu 2022 v Řeži, Viktor Černý, Skupina ČEZ

elektřiny odhaduje kolem 35 - 55 TWh/rok. Pro uspokojení poptávky po elektrické energii se jeví jako nejvhodnější zdroj jaderná energie. [112]

Příprava jaderných projektů je obecně komplexní záležitostí. Nejprve se vytvoří předběžná studie proveditelnosti. Vezmou se lokality z hlediska dostatečnosti, co se týče velikosti lokality a její infrastruktury. V kvalifikační studii se posoudí vlastnosti lokality s ohledem na požadavky umístění JZ. Tento průzkum proběhl v roce 2022 a na jeho základě bylo vybráno 5 lokalit pro detailnější průzkum. Z těchto pěti lokalit Skupina ČEZ vybírá dvě relativně vhodné lokality. V letošním roce se ČEZ zaměřuje převážně na hlavní rizika a nejistoty, které byly identifikovány ve vybraných lokalitách a odpovídají požadavkům dle vyhlášky 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení, v platném znění. [112]

Procesy povolování probíhají dle zákona č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu a AZ, dle kterých ke stanovisko EIA potřebné pro sběr veškerých informací. Výstavby JZ povede k mezistátní EIA, kde záleží na vzájemné komunikaci přihlášených států do EIA. Tato skutečnost může komplikovat proces a prodlužovat získání povolení, neboť se dokumentace musí přeložit jednotlivým státům a bude potřeba se vypořádat s jejich připomínkami. Projekt výstavby ETE měl například 23 000 připomínek k dokumentaci EIA. U povolení k umístění JZ je důležité prokázat vhodnost lokality. Proces povolení k umístění je finančně a časově náročný a může trvat až 12 měsíců. K získání územního rozhodnutí musí předcházet rozhodnutí o umístění jaderného zařízení od SÚJB dle AT. Potřebná doba pro získání tohoto rozhodnutí je kolem 3 měsíců. Než proběhne podepsání smluv s dodavatelem a zahájení stavebních činností na JZ, je důležité, aby proběhla kvantifikace harmonogramu výstavby dle článku 41 Smlouvy o založení evropského společenství pro atomovou energii v originálním znění Treaty establishing the European Atomic Energy Community (Euratom treaty). Obtížné je získat povolení k výstavbě, kdy je potřeba zpracovat dokumentaci, která je rozsáhlá, detailní a záleží, jak má vybraný dodavatel připravenou požadovanou dokumentaci. Očekávaná doba zpracování této dokumentace se odhaduje na dva roky. [112]

[112] Seminář k licenčním a povolovacím požadavkům pro potenciální investory SMR, 22. listopadu 2022 v Řeži, Viktor Černý, Skupina ČEZ

Doprava těžkých a rozměrných SMR je složitý logistický proces. Rozměry některých komponentů se očekávají na stejné úrovni, jako jsou u velkých jaderných bloků. Například největší díl vytipovaný pro výstavbu SMR, má v průměru 6,3 m a váží kolem 500 tun. Transportovatelnost SMR je také jedním z hlavních kritérií pro výběr konkrétní technologie, protože součástí investice bude i modernizace infrastruktury.[113]

Ačkoliv SMR jsou menší než velké jaderné bloky s elektrickým výkonem od 160 – 470 MW_e, tak se jejich odhadovaná cena může pohybovat v rozmezí 1 mld – 3 mld. EUR. Financování jaderných projektů je komplikovaná záležitost. Očekává se nedůvěra bankovních institucí financovat jaderné projekty. Banky budou u prvních projektů hledět na možná rizika, jako například pravděpodobnost nedostavění JZ. Díky přijetí jaderné energie do taxonomie udržitelného financování, by se mohla zlepšit budoucí investice v ČR do jaderné energie. Nicméně bude stále potřeba finanční podpory ze strany státu a zajištění financování budoucích projektů. [113]

6.2.2. Licenční a povolovací procesy malých modulárních reaktorů dle Státního úřadu pro jadernou bezpečnost

SÚJB je regulátor zodpovědný za ochranu před negativními účinky štěpné jaderné reakce a ionizujícího záření. SÚJB vidí SMR jako jaderné zařízení, které obsahuje jaderný reaktor a podléhá legislativním náležitostem v oblasti jaderné energetiky. V případě provozu jaderného zařízení hrozí určitá rizika a je stále potřeba chránit jeho bezprostřední okolí a pracovníky. K tomu přistupuje řada dalších menších faktorů (tlak, teplota, koroze, lidský faktor, sabotáže nebo vlivy okolí) a neustále tyto faktory působí na jaderné zařízení a vyvolávají riziko úniku ionizujícího záření do okolí a ohrožení zdraví. [114]

Mezinárodní společenství vytvořilo soubor určitých základní principů, které jsou upraveny v dokumentech mezinárodní agentury pro atomovou energii. Vycházejí ze tří základních složek (Safety, Security, Safeguards). První složka „Safety“ ochraňuje okolí, pracovníky a veřejnost před ionizujícím zářením a negativním dopadem štěpné reakce. Druhá složka „Security“ chrání JZ předtím, aby ho někdo zneužil nebo ohrozil.

[113] Seminář k licenčním a povolovacím požadavkům pro potenciální investory SMR, 22. listopadu 2022 v Řeži, Viktor Černý, Skupina ČEZ
[114] Seminář k licenčním a povolovacím požadavkům pro potenciální investory SMR, 22. listopadu 2022 v Řeži, Štěpán Kochánek, SÚJB

Díky třetí složce „Safeguards“ existuje mezinárodně uznávaný systém nešíření jaderných zbraní hromadného ničení. Všechny státy se globálně zavázaly, že nebudou rozšiřovat počty jaderných zbraní a musí aplikovat kontrolní režimy na jaderné materiály a technologie, které souvisí s JZ. Provozovatel JZ musí po celou dobu tyto položky monitorovat. Tyto tři základní složky se týkají velkých reaktorů, výzkumných reaktorů a SMR. [115]

SÚJB se účastnil zahraničních jednání s cílem sdílení úzkého okruhu informací a výsledků posuzování mezi členskými státy a regulátory. Výsledkem má být základní struktura, která má vzniknout v první polovině roku 2023. Tento návod má pomoci členským zemím a dozorovým orgánům, jak mohou správně postupovat při sdílení svých zkušeností s posuzováním designů SMR. To může mít za následek snížení potřebné doby na udělení licence SMR v ČR. SÚJB navázal blízkou komunikaci s kanadskými, americkými a britskými regulačními orgány. Chystá se novelizace AZ, ve které se SÚJB pokusí reflektovat potřebné změny v legislativě pro možné uplatnění SMR v českých podmínkách. [115]

