

**KATEDRA EKONOMIE,
MANAŽERSTVÍ A HUMANITNÍCH
VĚD**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE**



**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
MALÉ MODULÁRNÍ REAKTORY
A FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ
JEJICH VÝVOJ A REALIZACI**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

KVĚTEN 2024

**ADAM
VAVREČKA**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vavrečka** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **510670**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Malé modulární reaktory a faktory ovlivňující jejich vývoj a realizaci

Název bakalářské práce anglicky:

Small modular reactors and factors influencing their development and implementation

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracujte přehled historie významných mezníků vývoje jaderných reaktorů.
- 2) Popište aktuální stav vývoje projektů SMR ve světě.
- 3) Analyzujte faktory úspěchu a neúspěchu výzkumné, vývojové a realizační fáze nových jaderných technologií.
- 4) Vypočtete ukazatele ekonomické efektivity projektu SMR se zohledněním vývojové fáze projektového řešení.

Seznam doporučené literatury:

- 1) HRDÝ, Milan a STROUHAL, Jiří. Finanční management. Vzdělávání účetních v ČR (Institut certifikace účetních). Praha: Institut certifikace účetních, [2018]. ISBN 978-80-87985-13-7.
- 2) SKLENKA, Lubomír. Malé a modulární jaderné reaktory a jejich potenciální využití v České republice: Small and modular reactors and its potential use in the Czech Republic. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05435-2.
- 3) Small Nuclear Power Reactors. [Online].
<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.asp>
- 4) Small Modular Reactors (LWR designs). [Online]. <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr.html>
- 5) Small Modular Reactors. [Online]. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_26297/small-modular-reactors
- 6) KISLINGEROVÁ, Eva a kol. Manažerské finance. C.H. Beck, 2010, Praha.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jakub Líman, Ph.D. ČEZ, a. s.

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

Datum zadání bakalářské práce: **07.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Jakub Líman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

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 22. května 2024

.....

PODĚKOVÁNÍ

Tímto prostřednictvím bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jakubu Límanovi, Ph.D., za ochotné poskytnutí podkladů, cenných rad a zajímavých podnětů, jakožto i za čas, který mi věnoval. Děkuji také Mgr. Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D., jehož rady a podpora mi při psaní této práce velice pomohly a často přesahovaly její obsah. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, která mě při mém studiu vždy podporovala a psaní bakalářské práce v tomto ohledu nebylo výjimkou, vážím si toho.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje faktorům ovlivňujícím vývoj a realizaci malých modulárních reaktorů. V práci jsou tyto faktory určeny na základě porovnání aktuálního stavu projektů malých modulárních reaktorů a historických projektů prvních komerčních jaderných elektráren, společně s analýzou inovativních jaderných projektů. Práce obsahuje přehled časového vývoje prvních jaderných reaktorů pro komerční využití se změřením na jednotlivé typy reaktorů. Ve stejném formátu je v práci zpracován i aktuální stav vývoje jaderných reaktorů s technologií malých modulárních reaktorů.

V ekonomické části této práce je z projektového hlediska rozpracována ekonomická analýza projektu tlakovodního malého modulárního reaktoru v České republice, zohledňující náklady výzkumné a vývoje fáze pro dané technické řešení. V závěru této části byly provedeny citlivostní analýzy pro určení dopadů změn klíčových vstupních parametrů do ekonomické efektivity projektu.

Klíčová slova: malý modulární reaktor, SMR, faktory úspěchu a neúspěchu, ekonomická analýza, kritéria ekonomické efektivity, bakalářská práce, ČVUT FEL

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on the factors influencing the development and implementation of small modular reactors. These factors are identified by comparing the current status of small modular reactor projects and historical projects of the first commercial nuclear power plants, as well as by an analysis of innovative nuclear projects. The thesis includes an overview of the development of the first commercial nuclear reactors with an emphasis on different reactor types. Thesis also presents the current state of development of nuclear reactors with small modular reactor technology with the same scheme as in the previous point.

The economic part of this thesis contains economic analysis of the pressurized water small modular reactor project situated in Czech Republic, which takes account of costs of research and development phase of the design. Finally, a sensitivity analysis was performed to determine the effects of changing crucial inputs on the economic efficiency of the project.

Keywords: small modular reactor, SMR, factors of success and failure, economic analysis, economic evaluation, bachelor thesis, CTU FEE

OBSAH

ÚVOD	1
KAPITOLA 1: PŘEHLED HISTORIE VÝVOJE JADERNÝCH REAKTORŮ	2
1.1 MOTIVACE VYUŽITÍ ENERGIE JADERNÉHO ŠTĚPENÍ	2
1.2 ZÁKLADY TEORIE JADERNÉHO ŠTĚPENÍ	3
1.2.1 ŠTĚPNÁ JADERNÁ REAKCE.....	3
1.3 VÝVOJ JADERNÝCH REAKTORŮ VE 20. STOLETÍ	4
1.3.1 PRVNÍ VÝZKUMNÉ REAKTORY	4
1.3.2 VOJENSKÉ VYUŽITÍ JADERNÝCH REAKTORŮ	4
1.3.3 PŘECHOD K MÍROVÉMU VYUŽITÍ JADERNÉ ENERGIE.....	6
1.3.3.1 Situace v USA	6
1.3.3.2 Situace v SSSR.....	7
1.3.4 TYPY JADERNÝCH REAKTORŮ.....	7
1.3.4.1 Tlakovodní reaktory (PWR, VVER)	8
1.3.4.2 Varné reaktory (BWR).....	9
1.3.4.3 Lehkovodní grafitové reaktory (LWGR, RBMK).....	10
1.3.4.4 Těžkovodní reaktory (PHWR).....	11
1.3.4.5 Plynem chlazené reaktory (GCR)	11
1.3.4.6 Rychlé množivé reaktory (FBR).....	12
1.3.4.7 Reaktory chlazené tekutými solemi (MSR).....	13
1.3.5 NÁSTUP KOMERČNÍCH JADERNÝCH REAKTORŮ	16
1.3.5.1 Generace komerčních jaderných reaktorů.....	16
1.3.5.2 Elektrárna Calder Hall	17
1.3.6 PŘEHLED VÝZNAMNÝCH MEZNÍKŮ VE VÝVOJI JADERNÝCH REAKTORŮ PO NÁSTUP REAKTORŮ II. GENERACE.....	19
KAPITOLA 2: AKTUÁLNÍ STAV PROJEKTŮ SMR VE SVĚTĚ	20
2.1 MOTIVACE VYUŽITÍ TECHNOLOGIE SMR	20
2.1.1 REDUKCE POČÁTEČNÍCH INVESTIC A SNÍŽENÍ RIZIK.....	20
2.1.2 ZKRÁCENÍ DOBY VÝSTAVBY.....	20
2.1.3 KOMPATIBILITA S MENŠÍMI ELEKTRICKÝMI SÍTĚMI.....	20
2.1.4 ÚROVEŇ BEZPEČNOSTI.....	21
2.2 ZÁKLADY KONCEPTU SMR	21
2.2.1 MODULARITA VÝKONOVÝCH MODULŮ.....	21
2.2.2 MODULARITA KOMPONENT.....	22
2.3 JADERNÉ REAKTORY S TECHNOLOGIÍ SMR	22
2.3.1 VÝZKUM A VÝVOJ V OBLASTI SMR.....	22
2.3.2 FORMY FINANCOVÁNÍ PROJEKTŮ SMR.....	23
2.3.2.1 Veřejné a soukromé financování.....	23
2.3.2.2 Motivace financování projektů SMR	23
2.3.2.3 Způsoby financování.....	23
2.3.3 STAV PROJEKTŮ SMR VE SVĚTĚ.....	25
2.3.3.1 Vodou chlazené (WCR) SMR	25
2.3.3.2 SMR chlazené vysokoteplotními plynem (HTGR).....	26
2.3.3.3 SMR chlazené tekutými kovy (LMFR)	27
2.3.3.4 SMR chlazené tekutými solemi (MSR)	27
2.3.3.5 NuScale.....	28
2.3.3.6 KLT-40S.....	30