[115] Seminář k licenčním a povolovacím požadavkům pro potenciální investory SMR, 22. listopadu 2022 v Řeži, Štěpán Kochánek, SÚJB

6.3. Možnosti použití malých modulárních reaktorů v Elektrárně Temelín

Jihočeský kraj, stát ČR, Skupina ČEZ a ÚJV Řež a.s. podepsaly dne 21. září 2022 memorandum o vzniku Jihočeského jaderného parku, dle kterého by mohl do roku 2032 v Jaderné elektrárně Temelín vzniknout první pilotní projekt SMR. [116] Obdobně i Moravskoslezský kraj chce do budoucna využít jaderný scénář, který uvažuje právě SMR pro pokrytí poptávky po elektrické a tepelné energii.[117]

Plocha, která je vymezena pro SMR je 190 000 m^2. Tato plocha je znázorněna na Obrázek 33 v kapitole 6.1.3. „Umístění malých modulárních reaktorů v Elektrárně Temelín a další potenciální lokality“. Lokalita Temelín má vhodné geologické podmínky a velmi příznivou veřejnou podporu. Elektrárna Temelín se nenachází v záplavové oblasti. Současně se lokalita nachází v blízkosti řeky Vltavy, která má dostatečný vodní zdroj pro napájení jaderných zdrojů.

Pro nasazení technologie SMR je v úvaze zřídit jaderné zařízení s výkonem elektrické energie kolem 300 MW_e. SMR by v Elektrárně Temelín byl pouze doplňujícím zařízením k velkým jaderným blokům, který by produkoval elektrickou energii a udržoval by energetickou stabilitu.

V úvaze je celkem šest technologií SMR. Jedním z účelů této práce je vytvořit shortlist z vybraných technologií, případně zvolit nejvhodnější technologie SMR pro Elektrárnu Temelín. V následující kapitole jsou proto vytvořena hlavní kritéria pro posuzování a výběru technologie SMR, kde následuje část, kde se technologie porovnávají z hlediska technického, licenčního, ale i z hlediska ekonomického. Na základě tohoto porovnání a posuzování z hlediska kritérií se poté vytvořil shortlist technologií SMR.

[116] V Temelíně vznikne do roku 2032 první malý modulární reaktor v ČR, 2022
[117] Budoucnost energetiky je v jádru, 2022

6.3.1. Hlavní kritéria pro porovnání

Hlavním kritériem v Elektrárně Temelín je spotřeba surové vody do elektrárny a vypouštění odpadních vod a radioaktivních látek do ovzduší a řek. Dále je lokalita Temelín omezená vyvedením elektrického výkonu do rozvodny Kočín. Mezi další limity této lokality patří například seismicita, meteorologické a hydrologické požadavky, zabezpečená infrastruktura pro jaderné bloky, dopravitelnost nadrozměrných a těžkých zařízení. V neposlední řadě musí mít projekt vysokou podporu veřejnosti [118]

Elektrárna Temelín má v současném provozu stávajících velkých jaderných bloků instalovaný elektrický výkon 2 x 1125 MW_e. Posuzování vlivu na životní prostředí (EIA) do budoucna povoluje v lokalitě Temelín umístit další dva bloky o elektrickém výkonu do 1 700 MW_e. Celkový čistý instalovaný elektrický výkon je tedy pro NJZ povoleno do 3 400 MW_e. [119] Uvažují se dva velké jaderné bloky o elektrickém výkonu do 1 200 MW_e. Po odečtení celkového elektrického výkonu od uvažovaných dvou jaderných bloků je konečný instalovaný elektrický výkon 1 000 MW_e, který lze pokrýt malými modulárními reaktory. Velké bloky i SMR jsou omezeny spotřebou surové vody z Vltavy. Odhad spotřeby surové vody je kolem 1 $m^3 \cdot s^{-1}$ na 1 000 MW_e.

V první řadě je důležité vybrat takové technologie SMR, které současně uvažuje Skupina ČEZ, jakožto vlastník Elektrárny Temelín. Těžkovodní reaktory nemá smysl porovnávat, neboť se jedná o neznámou technologii a potenciální investor nebo dodavatel nemá o tyto reaktory v ČR zájem, včetně Skupiny ČEZ v lokalitě Temelín. Proto práce zohledňuje kritérium typu reaktoru, pouze na lehkovodní a varné reaktory.

Pro možnou aplikaci vybraných SMR do Elektrárny Temelín, bude nejprve potřeba vytvořit kritéria, která by měly SMR splňovat pro možnou implementaci jak v lokalitě Temelín, tak i v ostatních lokalitách po celé České republice.

Výběr kritérií a posuzování jednotlivých SMR pro vhodnost umístění do ETE dle kapitoly „6.1.4.2 Metodika výběru technologie malých modulárních reaktorů dle Skupiny ČEZ“ je netriviální záležitostí spadající pod multikriteriální hodnocení, které může probíhat i v řádu několika let. Problematika výběru technologie SMR je řešena v této práci jednodušší metodou, protože zkušenosti autora této práce nedosahují

[118] Národní akční plán rozvoje jaderné energetiky v České republice, 2015
[119] Česká republika, 2016, str. 1

požadované úrovně ve všech oblastech, potřebných ke komplexnímu rozboru této problematiky. Zároveň je nutné zmínit, že k vypracování kompletního rozboru výběru nejvhodnější technologie SMR v ETE, je potřeba několika členný tým odborníků s odpovídajícím finančním zázemím.

Tento výběr kritérií byl založen na základě autorem zjištěných poznatků, zkušeností z jednání se Skupinou ČEZ, ÚJV Řež, a.s., účastí na seminářích a workshopech k tématu SMR, včetně účasti na workshopu pořádaného Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (MAAE) ve Vídni. Níže jsou v tabulce uvedena hlavní kritéria a komentáře, dle kterých by se měly posuzovat technologie SMR.

KRITÉRIUM	KOMENTÁŘ
Úroveň technologické připravenosti	Toto kritérium určuje vyspělost dané technologie během fáze jeho vývoje a určuje připravenost technologie ke komerčnímu využití. Tato připravenost je nezbytná pro realizaci projektu. Na základě vysoké úrovně technologické připravenosti se například sníží riziko ohledně prodlužování harmonogramu projektu a neohrozí se průběh licenčních a povolovacích procesů.
Dopad na uplatnitelnost českého průmyslu a hospodářství ČR	Hlavním kritériem pro výběr technologie by měla být spolupráce na výstavbě a provozu jaderného zařízení s českým dodavatelským řetězcem a energetickými společnostmi, které se angažují v jaderné energetice. Tyto společnosti mohou posílit hrubý domácí produkt (HDP) v ČR a do budoucna výrazně přispět se zakázkami potřebných komponentů pro jaderná zařízení. Například český průmysl může obstarat technologie a energetické společnosti zase dodávat lidské kapacity do okolních států, které plánují výstavbu a provoz technologií SMR.

Ekonomické kritérium	Základním ekonomickým kritériem je ekonomická návratnost investice. Znalost dalších důležitých ekonomických parametrů, jako jsou celkové investiční náklady – capital expenditures (CapEx) a provozní náklady - operating expenses (OpEx) jsou nezbytné pro ohodnocení rizik a výběru technologie SMR. Toto kritérium určí, zda je daný design SMR ekonomicky konkurenceschopný.
Vhodnost parametrů pro lokalitu	Kromě lokality Temelín je potřeba pro výměr technologií SMR, brát i ohled na další potenciální lokality po celém území ČR. Na těchto lokalitách je potřeba zajistit dostatek potřebných vodních zdrojů a vyvedení elektrického a tepelného výkonu. Jak již bylo zmíněno v této kapitole, bude potřeba splnit řadu kritérií, jako je vhodnost infrastruktury, určení vhodných geologických a geografických podmínek, posouzení seismicity a zda se lokalita nenachází v záplavové oblasti.
Etablovaná společnost v oblasti jaderné energetiky	Renomovaná společnost v oblasti jaderné energetiky by měla mít zkušenosti v tomto oboru, měla by mít personální, ekonomické a technologické zajištění. V případě, že společnost je nespolehlivá, nedodává potřebné informace v dohodnutých termínech, tak se zvyšuje riziko, že společnost nesplní kontrakt na dodání technologie SMR do ČR. Současně by se zázemí společnosti mělo nacházet ve spřátelené zemi kvůli politické bezpečnosti.

Licenční a povolovací procesy v zahraničí i ČR	Společnost by měla být schopna získat pro svůj projekt SMR licenci v dané zemi v krátkém časovém horizontu a neměla by mít nadmíru složité licencování a povolování v ČR. V případě, že bude licencování daného designu SMR přiliž složité, tak se doba výstavby prodlouží a zvýší se i celkové investiční náklady. Společnost by proto měla i aktivně komunikovat s regulátorem daného státu.
Výrobní kapacity	Výrobní kapacita popisuje maximální počet vyrobených modulů za rok. Společnost by měla být schopna pokrýt poptávku po svém designu SMR v čas a v požadované kvalitě. Pokud by společnost tuto poptávku nesplnila, hrozí prodloužení dodání technologie SMR, a tedy i zvýšení celkových investičních nákladů.
Dopad na životní prostředí	Toto kritérium je důležité zejména dle zákona č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí, ve znění pozdějších předpisů, ale i dalších zákonů. Design SMR by měl splňovat všechny požadavky a kritéria v daných lokalitách dle posuzování vlivu na životní prostředí (EIA).
Bezpečnost dodávek jaderného paliva	Společnost vyvíjející design SMR by měla být schopna zajistit stabilitu dodávek jaderného paliva a případnou diverzifikaci dodávek paliva. Tento parametr je důležitý hlavně z politických bezpečnostních důvodů.

Transportovatelnost	Některé díly pro výstavbu SMR může být problematické transportovat na místo výstavby v dané lokalitě. To může mít zásadní dopad na výši potřebných nákladů a na potřebnou úpravu infrastruktury mimo výši smluvené dohody.

Tabulka 6 - Hlavní kritéria pro výběr technologie SMR do prostředí ČR, včetně Elektrárny Temelín

6.3.2. Hodnocení technologií malých modulárních reaktorů dle kritérií

Některé hodnoty jsou momentálně neznámé a obtížně porovnatelné. Ať už z důvodu citlivých informací o technologii SMR nebo z důvodu, že společnosti momentálně nemají dostatečné informace. Například kritérium *Úroveň technologické připravenosti* lze obtížně ohodnotit u jednotlivých projektů z důvodu nedostatečných nebo citlivých informací. Dále kritérium *Licenční a povolovací procesy v zahraničí i ČR* závisí na spolupráci dané společnosti a státu, ve kterém je projekt vyvíjen, se zahraničním a českým regulačním orgánem SÚJB. Podle předpokládaného licencování v zemi původu a zahájení provozu první jednotky SMR First of a Kind (FOAK) je možné konstatovat, že projekt NUWARD^{TM} má v plánu zahájit výstavbu a provoz nejpozději v porovnání s ostatními projekty, jak je možné vidět v porovnání jednotlivých technologií SMR v Příloze 2.

Aplikováním kritéria *Dopad na uplatnitelnost českého průmyslu a hospodářství ČR*, se zjistí zda potencionální dodavatelé technologie SMR, podporují český průmysl. Společnosti mají převážně podepsaná memoranda nebo plánují podepsání memoranda do budoucnosti, s některými českými společnostmi. Například se společností ŠKODA Praha a.s., ŠKODA Jaderné strojírenství a. s., ÚJV Řež, a.s. nebo se Skupinou ČEZ[120] [121]. Lze předpokládat, že společnost NuScale Power chce svůj projekt realizovat ze svých zdrojů a s malou angažovaností tuzemského průmyslu, jelikož uzavřela memoranda převážně se zahraničními společnostmi.[122]

Dále *Ekonomické kritérium* a kritérium *Výrobní kapacity* jsou neznámé, neboť se projekty stále nacházejí v koncepčním návrhu a ve fázi vývoje. Společnosti jsou

[120] Rolls-Royce SMR signs Memorandum of Understanding (MoU) with Škoda JS, 2022
[121] Holtec Advances Project Delivery Plan for SMR-160 in Czech Republic, c2022
[122] NuScale Power Signs Memorandum of Understanding with GS Energy, Doosan, and Samsung to Explore Small Modular Reactor Deployment, 2022

schopny dodat pouze úvahy o jejich ekonomické stránce. Nicméně tyto ekonomické údaje se zdají být značně nepřesné a přehodnocené dle tabulky z Přílohy 2, neboť se očekávají sdružené náklady na výrobu energie (LCOE) vyšší než u velkých jaderných bloků, kde LCOE je kolem *90 $/MWh*.[123]

V rámci lokality Temelín je potřeba splnit kritéria ohledně spotřeby surové vody do elektrárny a výpusť odpadních vod a radioaktivních látek do ovzduší a řek dle posuzování vlivu na životní prostředí (EIA). Současné dokumenty o projektech SMR neudávají tyto potřebné informace. Nicméně se očekává, že toto kritérium bude splněno. Lokalita Temelín má podporu veřejnosti a nenachází se v záplavové oblasti, ani v oblasti se zvýšenou tektonickou aktivitou. Elektrárna Temelín má disponibilní elektrický výkon do 1 000 MW_e. Tento výkon je vymezen pro malé modulární reaktory. Další požadavkem na lokalitu je potřebná minimální rozloha SMR. Skupina ČEZ pro SMR vymezila plochu, která je maximálně 190 000 m^2, což dle dat z Přílohy 2 splňují všechny projekty. Z těchto uvedených aspektů lze uvažovat, že všechny vybrané designy splňují požadavky na lokalitu.