2.3.3.7	HTR-PM	31
2.4	KOMERČNÍ VYUŽITÍ TECHNOLOGIE SMR	32
2.4.1	LICENCOVÁNÍ.....	32
KAPITOLA 3: FAKTORY ÚSPĚCHU A NEÚSPĚCHU VÝZKUMNÉ, VÝVOJOVÉ A REALIZAČNÍ FÁZE NOVÝCH JADERNÝCH TECHNOLOGIÍ		35
3.1	FAKTORY ÚSPĚCHU A NEÚSPĚCHU JADERNÝCH PROJEKTŮ	35
3.1.1	ÚSPĚŠNÉ PROJEKTY.....	35
3.1.1.1	Shippingport.....	35
3.1.1.2	Novovoronež II.....	36
3.1.2	NEÚSPĚŠNÉ PROJEKTY.....	38
3.1.2.1	Molten Salt Breeder Reactor (MSBR).....	38
3.1.2.2	Superphénix.....	39
3.2	POROVNÁNÍ PROJEKTŮ SMR S PROJEKTY PRVNÍCH PROTOTYPŮ JE	40
3.2.1	MOTIVACE A ZAPOJENÍ STÁTŮ.....	40
3.2.2	FINANCOVÁNÍ PROJEKTŮ	41
3.2.3	RIZIKA.....	41
3.2.3.1	Finanční rizika.....	41
3.2.3.2	Bezpečnostní rizika	42
3.2.3.3	Riziko podpory veřejnosti	42
3.3	FAKTORY ÚSPĚCHU A NEÚSPĚCHU PROJEKTŮ SMR	43
3.3.1	SYSTÉM A MÍRA FINANČNÍ PODPORY STÁTU.....	43
3.3.2	MNOHO TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ SMR S RŮZNÝMI TECHNOLOGEMI.....	43
3.3.3	PROBLÉM S REALIZACÍ PROJEKTŮ FOAK.....	44
3.3.4	ZAJIŠTĚNÍ DODAVATELSKÉHO ŘETĚZCE.....	44
3.3.5	LICENCE V ZEMI PŮVODU	44
KAPITOLA 4: DOPAD NÁKLADŮ VÝZKUMNÉ A VÝVOJOVÉ FÁZE DO EKONOMICKÉ EFEKTIVNOSTI PROJEKTŮ SMR		45
4.1	EKONOMICKÝ MODEL PWR SMR	45
4.1.1	VSTUPNÍ INFORMACE.....	45
4.1.2	UVAŽOVANÉ VARIANTY IMPLEMENTACE VaV FÁZE	46
4.1.3	INVESTICE.....	47
4.1.4	PROVOZNÍ NÁKLADY.....	47
4.1.5	FINANCOVÁNÍ.....	47
4.1.6	PRODEJ ELEKTRĚNY.....	48
4.1.7	OSTATNÍ VSTUPY EKONOMICKÉHO MODELU	48
4.1.7.1	Výpočet diskontní míry.....	48
4.1.8	KRITÉRIA EKONOMICKÉ EFEKTIVNOSTI.....	50
4.1.8.1	Čistá současná hodnota (NPV).....	50
4.1.8.2	Vnitřní výnosové procento (IRR).....	50
4.1.8.3	Doba návratnosti (PP).....	51
4.1.8.4	Diskontovaná doba návratnosti (DPP).....	51
4.1.8.5	Roční ekvivalentní peněžní tok (RCF)	51
4.1.9	EKONOMICKÁ EFEKTIVNOST JEDNOTLIVÝCH VARIANT PROJEKTU.....	52
4.1.10	CITLIVOSTNÍ ANALÝZY.....	53
4.1.10.1	Implementace VaV fáze a instalovaný výkon.....	54
4.1.10.2	Diskontní míra	54
4.1.10.3	Měrné investiční náklady	55
4.1.10.4	Eskalace ceny elektřiny.....	55

4.1.10.5 Implementace VaV fáze a úroková sazba	56
ZÁVĚR	57
LITERATURA	58
PŘÍLOHA A: SEZNAM ZKRATEK	62
PŘÍLOHA B: EKONOMICKÝ MODEL – VÝPOČTY	64

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Transmutace plutonia ^{239}Pu	2
Obr. 1-2 Štěpná reakce jádra izotopu uranu ^{235}U	3
Obr. 1-3 Schématické znázornění pohonu jaderného plavidla s PWR reaktorem.....	5
Obr. 1-4 Komponenty JE s reaktorem typu PWR.....	8
Obr. 1-5 Koncept elektrárny s BWR reaktorem	9
Obr. 1-6 Schéma reaktoru typu RBMK.....	10
Obr. 1-7 Schéma MSRE	15
Obr. 1-8 Generace jaderných reaktorů	17
Obr. 1-9 Časová osa vývoje jaderných reaktorů po reaktory II. Generace.....	19
Obr. 2-1 Rozdělení jaderných reaktorů dle elektrického výkonu.....	21
Obr. 2-2 Schéma hotovostních toků při financování jaderných projektů	24
Obr. 2-3 Model elektrárny s moduly NuScale	28
Obr. 2-4 Vývoj LCOE u projektu CFPP	29
Obr. 2-5 Konstrukce reaktoru KLT-40S.....	30
Obr. 2-6 Schéma elektrárny s dvěma moduly HTR-PM.....	31
Obr. 3-1 Průzkum postoje veřejnosti k jaderné energetice v dané zemi.....	42
Obr. 4-1 Kumulované diskontované hotovostní toky jednotlivých variant projektu při výchozích vstupních hodnotách.....	53
Obr. 4-2 Závislost RCF na implementaci VaV fáze a instalovaném výkonu	54
Obr. 4-3 Závislost NPV na diskontní míře.....	54
Obr. 4-4 Závislost NPV na měrných investičních nákladech.....	55
Obr. 4-5 Závislost RCF na eskalaci ceny elektřiny	55
Obr. 4-6 Závislost DPP na implementaci VaV fáze a úrokové sazbě	56

SEZNAM TABULEK

Tab. 1-1 Přehled výzkumné a vývojové fáze jednotlivých typů jaderných reaktorů.....	15
Tab. 1-2 Parametry elektrárny Calder Hall	18
Tab. 2-1 Formy financování jaderných projektů.....	25
Tab. 2-2 Aktuální projekty SMR s vodním chlazením	26
Tab. 2-3 Aktuální projekty SMR s plyným chlazením.....	26
Tab. 2-4 Aktuální projekty SMR chlazené tekutými kovy.....	27
Tab. 2-5 Aktuální projekty SMR chlazené tekutými solemi.....	28
Tab. 2-6 Přehled jaderných regulačních organizací v jednotlivých státech.....	33
Tab. 2-7 Průběh licencování SMR v jednotlivých státech.....	34
Tab. 3-1 Technické parametry elektrárny Shippingport.....	35
Tab. 3-2 Technické parametry elektrárny Novovoronež II	37
Tab. 3-3 Technické parametry konceptu elektrárny s MSBR	38
Tab. 3-4 Technické parametry elektrárny Superphénix.....	39
Tab. 4-1 Plán nasazení SMR ve VB do roku 2050.....	46
Tab. 4-2 Přehled variant implementace VaV fáze pro ekonomický model	46
Tab. 4-3 Přehled provozních nákladů PWR SMR.....	47
Tab. 4-4 Přehled finančních vstupů projektu PWR SMR	48
Tab. 4-5 Ostatní vstupy ekonomického modelu	48
Tab. 4-6 Hodnoty pro výpočet WACC	49
Tab. 4-7 Výsledky hodnocení ekonomické efektivity projektu	52

ÚVOD

Energetický sektor v současnosti prochází obdobím zásadních změn a hledání nových řešení. Rychle postupující elektrifikace prakticky ve všech odvětvích klade stále větší požadavky na množství produkované elektrické energie a její bezpečné dodávky. Kombinace nových politicko-ekologických konceptů a geopolitických událostí poslední doby přispěla však především v evropském prostředí k tomu, že toto období nazýváme dokonce energetickou krizí. Současný odstup od fosilních zdrojů je v tomto světle předčasný a neexistuje jistota úspěšného nahrazení těchto zdrojů, jež stále pokrývají většinu celosvětové poptávky po energii.

Potenciálním řešením této situace může být výstavba nových jaderných zdrojů, jejíž zásadní překážkou je ovšem otázka financování společně s dobou přípravy a realizace projektů. Koncept malých modulárních reaktorů („*Small Modular Reactor*“ – SMR) se zaměřuje na eliminaci těchto rizikových faktorů a představuje v tomto ohledu evoluci jaderné energetiky. Současná komplexnost a komplikovanost projektů nových jaderných zařízení však ztěžuje nástup komerčního využívání této technologie.

Nástup nových technologií v jaderné energetice představoval obrovská rizika i v počátcích komerčního využívání jaderných reaktorů. Analýza přístupů k problematice a získaných zkušeností z této doby může alokovat rizikové faktory v současném přístupu k zahájení širšího komerčního využívání SMR v energetice, doporučit čemu se vyvarovat a na co se v tomto procesu zaměřit.