Licenční a povolovací procesy jednotlivých projektů momentálně probíhají v zemi původu. Kromě společnosti NuScale Power, která dostala licenci na svůj projekt o výkonu 60 MW_e v roce 2020. Dále projekt SMART100 očekává licenci v roce 2023 s uvedením do provozu v Saudské Arábii v roce 2027. Poslední projekt, co očekává licenci je NUWARD^{TM}, který svoji licenci získá až v roce 2034.

Další kritérium je spolehlivost společnosti a jejího know-how v oblasti jaderné energetiky. Jedna ze společností s nejvíce zkušenostmi v jaderné energetice má společnost EdF. Společnost GE Hitachi se angažuje v jaderném průmyslu již desetiletí a například projektovala varný reaktor Shika 2 v Japonsku v roce 2005. Společnost Rolls-Royce se podílela na výrobě ponorkových reaktorů a dodávek komponentů, jako jsou bezpečnostní a řídící systémy. Holtec International dodává zařízení pro suché a mokré skladování. KHNP, která je dceřinou společností KEPCO, vlastní 21 korejských jaderných elektráren a vypracovává studii proveditelnosti a poskytuje technickou pomoc při úpravách a zlepšování návrhu jaderné elektrárny. NuScale Power je mladá

[123] Workshop on Economic Competitiveness, Marketability, and Bankability of Micro and Small Modular Reactor Technologies, dne 15 – 18.8.2022 ve Vídni, IAEA

společnost v oboru jaderné energetiky, která byla založena v roce 2007. Společnost NuScale Power se podílí na výzkumu a vývoji v jaderném sektoru.

Při zohlednění kritéria *Bezpečnost dodávek jaderného paliva*, je nutné zmínit, že většina společností má uzavřenou dohodu s Framatomem o dodávkách jaderného paliva. Nicméně společnosti nepopisují bližší specifika o diverzifikaci jaderného paliva.[124] [125]

Nároky na transportovatelnost nadrozměrných komponentů v lokalitě Temelín, jsou dány dle podmínek posuzování vlivů na životní prostředí (EIA). EIA upravuje maximální rozměry přepravovaných komponentů a stanovuje jejich maximální hmotnost do 1 086 tun. Z tabulky dle Přílohy 2 lze pozorovat, že toto kritérium splňují všechny designy, nicméně SMART100 má hmotnost reaktorové nádoby 1 070 tun, což může vést ke komplikacím s dopravou. Společnost však neudává, zda reaktorová nádoba bude konstruována na místě výstavby, anebo se bude transportovat.

[124] Framatome announces Fuel Handling and Services Contract with NuScale Power, 2022
[125] Framatome wins contract to fuel Holtec's small modular reactor, 2020

6.4. Souhrn práce a doporučení

Česká republika bude v roce 2025 nesoběstačná v produkci elektřiny, a to dle výroční zprávy zdrojové přiměřenosti českého operátora přenosové sítě (ČEPS). S postupným odstavováním uhelných zdrojů mezi lety 2032 až 2038 se odstaví 10 GW instalovaného elektrického výkonu a lze očekávat do budoucna i nedostatek tepelné energie. Jedním z řešení je výstavba nových jaderných bloků a malých modulárních reaktorů v ČR. V současné době se plánuje výstavba čtyř velkých reaktorů (ETE 3, 4 a EDU 5, 6) pro výrobu elektrické energie a výstavbu SMR pro účely kombinované výroby elektřiny a tepla. SMR lze také použít jako náhradu za uhelné elektrárny, v průmyslové aplikaci a pro výrobu vodíku.

Česká republika vidí velký potenciál v rozvoji jaderné energetiky, neboť se jedná o spolehlivý a cenově konkurenceschopný zdroj, který v ČR přispěje k energetické bezpečnosti, soběstačnosti, stabilitě dodávek energií a umožní plnit dekarbonizační závazky. Současně ČR vidí v českém jaderném průmyslu velký potenciál, neboť se jedná o technologické odvětví s vysokou domácí přidanou hodnotou a efektem na ekonomiku ČR. Díky přijetí jaderné energie do taxonomie udržitelného financování se usnadní investice do jaderné energie v EU, ale i v ČR.

Ekonomické hledisko je podstatné pro samotný projekt SMR a jeho návratnost. Pokud projekt bude vykazoval vysoké investiční a provozní náklady nebo vysoké náklady na potřebnou dokumentaci a náklady na úpravu infrastruktury, tak se od projektu opustí. Naneštěstí může nastat i případ, kdy nemusí být vybrán žádný projekt. Případné vyšší sdružené náklady na výrobu energie (LCOE) nebo vyšší celkové investiční náklady na elektrárnu nebudou vylučujícím kritériem, neboť bude nezbytné zajistit stabilní zdroj výroby elektrické energie. Pokud se dokáže využít potenciál českého průmyslu a vedlejších efektů pro hospodářství, například dodávkami potřebných dílů, bezpečnostních systémů nebo personálních kapacit do zahraničí, tak dojde ke zvýšení HDP ČR a technologického rozvoje ČR v oblasti jaderné energetiky.

Výraznější úspory na investičních nákladech by bylo možné dosáhnout i synergií při výstavbě třetího jaderného bloku ETE 3 a využití nabytých zkušeností pro výstavbu jednotky SMR. Díky synergiím je možné očekávat úspory investičních nákladů na první jednotku SMR.

Současná legislativa nerozlišuje rozdíl mezi pojmem SMR a velkým jaderným blokem. Touto problematikou se aktivně zabývá SÚJB ve spolupráci s MPO a výzkumnými institucemi. Dále SÚJB aktivně komunikuje se zahraničními regulátory a členskými státy s cílem vytvořit právní strukturu novelizace atomového zákona, která má vzniknout v roce 2023. Účelem této struktury je snížení potřebné doby na udělené licence SMR v České republice.