KAPITOLA 1: PŘEHLED HISTORIE VÝVOJE JADERNÝCH REAKTORŮ

1.1 MOTIVACE VYUŽITÍ ENERGIE JADERNÉHO ŠTĚPENÍ

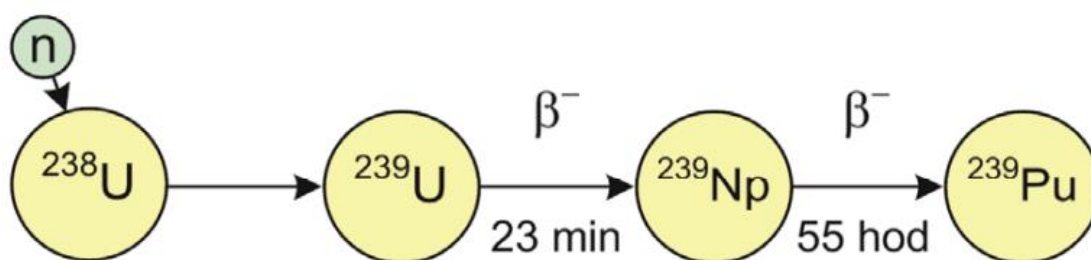
V roce 1939 činila celosvětová roční spotřeba elektrické energie 429 TWh, přičemž byla většinou pokryta uhelnými a průtočnými vodními elektrárnami [1].

Koncem roku 1938 dokázali němečtí vědci Otto Hahn a Fritz Strassmann při experimentu jako první rozštěpit jádro izotopu¹ uranu ^{235}U , pomocí ostřelování jader těchto izotopů neutrony. Hahn a Strassmann ukázali, že při štěpení se uvolňuje velké množství energie a také další neutrony, které mohou být využity pro štěpení dalších jader uranu a samoudržitelnou² řetězovou reakci vedoucí k uvolnění obrovského množství energie (viz 1.2.1) [2].

Tento objev odstartoval sérii dalších výzkumů, které mimo jiné prokázaly následující [2]:

- Štěpení probíhá účinněji s pomalými³ než s rychlými⁴ neutrony.
- Při práci s pomalými neutrony je jaderné štěpení možné u izotopu uranu ^{235}U , jehož obsah v přírodním uranu je 0,7 %. Štěpení jádra izotopu ^{238}U , jehož koncentrace v přírodním uranu je 99,3 %, je možné především rychlými neutrony.
- Přidáním materiálu absorbujícího uvolněné neutrony, zabraňujícího jejich dalšímu množení, je možné štěpnou reakci řídit.

Na začátku 40. let 20. století byl lidstvu znám způsob uvolnění energie z látky, kterým lze získat přibližně milionkrát více energie než chemickou reakcí hoření. Brzy po objevu a předběžném pochopení štěpné reakce začala 2. světová válka. V této souvislosti bylo původní využití jaderné energie motivováno vojensky. Primární zaměření nově zahájených jaderných programů byla výroba izotopu plutonia ^{239}Pu , který je vhodným materiálem pro výrobu jaderné bomby. Izotop plutonia ^{239}Pu lze v jaderných reaktorech získat zachycením neutronu na atomu izotopu uranu ^{238}U a následným radioaktivním rozpadem (viz Obr. 1-1) [3].



Obr. 1-1 Transmutace plutonia ^{239}Pu [4]

¹ Izotop daného prvku má stejné atomové číslo (stejný počet protonů v jádře), ale liší se v čísle neutronovém (různý počet neutronů v jádře).

² Řetězovou reakci nazveme samoudržitelnou, pokud počet neutronů při této reakci v určitém časovém intervalu uvolněných je roven nebo přesahuje počet neutronů, které jsou v tomto intervalu absorbovány neštěpným materiálem nebo opustí daný systém.

³ Pomalými (tepelnými) neutrony označujeme neutrony s energií do 0,5 eV.

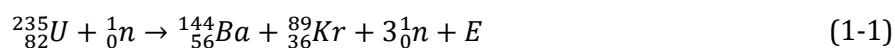
⁴ Rychlými neutrony označujeme neutrony s energií nad 800 keV do, přibližně, 17 MeV.

1.2 ZÁKLADY TEORIE JADERNÉHO ŠTĚPENÍ

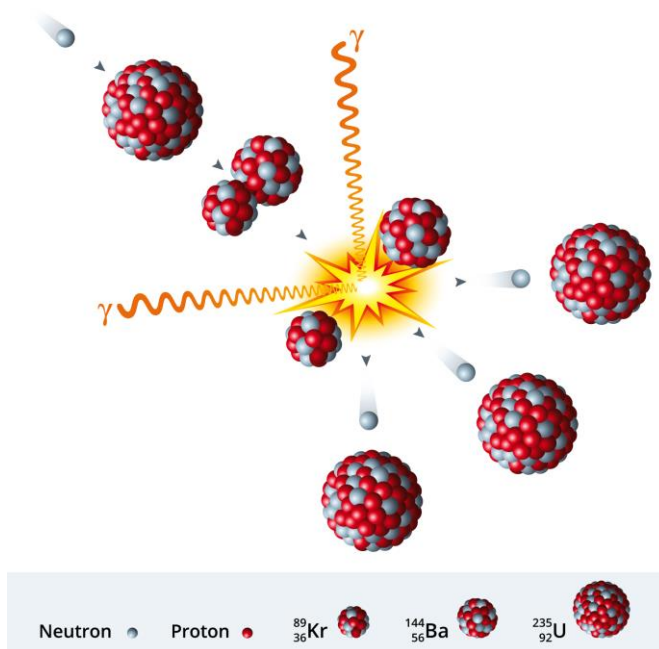
1.2.1 ŠTĚPNÁ JADERNÁ REAKCE

Jadernými reakcemi nazýváme přeměnu atomového jádra vnějším působením elementárních částic nebo jiného jádra. Přeměnou jádra je myšleno vyslání částice z jádra, rozštěpení či roztržení jádra a změna energetických hladin nukleonů⁵. Jaderné štěpení je typ neutronové jaderné reakce, při které se vlivem zasažení jádra atomu neutronem zvýší energie jádra na tzv. excitační energii, která je vyšší než vazební energie jádra⁶. Jádro se rozdělí na menší části (fragmenty) a dva nebo tři volné neutrony. Při jednom štěpení izotopu uranu ^{235}U se uvolní velké množství energie. Uvolněné neutrony umožňují vyvolat další štěpnou reakci. Série těchto štěpných reakcí je nazývána řetězovou reakcí [4].

Z hlediska využití jaderného štěpení v energetice má význam především štěpení atomových jader izotopů ^{235}U a ^{239}Pu . Jako příklad bude uvedena štěpná reakce izotopu uranu, jejímiž štěpnými produkty jsou nejčastěji izotopy barya a kryptonu. Tuto reakci lze schematicky popsat následovně:



„Při štěpné reakci, musí platit rovnost mezi počtem protonů v původním jádře a vzniklých štěpných produktech a také rovnost mezi počtem neutronů v původním jádře, zvýšený o jeden (aktivující štěpnou reakci), a počtem neutronů ve štěpných produktech spolu s počtem neutronů uvolněných při štěpení [4].“



Obr. 1-2 Štěpná reakce jádra izotopu uranu ^{235}U [5]

⁵ Nukleony nazýváme těžké částice (hadrony), ze kterých se skládá jádro atomu, tedy protony a neutrony.

⁶ Vazební energie atomového jádra je energie, kterou je potřeba dodat atomovému jádru, aby mohlo být rozloženo na volné nukleony.

1.3 VÝVOJ JADERNÝCH REAKTORŮ VE 20. STOLETÍ

1.3.1 PRVNÍ VÝZKUMNÉ REAKTORY

O realizaci prvního výzkumného jaderného reaktoru se zasloužili fyzikové Enrico Fermi a Leo Szilard. Tým vedený Fermim v roce 1942 postavil na půdě Chicagské univerzity reaktor tvořený několika vrstvami grafitových briket, v nichž bylo umístěno uranové palivo. Štěpná reakce byla řízena kadmiovými tyčemi, které plnily roli absorbátoru neutronů. Projekt s názvem Chicago Pile-1 byl prvním jaderným reaktorem v němž bylo dosaženo řízené štěpné reakce. V reaktoru Chicago Pile-1 bylo rovněž dosaženo samoudržitelné štěpné reakce [3][6].