Požadavky na bezpečnost reaktoru a kvalitu musí splňovat všechny projekty SMR. Jedná se o pevně daný požadavek, který v rámci norem a standardů musí být splněn u všech technologií. Tedy v rámci povolovacích procesů a analýz se očekává, že jakmile design získá licenci, bude i splňovat bezpečnostní nároky.

Jedním z hlavních kritérií pro výběr technologie by měla být spolupráce na výstavbě a provozu jaderného zařízení s českým dodavatelským řetězcem a energetickými společnostmi, které se angažují v jaderné energetice. Tyto společnosti mohou posílit HDP v ČR a do budoucna výrazně přispět se zakázkami dodávající potřebné komponenty pro jaderná zařízení. Například Polsko plánuje vystavět jadernou flotilu až o deseti reaktorech BWRX-300, kdy první jejich SMR je očekáván v roce 2029. [126] Obdobně i v Estonsku je společnost Fermi Energia rozhodnuta pro technologii BWRX-300 [127]

6.4.1. Užší výběr technologií malých modulárních reaktorů

NUWARD^{TM} získá licenci až v roce 2034. Podle tohoto údaje a dle dokumentace kterou EdF uvádí lze usoudit, že se projekt nachází v raném stádiu. ČR i potenciální investoři budou chtít výstavbu SMR zahájit co nejdříve. Dále Skupina ČEZ udává, že plánuje provozovat SMR v Temelíně kolem roku 2032 a projekt NUWARD^{TM} svoji první jednotku očekává v provozu až v roce 2034. Na základě těchto aspektů a kritéria týkajícího se *Úrovně technologické připravenosti* není dle této práce projekt NUWARD^{TM} vhodný.

U společnosti NuScale Power mohou nastat komplikace z pohledu licencování. Česká legislativa a ani AZ neví, zda považovat všech 12 jednotek VOYGR za jeden reaktor,

[126] Poland / First BWRX-300 SMR Could Be Operational In 2029, Says GEH, 2022
[127] Seminář 13.12.2022 Petr Závodský předseda představenstva ČEZ, ČVUT FJFI

anebo posuzovat každou jednotku zvlášť. Společnost spolupracuji spíše se zahraničními společnostmi, a lze předpokládat, že nebude spolupracovat s českými subjekty. Z tohoto důvodů byla společnost NuScale Power pro účely této práce označena jako nevhodný dodavatel SMR v ČR.

Na základě dostupných informací lze usoudit, že projekt SMART100 má nízkou technologickou připravenost. Dále projekt SMART100 může mít komplikace s transportovatelností, neboť reaktorová nádoba má přes 1 000 tun, a tedy může být potřeba upravit potřebnou infrastrukturu. Na základě těchto kritérií byl projekt odebrán v rámci této práce ze seznamu vhodných dodavatelů v ČR.

Společnost Rolls-Royce aktivně komunikuje s MPO i Skupinou ČEZ. Její návrh má nejvyšší elektrický výkon ze všech uvedených, a to 470 MW_e. Lze předpokládat účast českého průmyslu na výstavbě a provozu jejich projektu. Společnost plánuje spolupráci s českým dodavatelským řetězcem a například spolupracuje se Škodou JS a.s.. První spuštění designu společnost Rolls-Royce plánuje v roce 2030 ve Velké Británii.

Projekt BRWX-300 společně s projektem SMR-160 mají dle názoru autora nejvyšší potenciál být vybrány do Elektrárny Temelín. Společnost GE Hitachi Nuclear Power i společnost Holtec International vykazují vysoký zájem o zapojení českého jaderného průmyslu do výstavby a provozu SMR v ČR. Na základě tohoto zájmu mají obě společnosti individuálně podepsána memoranda s českými společnostmi, jako jsou společnosti ze Skupiny ČEZ, Škoda JS a.s., a očekávají se podpisy memorand s další společnostmi. Obě společnosti aktivně jednají s Ministerstvem průmyslu a obchodu České republiky a aktivně sdílí potřebné informace pro implementaci jejich projektu v ČR.

V září roku 2022 podepsala společnost Holtec International dohodu o spolupráci se Skupinou ČEZ a je uvažováno zahájení pilotního projektu SMR v Elektrárně Temelín. První pilotní projekt plánují provozovat v USA v roce 2029. Project SMR-160 je škálovatelný tzn. že je možné blok navýšit o další reaktory.

Oproti projektu SMR-160 se zdá koncept BWRX-300 vyvinutější. V roce 2025 například společnost GE Hitachi Nuclear Power plánuje zahájení výstavby jejich reaktoru BWRX-300 v Darlingtonu v Kanadě za spolupráce s Ontario Power Generation. Skupina ČEZ by ráda využila tento typ reaktoru v České republice buď

v lokalitě Temelín, anebo zejména v lokalitách, kde se nacházejí uhelné elektrárny, které mají elektrický výkon kolem 200 - 250 MW_e. Nicméně Česká republika nezná technologii varných reaktorů BWR, neboť už z historického kontextu má ČR převážně znalosti v lehkovodních reaktorech.

Co se týká ekonomického hlediska, tak dle kapitálových nákladů (CapEx) je projekt BWRX-300 levnější díky jeho jednoduší konstrukci oproti návrhu CMR-160. Kvůli neznalostem s varným reaktorem vzniknou přidružené náklady, například náklady na změnu dokumentace, na vytvoření nových studií, na úpravu legislativy a právního rámce, na vyškolení potřebného personálu do SÚJB a na provoz tohoto varného reaktoru. Další problematika týkající se projektu BWRX-300 může být náročnější bezpečnostní stránka projektu, neboť varný reaktor vypouští aktivní páru přímo na turbínu. Nicméně žádný z těchto aspektů nevylučuje projekt BWRX-300 pro nasazení do zázemí ČR a Elektrárny Temelín. V případě, že BWRX-300 dostane licenci v zahraničí a České republice, lze ho označit za bezpečný projekt. Pokud se BWRX-300 postaví v plánované době roku 2032 a český jaderný průmysl se přizpůsobí technologii BWR a bude schopen produkovat potřebné komponenty a personální kapacity, tak bude možné využít tento vedlejší efekt i v zahraničí. Například český dodavatelský řetězec může dodávat potřebné díly a personální kapacity do Polska nebo Estonka.

V rámci této práce byly zapsány do Tabulky 7 vybrané společnosti, které jsou vhodné pro implementaci do Elektrárny Temelín.