Výzkum na reaktoru Chicago Pile-1 byl součástí projektu Manhattan⁷, zaměření výzkumu bylo tedy na využití energie jaderného štěpení ve vojenství. Při experimentech na reaktoru Chicago Pile-1 bylo dosaženo maximálního tepelného výkonu 200 Wt. Ještě před samotnou demonstrací štěpné řetězové reakce v tomto reaktoru, vznikaly plány mnohem větších reaktorů, jejichž účelem měla být výroba plutonia (viz 1.1). V listopadu roku 1943 byl v Oak Ridge v Tennessee uveden do provozu pilotní reaktor o výkonu 1 MWt a o necelý rok později v září 1944 byl spuštěn reaktor v rezervaci Hanford ve státě Washington, jehož výkon dosahoval 200 MWt. V porovnání s reaktorem Chicago Pile-1 bylo tedy dosaženo milionkrát většího tepelného výkonu, a to v rozmezí 2 let [3].

Výzkumný reaktor, v němž bylo dosaženo řízené štěpné reakce vlastnil od roku 1946 i Svaz sovětských socialistických republik (SSSR). Reaktor F-1 byl zároveň prvním jaderným reaktorem v Evropě. Projekt tohoto reaktoru byl pokračováním jaderného výzkumu, který probíhal během 2. světové války pod záštitou Zvláštního Výboru při Státním výboru obrany SSSR. Jednalo se tedy rovněž o výzkum pro účel realizace jaderných zbraní [7].

1.3.2 VOJENSKÉ VYUŽITÍ JADERNÝCH REAKTORŮ

Využívání energie jaderného štěpení ve vojenství nebylo orientováno pouze na vývoj jaderných bomb. Ve 40. letech 20. století byl ve Spojených státech amerických (USA) a SSSR zahájen výzkum v oblasti využití energie jaderného štěpení v námořnictvu, pro účel pohonů vojenských plavidel [8].

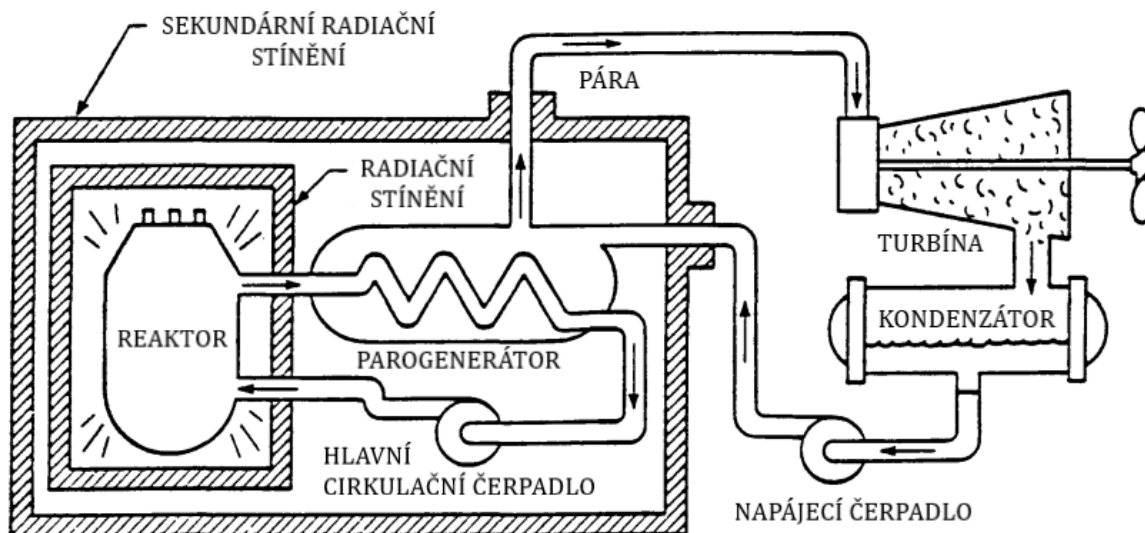
Využití jaderné energie v pohonech vojenských plavidel bylo pro vývoj jaderných reaktorů zcela zásadní, jelikož přispělo k vývoji tlakovodních reaktorů („*Pressurized Water Reactor*“ – PWR) (viz 1.3.4.1), které se následně i díky pokročilému vývoji v této oblasti staly nejčtenějším typem komerčních jaderných reaktorů. Jaderné pohony vojenských plavidel byly založeny na řízené štěpné reakci. To představovalo oproti neřízené štěpné reakci, využívané v jaderných zbraních, značný vědecký a technický pokrok. Jaderný reaktor byl zvolený jako vhodný zdroj energie pro pohony vojenských plavidel, jelikož zajišťuje dlouhodobý provoz plavidla na moři bez nutnosti doplňování paliva. V případě ponorek využití jaderného reaktoru zároveň značně zvýšilo jejich výkon. Jaderné ponorky byly schopné udržovat rychlost 20–25 uzlů⁸ pod mořskou hladinou, bez potřeby vzduchu pro diesellové motory nabíjejících baterie pro elektrické systémy [8].

Prvním plavidlem s jaderným pohonem uvedeným do provozu byla americká ponorka USS Nautilus. Tato ponorka byla poháněna tlakovodním reaktorem S2W, jež byl pro Námořnictvo Spojených států amerických vyroben společností Westinghouse Electric Corporation a při plném výkonu byl schopný na hřídel turbíny dodávat výkon 10 MW. Palivem reaktoru S2W byl vysoce

⁷ Projekt Manhattan byl tajný americký vládní projekt během 2. světové války, jehož cílem byla konstrukce a test americké jaderné bomby.

⁸ Uzel je jednotka rychlosti, užívaná v námořní dopravě, odpovídající přibližně 1,85 km/h.

obohacený uran⁹ (míra obohacení 93 %). Vysoká míra obohacení byla spojena s velkým množstvím štěpného materiálu v aktivní zóně (AZ) reaktoru. V důsledku toho dosahoval jaderný reaktor v této ponorce vysokého výkonu při dlouhé životnosti paliva. Díky vysoké míře obohacení paliva bylo rovněž možné použití paliva o menším objemu, což zmenšovalo nároky na velikost AZ reaktoru. Jaderná ponorka USS Nautilus byla do provozu uvedena v roce 1955 [8].



Obr. 1-3 Schématické znázornění pohonu jaderného plavidla s tlakovodním reaktorem [9]

V souvislosti s probíhající Studenou válkou začala v 50. letech 20. století výstavba jaderného loďstva v USA a v SSSR. Dalšími zeměmi, které ve 20. století vybudovaly vojenské jaderné loďstvo byly Spojené království Velké Británie a Severního Irska (VB), Francie a Čínská lidová republika (ČLR). Výzkumná a vývojová činnost spojená s tímto využitím jaderných reaktorů byla financována ze státního rozpočtu v případě všech výše zmíněných států [3][8].

Výzkum jaderných reaktorů pro vojenské účely nebyl orientován pouze na reaktory chlazené vodou (WCR). V roce 1954 se v Národních laboratořích Oak Ridge („Oak Ridge National Laboratory“ – ORNL) ve státě Tennessee v USA úspěšně uskutečnil „The Aircraft Reactor Experiment“ (ARE). Tento experiment byl součástí programu „Aircraft Nuclear Propulsion“ (ANP), založeného Komisí pro atomovou energii Spojených států amerických („United States Atomic Energy Commission“ – AEC). Účelem experimentu bylo zkonstruovat reaktor chlazený tekutými solemi („Molten Salt Reactor“ – MSR) (viz 1.2.4.8) a otestovat jeho možné použití jako zdroje energie pohonu vojenského letadla. Reaktor obsahoval palivo složené z fluoridu sodného NaF, fluoridu zirkoničitého ZrF_4 a vysoce obohaceného fluoridu uraničitého UF_4 , kapalná palivová směs byla v reaktoru cirkulována přes AZ, kde probíhala štěpná reakce. Pro odvod tepla z reaktoru bylo použito helium, kterému palivová směs předávala energii v tepelném výměníku. Moderátorem¹⁰ v reaktoru byl oxid beryllnatý BeO , stejný materiál byl použit i jako reflektor¹¹. Odvod tepla z reflektoru zajišťoval okruh tekutého sodíku. Maximální výkon dosažený reaktorem ARE během trvalého provozu byl 2,5 MWt. V rámci programu ANP nebyl nikdy reaktor ARE použit jako pohon

⁹ Obohacováním uranu nazýváme proces zvyšování koncentrace štěpného izotopu ^{235}U .