Společnost	**GE Hitachi Nuclear Energy**	**Rolls-Royce SMR**	**Holtec International**
Země	Spojené státy americké a Japonsko	Spojene království Velké Británie a Severního Irska	USA
Reaktor	BWRX-300	Rolls-Royce SMR / UK SMR	SMR-160
Typ Reaktoru	BWR	LWR	LWR
Hmotnost reaktoru [tuny]	485	220	295
Tepelný výkon [MW_t]	870	1 276	525
Elektrický výkon [MW_e]	300	470	160
Potřebná rozloha [m^2]	26 300	49 000	20 000
Předpokládané zahájení provozu FOAK [rok]	2028 (Kanada)	2030 (V. Británie)	2029 (USA)

Tabulka 7 - Shortlist technologií SMR do Elektrárny Temelín

V Elektrárně Temelín má Společnost ČEZ v plánu postavit SMR o výkonu kolem 300 MW_e. Nicméně Rolls-Royce uvádí u svého designu UK SMR, že jejich výkon je 470 MW_e. V porovnání s designem SMR160 je možné vestavět další jednotky a výkon případně zvýšit. Design BWRX-300 má tento výkon přesně kolem 300 MW_e, což odpovídá přesně požadavkům ČEZu. Proto pro užší výběr technologií SMR do Elektrárny Temelín jsou doporučeny technologie SMR160 vyvíjené společností Holtec International a technologie BWRX-300 od společnosti GE Hitachi.

ZÁVĚR

Tato práce je zaměřena ku prospěchu hospodářství České republiky, kde první část se zabývá konstrukcí a technickou specifikací malých modulárních reaktorů. V dalších částech této práce jsou popsány specifické podmínky energetiky v České republice. Na závěr jsou vybrány nejvhodnější malé modulární reaktory pro využití v České republice, zejména v Elektrárně Temelín.

Největším přínosem pro čtenáře této práce je vytvoření uceleného přehledu o malých modulárních reaktorech do jednoho dokumentu a shromáždění informací o využití malých modulárních reaktorů s přihlédnutím ke specifickým podmínkám České republiky, shromážděných z jednání pracovních skupin Skupiny ČEZ, ÚJV Řež, a.s. a dalších institucí.

Další přidanou hodnotou této práce je zúžení výběru malých modulárních reaktorů používaných ve světě pro užití v České republice, zejména v Elektrárně Temelín, kdy podobná studie doposud nebyla vypracována. Mé poznatky potvrzují závěry studií pracovních skupin Skupiny ČEZ, ÚJV Řež, a.s. a dalších institucí, které jsou zmíněny v této práci a označují malé modulární reaktory BWRX-300, UK SMR a SMR 160 jako vhodné pro užití v České republice. Modulární reaktory BWRX-300 a SMR 160 jsou v současně době nejvhodnějšími projekty k užití do Elektrárny Temelín a projekt UK SMR je vhodný pro využití v České republice v lokalitách požadujících vyšší elektrický výkon. Dalším přínosem této práce je vyloučení nevhodných společností zabývajících se vývojem malých modulárních reaktorů, a to s přihlédnutím k důvodům, pro které nejsou tyto společnosti vhodné pro výstavbu v České republice, z důvodu dalších specifických okolností, zejména politických podmínek a technické připravenosti.

Zadáním této práce bylo popsat konstrukci a hlavní parametry malých modulárních reaktorů a jejich možnosti použití v Elektrárně Temelín. V jednotlivých kapitolách jsou popsány konstrukce a základní parametry malých modulárních reaktorů a v poslední kapitole jsou uvedeny mé doporučení, pro použití malých modulárních reaktorů v České republice.

Největším přínosem pro autora této práce je získání znalostí v oblasti malých modulárních reaktorů a jejich využití v rámci jeho další pracovní činnosti, jakožto zaměstnance Ministerstva průmyslu a obchodu.

Přínos diplomové práce je především pro Skupinu ČEZ při usnadnění výběru vhodného malého modulárního reaktoru do Elektrárny Temelín. Obsah této práce mohou využít i další instituce zabývající se malými modulárními reaktory, které mohou využít zejména shortlist v Tabulce 7 z aktuálního seznamu technologií malých modulárních reaktorů, viz tabulka v Příloze 2 a seznamu zvolených kritérií, dle kterých se vybere jeden až dva nejvhodnější dodavatelé. Eventuálně může využít výsledky této práce MPO při vytváření koncepce malých modulárních reaktorů v ČR.

SEZNAM LITERATURY

[1] *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* [online], 2020. In:. Austria: IAEA, s. 354 [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

[2] AYDOGAN, Fatih, 2016. Advanced small modular reactors. *Handbook on Generation IV Reactors*. elsevier, (20), 661–699. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-100149-3.00020-3

[3] *Band of Stability* [online], c2013. Austin: Chemistry 302 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: http://ch302.cm.utexas.edu/nuclear/radioactivity/selector.php?name=band-stability

[4] *Budoucnost energetiky je v jádru* [online], 2022. Ostrava: Moravskoslezský kraj [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: https://www.msk.cz/cs/temata/chytry_region/budoucnost energetiky-je-v-jadru--kraj-bude-s-partnery-spolupracovat-na-rozvoji-malych-modularnich-reaktoru-13880/

[5] *Central WA is eyeing nuclear power again* [online], 2022. Seattle: Stang [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: https://crosscut.com/news/2022/09/central-wa-eyeing-nuclear-power-again-smaller-scale

[6] ČESKÁ REPUBLIKA, 2016. *Závazné stanovisko k ověření souladu: Nový jaderný zdroj v lokalitě Temelín včetně vyvedení výkonu do rozvodny Kočín*. In: . Praha: Ministerstvo životního prostředí, číslo 216. Dostupné také z: https://portal.cenia.cz/eiasea/detail/EIA_MZP230

[7] *Energetika*, 2021. 71. Praha. ISSN 0375-8842

[8] E. RICOTTI, Marco a Roman V. FOMIN, 2020. Small modular reactors. *Nuclear Reactor Technology Development and Utilization*. **2020**(5), 187-211. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-818483-7.00005-6

[9] First U.S. Small Nuclear Reactor Design Is Approved. *Scientific American* [online]. 2020 [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: https://www.scientificamerican.com/article/first-u-s-small-nuclear-reactor-design-is-approved/

[10] *Framatome announces Fuel Handling and Services Contract with NuScale Power* [online], 2022. Paris: Framatome [cit. 2023-01-09]. Dostupné z: https://www.framatome.com/medias/framatome-announces-fuel-handling-and-services-contract-with-nuscale-power/?lang=en

[11] *Framatome wins contract to fuel Holtec's small modular reactor* [online], 2020. Paris: Framatome [cit. 2023-01-09]. Dostupné z: https://www.framatome.com/medias/framatome-wins-contract-to-fuel-holtecs-small-modular-reactor/

[12] Georgia nuclear plant cost tops $27B as more delays unveiled, 2n. l. *AP news* [online]. 2021 [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: https://apnews.com/article/business-environment-and-nature-georgia-90bbe5cc8e3a1a6077b9e4318e2bbf7e

[13] *Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ)*, 2021. ČEPS.

[14] *Holtec Advances Project Delivery Plan for SMR-160 in Czech Republic* [online], c2022. New Jersey: Holtec [cit. 2022-12-31]. Dostupné z: https://holtecinternational.com/2022/10/25/holtec-advances-project-delivery-plan-for-smr-160-in-czech-republic/

[15] *Jaderná a radiační fyzika* [online]. Ostrava: Ullmann [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika3.htm

[16] *Jaderná energie*, 2020. 2. Řež: Centrum výzkumu Řež

[17] *Jaderná energie*, 2021. 3. Řež: Centrum výzkumu Řež

[18] LANGDON, Ken, c2019. *NuScale Small Modular Reactor (SMR) Overview*. NuScale Power. Dostupné také z: https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df17/IV.5-KenLangdon-NuScale.pdf

[19] LIU, Zhitao a Jihong FAN, 2014. Technology readiness assessment of Small Modular Reactor (SMR) designs. *Progress in Nuclear Energy*. **2014**(70), 9. Dostupné z: doi:10.1016/j.pnucene.2013.07.005

[20] Malé a mikro reaktory, 2020. *Svět Energie* [online]. [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/male-a-mikro-reaktory/vyklad

[21] Malé modulární reaktory: Jak je vidí SÚJB?, 2021. *SÚJB* [online]. [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/aktualne/detail/male-modularni-reaktory-jak-je-vidi-sujb

[22] *Národní akční plán rozvoje jaderné energetiky v České republice*, 2015. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR

[23] *Nuclear AMRC and Rolls-Royce confirm modular reactor collaboration* [online], 2017. London: Nathan [cit. 2023-01-04]. Dostupné z: https://www.theengineer.co.uk/content/news/nuclear-amrc-and-rolls-royce-confirm-modular-reactor-collaboration

[24] Nuclear reactions, 2015. In: *PGS Physics* [online]. Google [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: https://sites.google.com/a/perthgrammar.co.uk/physics/courses/higher/particles-and-waves/33-nuclear-reactions/332-mass-and-energy-equivalence

[25] *NUSCALE: Ready for Deployment in the UK*, 2022. NuScale Power. Dostupné také z: https://s24.q4cdn.com/104943030/files/doc_downloads/factsheet/nuscale-ready-for-deployment-uk-fact-sheet.pdf

[26] *NuScale Power Signs Memorandum of Understanding with GS Energy, Doosan, and Samsung to Explore Small Modular Reactor Deployment* [online], 2022. Corvallis: NuScale [cit. 2023-01-10]. Dostupné z: https://www.nuscalepower.com/en/news/press-releases/2022/nuscale-signs-mou-with-gs-energy-doosan-and-samsung-to-explore-small-modular-reactor-deployment

[27] *NUWARD™ SMR, leading the way to a low-carbon world* [online], c2022. Paris: EDF [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: https://www.edf.fr/en/the-edf-group/producing-a climate-friendly-energy/nuclear-energy/shaping-the-future-of-nuclear/the-nuwardtm-smr-solution/the-solution

[28] *NUWARD™ SMR to be test case for European regulatory review* [online], 2022. Chicago: Nuclear News [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: https://www.ans.org/news/article-4033/nuward-smr-to-be-test-case-for-european-regulatory-review/

[29] *Poland / First BWRX-300 SMR Could Be Operational In 2029, Says GEH* [online], 2022. Brusel: Rapacka [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: https://www.nucnet.org/news/first-bwrx-300-smr-could-be-operational-in-2029-says-geh-8-2-2022

[30] *ROLLS ROYCE NUCLEAR 'SMALL' MODULAR REACTORS ARE COMING!* [online], 2022. Ghana Nuclear Power Programme Organisation [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: https://gnppo.org.gh/?p=1109

[31] *Rolls-Royce Small Modular Reactors* [online], 2022. Derby: Rolls-Royce [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: https://www.rolls-royce.com/innovation/small-modular-reactors.aspx#/

[32] *Rolls-Royce SMR signs Memorandum of Understanding (MoU) with Škoda JS* [online], 2022. Derby: Rolls-Royce [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: https://www.rolls-royce-smr.com/press/rolls-royce-smr-signs-memorandum-of-understanding-mou-with-skoda-js

[33] *Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities* [online], 2021. 2021. [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities

[34] Small modular reactors, 2020. *Nuclear Energy Agency* [online]. [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_26297/small-modular-reactors

[35] *Small modular reactors in the Australian context*, 2021. Sydney. Dostupné také z: https://www.minerals.org.au/sites/default/files/Small%20modular%20reactors%20in%20the%20Australian%20context_Ben%20Heard_2022%20update.pdf

[36] Small Nuclear Power Reactors, 2021. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx

[37] *SMR-160 Delivers High Performance with a Smaller Footprint* [online], c2022. New Jersey: Holtec [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: https://holtecinternational.com/2022/10/25/holtec-advances-project-delivery-plan-for-smr-160-in-czech-republic/

[38] STACEY, Weston M., c2007. *Nuclear reactor physics*. 2nd ed., completely rev. and enlarged. Weinheim: Wiley-VCH. ISBN 978-3-527-40679-1.

[39] *Status Report – BWRX-300 (GE Hitachi and Hitachi GE Nuclear Energy)*, 2019. North Carolina. Dostupné také z: https://aris.iaea.org/PDF/BWRX-300_2020.pdf

[40] *THE BWRX-300 SMALL MODULAR REACTOR* [online], c2022. North Carolina: Hitachi [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/bwrx-300

[41] Ve Vítkovicích vzniká projekt malé jaderné elektrárny, 2021. *HROT* [online]. [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: https://www.tydenikhrot.cz/clanek/vitkovice-witkowitz-modularni-reaktor-david-czechatom

[42] *Vogtle Unit 3 starts nuclear fuel load* [online], 2022. Atlanta: Georgia Power [cit. 2023-01-09]. Dostupné z: https://www.georgiapower.com/company/news-center/2022-articles/vogtle-unit-3-nuclear-fuel-load.html

[43] VUJIĆ, Jasmina, Ryan M.BERGMANN, Radek ŠKODA a Marija MILETIĆ, 2012. Small modular reactors: Simpler, safer, cheaper?. *Energy*. (45), 8. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2012.01.078