¹⁰ Moderátor je materiál, který se používá ke zpomalení nebo termalizaci neutronů, jež se uvolňují při jaderných reakcích v palivu reaktoru.

¹¹ Reflektorem, v kontextu jaderného štěpení nazýváme materiál, jež slouží k odrazu neutronů uvolněných při jaderné štěpné reakci.

vojenského letadla, byl ovšem prvním reaktorem MSR na světě a motivoval další vývoj této technologie [10].

1.3.3 PŘECHOD K MÍROVÉMU VYUŽITÍ JADERNÉ ENERGIE

Použití jaderných zbraní na konci 2. světové války tragicky demonstrovalo dopady využití obrovské energie vzniklé při jaderném štěpení. Vývoj jaderných zbraní dále pokračoval i po válce a výzkumu jaderných reakcí bylo věnováno stále více pozornosti i prostředků. S přibývajícím znalostmi v oblasti jaderné fyziky a zkušenostmi s provozem prvních jaderných reaktorů začalo být uvažováno i energetické využití tepla, získaného při štěpné reakci v jaderných reaktorech [2].

1.3.3.1 Situace v USA

V roce 1946 založil Kongres Spojených států amerických AEC. Úkolem AEC bylo dohlížet nad vojenským i civilním využitím jaderné energie. Organizace v roce 1949 objednala analytickou studii, jejímž účelem bylo zjištění co nejpravděpodobnější predikce světové poptávky po energii v následujících 50 až 100 letech. Výsledky této studie měly zásadní vliv na vývoj energetického využití jaderné energie v USA a lze shrnout do následujících bodů [3]:

- Očekávaný nárůst světové populace značně zvýší poptávku po energii a účinnosti dodávek energie.
- Omezené zásoby fosilních paliv nemusí být v budoucnu dostatečné na pokrytí poptávky po energii, při jejich využití jako hlavního zdroje energie.
- Oxid uhličitý CO₂, jež je produktem spalování fosilních paliv, může mít ve zvýšeném množství v zemské atmosféře vliv na změny klimatu.
- V budoucnosti bude zapotřebí najít nový, levný hlavní zdroj energie, který nahradí v této roli fosilní paliva.
- Zásoby jaderného paliva jsou dostatečné.

Prvním jaderným reaktorem, který úspěšně produkoval využitelnou elektrickou energii byl reaktor EBR-1 („*Experimental Breeder Reactor-1*“), který byl poprvé spuštěn v prosinci roku 1951. EBR-1 byl rychlý množivý reaktor (viz 1.3.4.6) chlazený slitinou sodíku a draslíku. Účelem experimentu bylo demonstrovat, že tento reaktor dokáže produkovat více jaderného paliva, než spotřebuje, při současné produkci elektrické energie. Reaktor 20. prosince 1951 napájel čtyři žárovky o příkonu 200 W a úspěšně tak demonstroval perspektivu jaderných reaktorů ve výrobě elektřiny [11].

V roce 1953 pronesl americký prezident Dwight D. Eisenhower před Valným shromážděním OSN řeč, známou jako „*Atoms for Peace Speech*“. V této řeči prezident Eisenhower rozebíral vedle nebezpečí atomové války i možné civilní využití jaderné energie v [12]:

- zemědělství (využití radioizotopů pro šlechtění a ochranu zemědělských plodin),
- medicíně (využití radioaktivních materiálů na ozařování tkání lidského těla)
- a především výrobě elektrické energie (přeměna tepelné energie získané v jaderném reaktoru na elektřinu prostřednictvím systému turbína–generátor).

Eisenhower v této řeči rovněž přišel s myšlenkou založení mezinárodní agentury pro atomovou energii, jejímž posláním by byla podpora mírového využití jaderné energie. Tato myšlenka byla realizována v roce 1957, kdy byla založena IAEA („*International Atomic Energy Agency*“) [12].

Použití jaderné energie v oblasti energetiky v USA zpočátku zpomalovalo několik faktorů [3]:

- Dostatek levných fosilních paliv

- Technické znalosti pod přísnou regulací AEC (mnoho aspektů udržováno v tajnosti kvůli vojenským vazbám)
- Nejasné role vlády a soukromého sektoru ve vývoji jaderné energetiky;
- Nebylo jasné, jaký typ technologie reaktoru (viz 1.3.4) je pro energetické využití nejvhodnější

1.3.3.2 Situace v SSSR

Ekonomický rozvoj SSSR byl v první polovině 20. století založen na využití fosilních paliv z vlastních zdrojů. Naleziště těchto energetických zdrojů byla však z 80 % koncentrována ve východní části země, přičemž 75 % spotřebitelů energie se nacházelo v její západní části. S používáním těchto energetických zdrojů byl tedy spojen problém s jejich transportem. Jako efektivní řešení tohoto problému se ukázalo využití jaderného paliva, jako zdroje energie [13].

Návrhy na využití jaderného štěpení na výrobu elektrické energie byly z akademické sféry v SSSR vznášeny opakovaně již během 2. světové války. V roce 1946 byl ve městě Obninsk založen „*Fiziko-Energetičeskij Institut*“ (FEI), jehož účelem byl výzkum a vývoj (VaV) v oblasti využití jaderné energie. Prioritou jaderného programu v SSSR po 2. světové válce byl však vývoj jaderných zbraní. Zlom nastal rok po úspěšném testu sovětské jaderné bomby v roce 1949, kdy byla na půdě FEI v Obninsku zahájena výstavba vůbec první jaderné elektrárny (JE) na světě. Pro jaderný reaktor této JE AM-1 („*Atom Mirny*“) byla zvolena technologie kanálového reaktoru (viz 1.3.4.3) s grafitovým moderátorem a reflektorem. Reaktor byl chlazený vodou a dosahoval tepelného výkonu 30 MWt. První připojení elektrárny k elektrické síti proběhlo 27. června 1954. Tato elektrárna byla schopna dosahovat elektrického výkonu 5 MWe. Úspěch tohoto projektu implikoval zvýšenou podporu jaderné energetiky sovětskou vládou a s tím spojené plány na výstavbu energetických zdrojů tohoto typu v evropské části SSSR [2][14].

1.3.4 TYPY JADERNÝCH REAKTORŮ

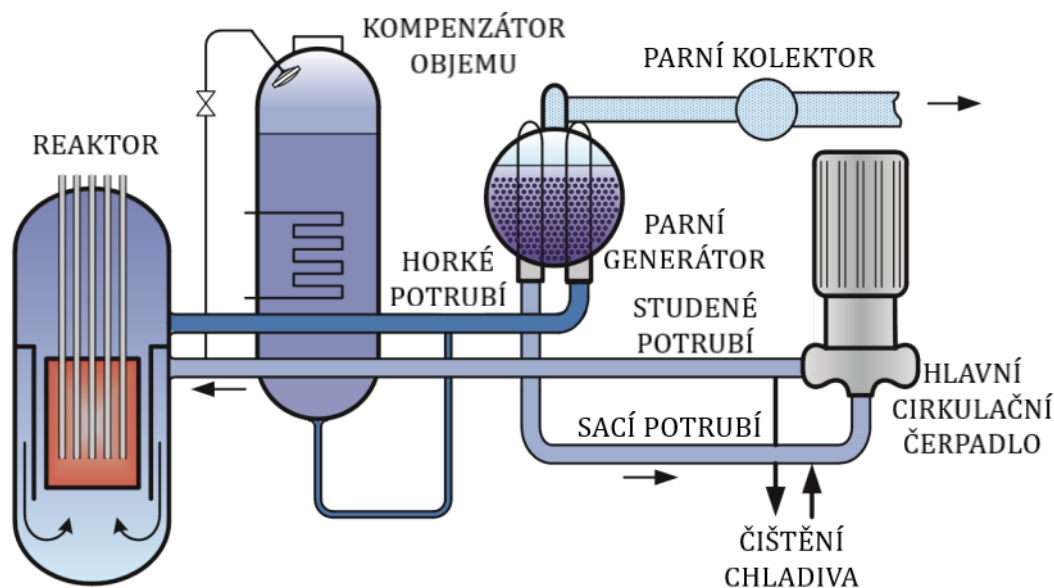
Pro účely této kapitoly se následující specifikace vztahují k typům reaktorů vyvíjených v 50. a 60. letech 20. století. Uveden je rovněž postup vývoje v zemích, které byly ve zmíněném období na vývoj daného typu reaktorů ve svém jaderném programu zaměřeny. Rozdělení reaktorů do jednotlivých typů je provedeno na základě použitého materiálu chladiwa reaktoru, respektive technickoprovozních parametrů reaktoru. Pro účel následujícího textu je rovněž potřeba definovat rozdělení jaderných reaktorů dle jejich účelu.