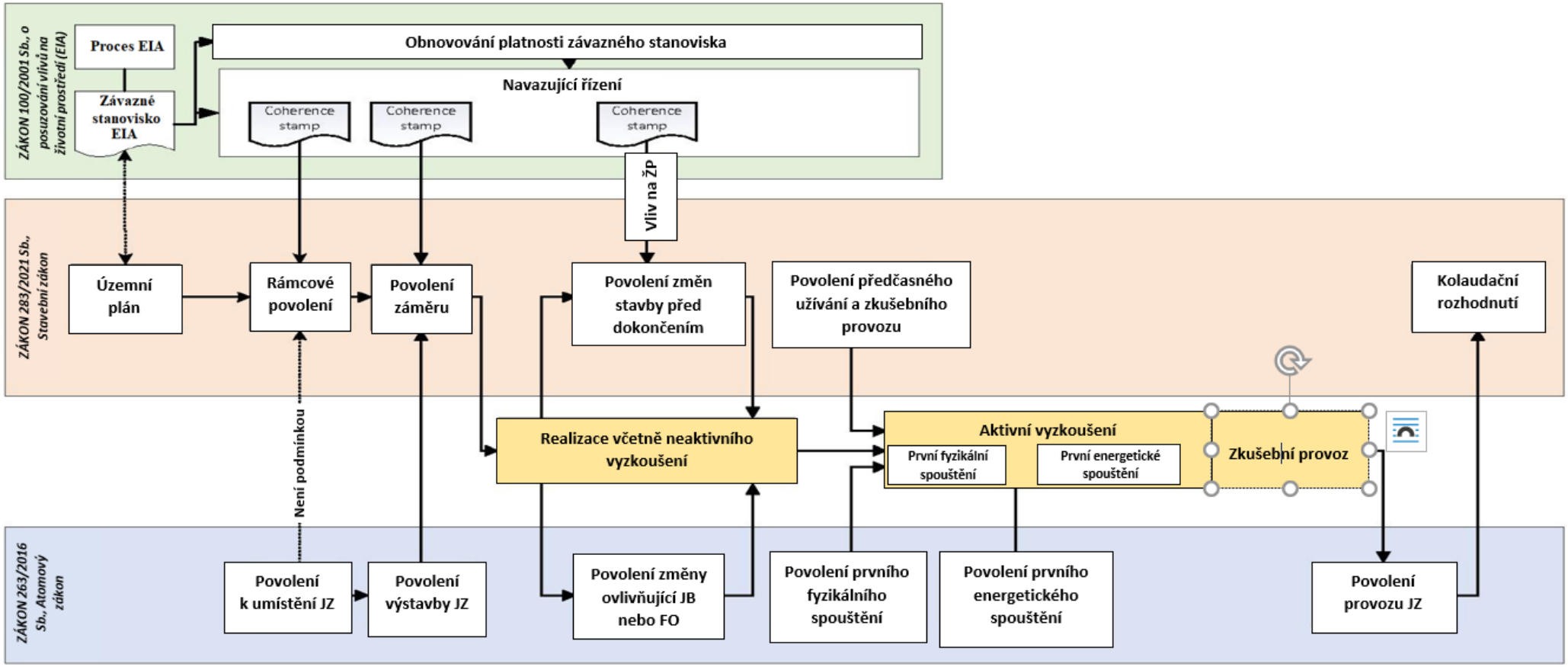
[44] *V Temelíně vznikne do roku 2032 první malý modulární reaktor v ČR* [online], 2022. Třebíč: oEnergetice [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/v-temeline-vznikne-do-roku-2032-prvni-maly-modularni-reaktor-v-cr

[45] What are Small Modular Reactors (SMRs)?, 2021. *International Atomic Energy Agency* [online]. Vienna [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Obrázek s povolovacími procesy a s jejich vazbami

Příloha 2: Tabulka s porovnáním parametrů jednotlivých technologií SMR



Převzato ze semináře k licenčním a povolovacím požadavkům pro potenciální investory SMR, 22. listopadu 2022, ÚJV Řež, a.s., Jakub Vyvadil, Skupina ÚJV

PŘÍLOHA číslo 1

PŘÍLOHA číslo 2

Společnost	NuScale Power	Korea Hydro & Nuclear power	GE Hitachi Nuclear Energy	Rolls-Royce SMR	Holtec International	Électricité de France S.A.
Země	Spojené státy americké	Jižní Korea	Spojené státy americké a Japonsko	Spojene království Velké Británie a Severního Irska	USA	Francie
Reaktor	VOYGR/NuScale Power Modules	SMART 100	BWRX-300	Rolls-Royce SMR / UK SMR	SMR-160	Nuward™
Typ reaktoru	LWR	LWR	BWR	LWR	LWR	LWR
Uspořádání	1 - 12 modulů	dvoublok	jednoblok	jednoblok	jednoblok	dvoublok
Průměr reaktorové nádoby [m]	2,7	5,99	4	4,5	3	4
Výška reaktorové nádoby [m]	17,7	16,1	26	11,3	15	13
Hmotnost reaktoru [tuny]	-	1070	485	220	295	310
Tepelný výkon [MW_t]	200 - 250/modul	360	870	1276	525	2 x 540
Elektrický výkon [MW_e]	60 - 77/modul	2 x 107	300	470	160	2 x 170
Tlak v primáru [MPa]	12,8 Mpa	15 Mpa	7,2	N/A	N/A	15
Účinnost [%]	33	33	33	33	33	33
Kapacitní faktor [%]	90	90	90	90	90	90
Potřebná rozloha [m^2]	140 000 (pro 12 modulů)	-	26 300	49 000	20 000	-
Seismicita [g]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
LCOE [$/MWh]	77	-	64	-	81,5	-
Bezpečnostní systémy	Pasivní	Pasivní	Pasivní	Pasivní a aktivní	Pasivní	Pasivní
Délka palivového cyklu [měsíc]	24	30	12 - 24	18 - 24	24	24
Typ paliva	UO_2/17x17	UO_2/17x17	UO_2/10x10	UO_2/17x17	UO_2/17x17	UO_2/17x17
Obohacení [%]	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Životnost [let]	60	60	60	60	80	60
Licence v zemi původu [rok]	2020	2023	2024	2026	2025	2029
Předpokládané zahájení výstavby FOAK [rok]	2026	2024	2024	2027	2025	2030
Předpokládané zahájení provozu FOAK [rok]	2029 (USA)	2027 (S. Arábie)	2028 (Kanada)	2030 (V. Británie)	2029 (USA)	2034

Převzato z jednání se Skupinou ČEZ a ze zdrojů označených poznámkou pod čarou v kapitole 3 této diplomové práce