Dle účelu jsou jaderné reaktory rozděleny následovně [4][15]:

- **Výzkumné reaktory** – Jejich funkcí je především výzkum v oblasti jaderné fyziky, testování materiálů a produkce neutronů pro použití v dalším výzkumu a jiných odvětvích. Obecně nejsou využívány na výrobu energie.
- **Experimentální (vývojové) reaktory** – Poskytují fyzikální údaje při testování nové technologie reaktorů či inovace stávající technologie. Tyto reaktory jsou provozovány v různých provozních i havarijních stavech, za účelem zjištění bezpečnostních limitů a ověření vlastností použité technologie.
- **Demonstrační reaktory (prototypy)** – Reaktory sloužící k prokázání efektivity a bezpečnosti dané technologie. Mohou být realizovány v plném měřítku nebo v měřítku zmenšeném.
- **Komerční reaktory** – Reaktory v elektrárnách určené výhradně ke komerčnímu využití při výrobě elektrické energie, výrobě tepla pro průmyslové využití nebo komerční výrobě jiných neelektrických produktů.

1.3.4.1 Tlakovodní reaktory (PWR, VVER)

Tlakovodní reaktory jsou podskupinou reaktorů chlazených lehkou vodou („Light Water Reactor“ – LWR). JE s těmito reaktory jsou v zásadě dvouokruhové. Primárním okruhem (PO) protéká lehká voda¹², která zastupuje roli chladiva i moderátoru. Tlak v PO musí bezpečně udržovat chladivo v kapalném skupenství, běžně se pohybuje v rozmezí 10–16 MPa. Chladivo proudí z reaktoru do parogenerátoru (PG), kde předává tepelnou energii vodě v sekundárním okruhu. Oba okruhy jsou uzavřené a cirkulace vody v nich je zajištěna cirkulačními čerpadly. Samotný reaktor je uzavřen do tlakové nádoby, která musí kromě odolnosti vůči vysokému tlaku vykazovat i odolnost vůči vysokým teplotám a radioaktivnímu záření [4].



Obr. 1-4 Komponenty JE s reaktorem typu PWR [4]

Prvotní fáze VaV PWR byla na „západě“ výhradně záležitostí USA. VaV zde probíhal pod záštitou Námořnictva Spojených států amerických a byl orientován na využití tohoto typu reaktorů ve vojenských plavidlech. Výroba obohaceného uranu, který je používán jako palivo u technologie PWR, probíhala po 2. světové válce pouze v USA a SSSR. Pováleční spojenci USA, jmenovitě VB, Francie a Kanada, se, v zájmu státní suverenity, ve VaV jaderných reaktorů rozhodly orientovat vlastní cestou, na níž reaktory typu PWR nebyly hlavním bodem zájmu [3].

Technologie PWR byla americkým námořnictvem vybrána v roce 1950, kdy začal vývoj prototypu reaktoru STR Mark I, který se stal předlohou reaktorům později provozovaným v amerických ponorkách (viz 1.3.2). V roce 1954 byl založen program ANPP („Army Nuclear Power Program“), jehož cílem bylo vyvinout JE, vyrábějící elektřinu pro vojenská zařízení. První prototyp JE s PWR reaktorem SM-1 byl, v rámci programu ANPP, zprovozněn v roce 1957 ve Fort Belvoir ve Virginii. Ve stejném roce byla rovněž k elektrické síti připojena JE Shippingport (viz 3.1.1.1), která byla prvním prototypem JE pro komerční využití s reaktorem typu PWR [3][16].

Reaktory typu VVER („Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor“) vyvíjené v SSSR jsou podskupinou PWR. Výzkum reaktorů pro komerční využití v SSSR nebyl omezený na konkrétní typ. Tlakovodní reaktory typu VVER vychází z reaktorů vyvíjených a provozovaných sovětským námořnictvem jako pohony vojenských i civilních plavidel. V roce 1955 byl pro projekt prvního ledoborce

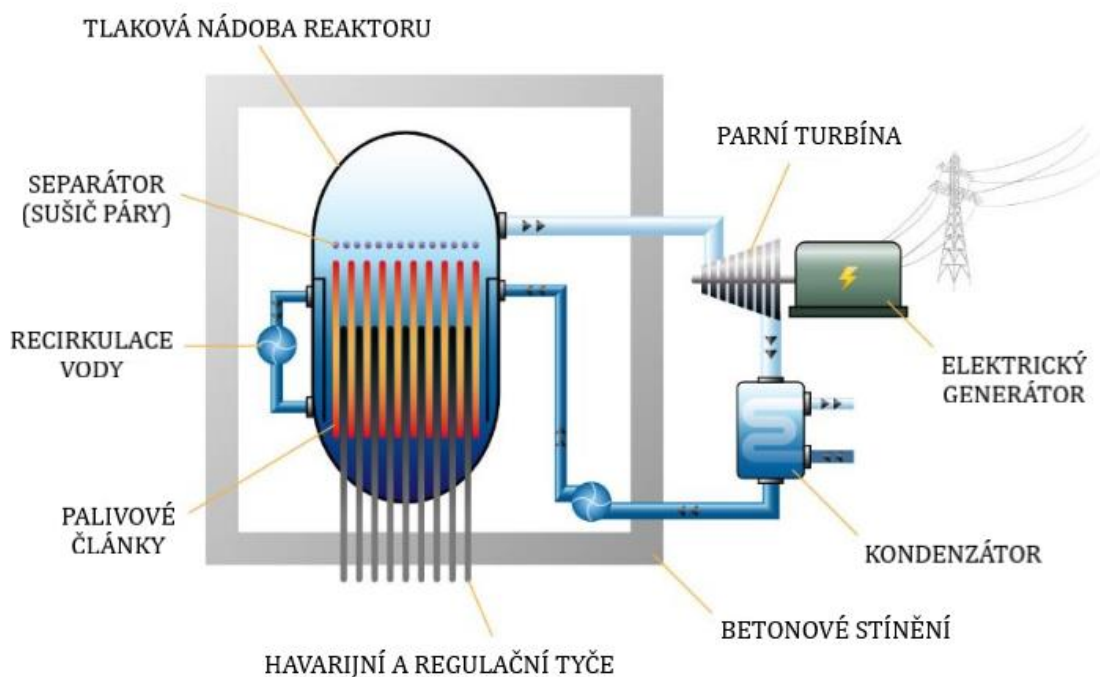
¹² Lehká voda je tvořena molekulami H₂O.

s jaderným pohonem vybrán reaktor PWR. Ledoborec nazvaný Lenin byl uveden do provozu v roce 1959 a stal se prvním civilním plavidlem s jaderným pohonem. Dále pak v SSSR úspěšně probíhala konstrukce civilních i vojenských plavidel s PWR reaktory [17].

Již v roce 1958 byla zahájena výstavba JE Novovoronezh-1. Tento prototyp JE s reaktorem V-120 typu VVER byl poprvé k elektrické síti připojen v roce 1964 a dosahoval elektrického výkonu 197 MWe [17].

1.3.4.2 Varné reaktory (BWR)

Chladivem a moderátorem¹³ je ve varných reaktorech typu BWR („Boiling Water Reactor“) rovněž lehká voda. JE s varnými reaktory jsou jednookruhové. Voda se ve varných reaktorech přeměňuje na sytou páru již v reaktorové nádobě, z toho důvodu je provozní tlak v PO u BWR přibližně poloviční oproti PWR. Pro účely chlazení reaktoru a moderaci neutronů je nutné, aby byl hmotnostní obsah páry v chladivu v PO udržován pod určitou hranicí (asi 14 %). V případě využití pro výrobu elektrické energie se pára vzniklá v AZ reaktoru, po separaci vlhkosti a vysušení, používá přímo k pohonu turbín [4].



Obr. 1-5 Koncept elektrárny s BWR reaktorem [18]

VaV technologie BWR pro energetické využití byl stejně jako u PWR nejprve koncentrován v USA. Oproti PWR byl VaV reaktorů typu BWR opožděn, důvodem bylo upřednostnění PWR pro vojenské účely. Jednookruhový princip BWR a tvorba páry přímo v reaktorové nádobě byly považovány za nestabilní technologii vedoucí k přehřívání reaktoru. Tuto teorii se podařilo vyvrátit v sérii experimentů vedených v Národních laboratořích v Argonne („Argonne National Laboratory“) označených jako BORAX („Boiling Reactor Experiment“). První experimentální reaktor z této série BORAX-1 byl postaven v roce 1953. Při provozu tohoto reaktoru bylo demonstrováno, že tvorba páry v AZ reaktorové nádobě je spolehlivý a účinný proces, kterým je

¹³V některých technických řešeních varných reaktorů byl jako moderátor použit grafit.

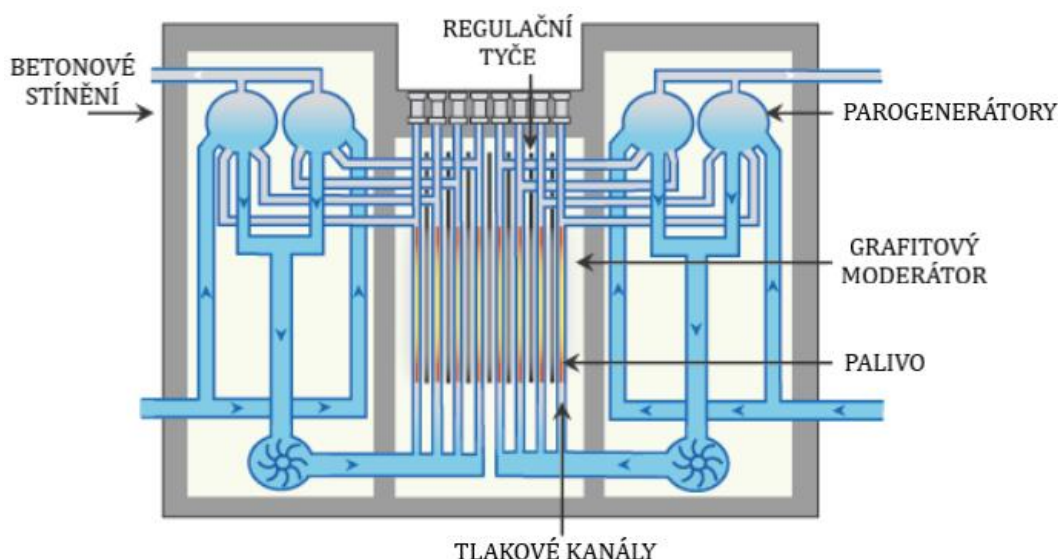
možné omezit výkon reaktoru. Při zvýšeném výkonu totiž dojde k rychlému snížení reaktivity vlivem vyšší koncentrace páry, a tím zhoršené moderace, což má za důsledek zpětný pokles výkonu [19].

V návaznosti na experimentální reaktory BORAX byl v roce 1956 postaven prototyp jaderné elektrárny EBWR („Experimental Boiling Water Reactor“). Tato elektrárna měla demonstrovat, proveditelnost elektráren typu BWR a jejich bezpečný provoz. V elektrárně bylo během experimentálního provozu vyzkoušeno několik typů paliva s nízkou mírou obohacení. Elektrárna byla navržena na tepelný výkon 30 MWt a elektrický výkon 5 MWe. Elektrárna byla úspěšně provozována až do roku 1967 a stala se předlohou pro některé komerční JE, s reaktory typu BWR, v USA, ale ovlivnila i jaderné programy v jiných zemích [19].

Výzkumná a vývojová fáze u technologie BWR je spojena i se společností General Electric (GE). Konkurenční firma Westinghouse Electric Corporation vyvíjela reaktory typu PWR pro námořnictvo, což bylo jedním z důvodů, proč byla GE zvolena technologie BWR. GE se stala první soukromou firmou, která vlastnila jadernou elektrárnu. Byla jí pilotní jaderná elektrárna „Vallecitos Boiling Water Reactor“ (VBWR), jejíž stavba byla dokončena v roce 1957 a sloužila jako pilotní projekt pro pozdější komerční jaderné elektrárny provozované firmou GE [16].

1.3.4.3 Lehkovodní grafitové reaktory (LWGR, RBMK)

Reaktory typu RBMK („Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalny“) jsou specifickým druhem varných reaktorů. Stejně jako u reaktorů BWR je i v tomto případě chladivem lehká voda, která vře v tlakových kanálech reaktoru a následně je ve stejném okruhu separována. Zásadním rozdílem je použití grafitu jako moderátoru. Není zde rovněž potřeba tlakové nádoby, místo které je konstrukce reaktoru založena na tlakových varných kanálech. Tyto kanály prochází AZ reaktoru a jsou v nich uloženy palivové tyče, okolo kterých proudí chladivo. Konstrukční provedení reaktorů RBMK umožňuje dosažení vysokého výkonu a výměnu paliva během provozu reaktoru [4][20].



Obr. 1-6 Schéma reaktoru typu RBMK [20]

Použití grafitu jako moderátoru štěpné reakce v jaderném reaktoru bylo předmětem výzkumu nejen v SSSR, ale i v ostatních zemích. Ostatně tento materiál byl použit jako moderátor i u prvních výzkumných reaktorů (viz 1.3.1). Použití tohoto typu moderátoru ve výzkumných reaktorech

v SSSR mělo svůj původ ve vojenském vývoji reaktorů na výrobu plutonia pro jaderné zbraně. Při přechodu k mírovému využití jaderné energie v SSSR bylo toto konstrukční provedení použito u demonstračního reaktoru v Obninsku (viz 1.3.3.2). Úspěšný provoz elektrárny vedl k dalšímu rozvoji této technologie grafitového vodou chlazeného reaktoru („*Light Water Graphite Reactor*“ – LWGR), ze které později vzešel koncept kanálového reaktoru vysokého výkonu RBMK [17].

Vývoj této technologie byl úzce spojen s průmyslovým využitím grafitových reaktorů, které mohly být používány dvouúčelově, byly totiž schopné vyrábět plutonium do jaderných zbraní nebo sloužit k výrobě elektrické energie. První dvouúčelovou elektrárnou byla Sibiřská jaderná elektrárna ve městě Seversk. Elektrárna byla schopna dosahovat elektrického výkonu 100 MWe a do provozu byla uvedena v roce 1958. Vývoj technologie LWGR pokračoval roku 1964 zahájením komerčního provozu prvního bloku prototypu JE Beloyarsk 1, s reaktorem AMB-100, o elektrickém výkonu 102 MWe [17][20].

1.3.4.4 Těžkovodní reaktory (PHWR)

Těžkovodní reaktory („*Heavy Water Reactor*“ – HWR) jsou reaktory využívající těžkou vodu¹⁴ jako moderátor a chladivo. Podskupinou tohoto typu reaktorů jsou pak tlakovodní reaktory chlazené těžkou vodou („*Pressurized Heavy Water Reactor*“ – PHWR), tento typ je dvouokruhový a chladicí těžká voda cirkuluje v tlakových kanálech horizontálně procházejících AZ reaktoru. Oproti technologii PWR (viz 1.3.4.1) je voda v PO udržována pod nižším tlakem. Pravděpodobnost absorpce neutronu molekulou těžké vody je nižší než v případě lehké vody, což u reaktorů typu PHWR umožňuje použití neobohaceného oxidu uraničitého UO_2 jako paliva. Tyto reaktory bývají také označovány jako CANDU („*Canadian Deuterium-Uranium*“), což odkazuje na vývoj technologie uskutečněný v Kanadě [17].

VaV těžkovodních reaktorů byla věnována pozornost především v Kanadě, která má velké přírodní zásoby UO_2 a dostatek závodů na výrobu těžké vody. Kanadský výzkum těžkovodních reaktorů byl zahájen již během 2. Světové války. V roce 1945 se ve výzkumném těžkou vodou moderovaném reaktoru ZEEP („*Zero energy experimental pile*“), postaveném na řece Chalk River v provincii Ontario, podařilo dosáhnout řízené jaderné štěpné reakce. Výzkum těžkovodních reaktorů v Kanadě pokračoval reaktorem NRX („*National Research Experimental*“), který byl na řece Chalk River postaven v roce 1947 a jeho tepelný výkon byl 42 MWt [21][22].

Komerční v Kanadě vyvíjené reaktory typu PHWR bývají také označovány jako CANDU („*Canadian Deuterium-Uranium*“). Úspěšný výzkum s použitím těžké vody jako moderátoru v jaderném reaktoru vedl k sestrojení prvního prototypu elektrárny typu CANDU v roce 1962. Elektrárna nesoucí název „*Nuclear Power Demonstration*“ (NPD) byla schopna dosáhnout výkonu 20 MWe a stala se předlohou pro pozdější komerční elektrárny s reaktory typu CANDU [21][22].

1.3.4.5 Plynem chlazené reaktory (GCR)

Reaktory typu GCR („*Gas Cooled Reactor*“) používají jako chladivo oxid uhličitý CO_2 nebo helium He. V kontextu prvotního výzkumu těchto reaktorů pro komerční využití se jedná o první generaci GCR, kterou reprezentují britské reaktory Magnox a francouzské reaktory UNNG („*Uranium naturel-graphite gaz*“). Tyto reaktory byly chlazené oxidem uhličitým a byly dvouokruhové. U tohoto typu reaktorů byl použit grafitový moderátor, který podobně jako těžká voda v případě PHWR (viz 1.3.4.4) umožňoval využití přírodního uranu (UO_2) jako paliva, bez nutnosti obohacení. Konstrukční provedení reaktorů Magnox a reaktorů UNNG se lišilo především v materiálu pokrytí

¹⁴ Těžká voda je tvořena molekulami oxidu deuteria D_2O .

palivových proutků, kterým byla v případě britského designu hořčíková slitina Magnox¹⁵ a v případě francouzského designu slitina hořčíku a zirkonu. AZ těchto reaktorů, skládající se z grafitových bloků, kterými byly vedeny kanály s palivovými tyčemi, byla uzavřena do ocelové tlakové nádoby [17][18].

Rozhodnutí pro tento typ reaktoru bylo motivováno nezávislostí na obohacování uranu, což byla technologie tehdy ovládaná USA a SSSR. Jaderné programy obou zemí byly orientovány na výrobu plutonia z přírodního uranu, pro účel zkonstruování jaderných zbraní [3].

VB začala s výzkumem dříve, kdy již v roce 1946, jako čtvrtá země na světě, vlastnila funkční jaderný reaktor. Byl jím reaktor GLEEP („Graphite Low Energy Experimental Pile“), který dosahoval tepelného výkonu 3 kWt, byl moderovaný grafitem a používal vzduchové chlazení. Následován byl několika dalšími výzkumnými reaktory se vzduchovým chlazením, z nichž první byl reaktor BEPO („British Experimental Pile-0“), tento reaktor prokázal proveditelnost komerčních plynem chlazených reaktorů a byl předlohou pro reaktory „Windscale Piles“, které byly určené k výrobě plutonia. Na výzkumných reaktorech bylo zjištěno, že použití vzduchu jako chladiva může při určitých podmínkách, při reakci s grafitovým moderátorem, vést ke vznícení. Z toho důvodu byl pro další projekty jaderných zařízení s GCR ve VB již používán CO₂ [17][23].

Vývoj jaderných zbraní ve Francii nebyl tak rychlý jako v případě VB. První výzkumné reaktory ve Francii byly konstruovány jako reaktory moderované těžkou vodou, inspirované kanadskými výzkumnými reaktory (viz 1.3.4.4). Z důvodu špatné dostupnosti těžké vody se postupně v těchto reaktorech přecházelo na chlazení stlačenými plyny. Jako první byl za tímto účelem použit stlačený dusík. Ten byl později, z důvodu obav z úniku, nahrazen oxidem uhličitým. Oxid uhličitý byl poprvé použit jako chladivo ve výzkumném reaktoru EL-2. Jednalo se o vůbec první použití tohoto plynu jako chladiva jaderného reaktoru na světě. Úspěšný výzkum, orientovaný na produkci radioaktivních izotopů, motivoval vývoj technologie reaktorů UNGG. Tyto reaktory měly nejprve sloužit dvojmu účelu, a to sice výrobě izotopu plutonia pro jaderné zbraně a výrobě elektrické energie. Prvním prototypem dvouúčelové elektrárny tohoto typu byla elektrárna G1 v jaderné lokalitě v Marcoule. Elektrárna dosahovala elektrického výkonu 5 MWe a byla pilotním projektem pro elektrárny G2 a G3, jež byly první komerčně provozované JE ve Francii [17][24].

1.3.4.6 Rychlé množivé reaktory (FBR)

Reaktory typu FBR („Fast Breeder Reactor“) jsou podskupinou reaktorů pracujících s rychlými neutrony („Fast Neutron Reactor“ – FNR). Reaktory typu FBR nemají moderátor, štěpná reakce tak probíhá s rychlými neutrony, což by bylo pro uranové palivo méně efektivní. Základním palivem je tak plutonium ve formě směsi oxidu plutoničitého PuO₂ a oxidu uraničitého UO₂. AZ se skládá z palivových tyčí, které jsou obklopeny množivou zónou obsahující atomy izotopu uranu ²³⁸U. Ten se pomocí středně energetických neutronů transmutuje na plutonium ²³⁹Pu. (viz 1.1) Vzniká tak další štěpný materiál a dochází k efektivnímu energetickému využití přírodního uranu. Chladivem těchto reaktorů bývají roztavené kovy, především sodík, které nezpomalují ani neabsorbují rychlé neutrony v AZ reaktoru a velice dobře vedou teplo. Použití tohoto typu chladiva umožňuje provoz reaktoru při nízkém, téměř atmosférickém, tlaku v PO [25].

Prvním množivým reaktorem na světě byl americký reaktor EBR-1. (viz 1.3.3.1) U tohoto průlomového reaktoru došlo v roce 1955 k částečnému roztavení AZ. Tato havárie ukázala na bezpečnostní problémy při užití tekutého sodíku jako chladiva reaktoru spojeného s kladným koeficientem reaktivity. Velkých pokroků ve výzkumu reaktorů typu FBR v USA bylo dosaženo na reaktoru EBR-2, jež v roce 1963 nahradil reaktor EBR-1. Sodíkem chlazené FBR reaktory byly,

¹⁵ Tyto slitiny jsou založeny na hořčíkové bázi s příměsí hliníku a jiných prvků.

vedle reaktorů typu PWR, v první polovině 50. let zkoumané námořnictvem Spojených států amerických. Tento typ reaktoru byl pohonem druhé americké jaderné ponorky Seawolf, nicméně v roce 1956 se námořnictvo rozhodlo od tohoto typu reaktorů ustoupit a zaměřit se výhradně na PWR. Důvodem byla, mimo jiné, vysoká reaktivita sodíku s vodou a vzduchem, která představovala hrozbu pro toto využití [26].

Za neúspěšný se dá považovat rovněž provoz prvního prototypu elektrárny s reaktorem typu FBR Fermi-1, jež byla k elektrické síti připojena v roce 1963. Tato elektrárna o elektrickém výkonu 66 MWe jako první přišla s technologií s dvěma okruhy kapalného sodíku. Stejně jako v případě EBR-1 došlo i u tohoto reaktoru během provozu k částečnému roztavení AZ. Provoz elektrárny byl předčasně ukončen v roce 1972. Přestože se v USA technologie FBR dále zkoumala, dostala se do pozadí oproti technologiím PWR a BWR, které byly současně úspěšně provozované v komerčních jaderných elektrárnách [26].

Výzkum množivých reaktorů probíhal od roku 1949 také v SSSR. Výzkum se zaměřoval na vlastnosti různých materiálů chladiv pro práci s rychlými neutrony. Dostupnost speciálních materiálů byla v SSSR po Druhé světové válce omezená, zároveň zde byl také nedostatek výzkumných pracovníků s požadovanou odborností. Tyto faktory zpožďovaly výzkum technologie FBR v SSSR v porovnání s USA [17][26].

Prvním experimentální reaktorem tohoto typu v SSSR byl reaktor BR-1 („*Bystry Reactor-1*“), jež byl do provozu uveden v roce 1955. Reaktor neměl chladivo a jako základní palivo bylo použito čisté plutonium. Zlom v SSSR přišel v roce 1959 s výzkumným reaktorem BR-5, ve kterém byl za účelem chlazení použit roztavený sodík a základním palivem byl oxid plutoničitý PuO_2 . Toto technické řešení vedlo k značnému zvýšení hustoty výkonu v AZ reaktoru, a tím i dosažitelného výkonu reaktoru [17][26].

Reaktory chlazené sodíkem byly v SSSR dále zkoumány při použití různých druhů paliva. Výzkum v této oblasti probíhal v 60. letech 20. století na experimentálním reaktoru BFS-1, v reaktory byly testovány paliva o různých poměrech směsi plutonia a uranu s různou mírou obohacení. Na základě výzkumné činnosti začala v roce 1964 výstavba prvního prototypu elektrárny s FBR reaktorem. Elektrárna Aktau se sodíkem chlazeným reaktorem BN-350¹⁶ sloužila vedle výroby elektrické energie i k destilaci vody. V elektrárně v roce 1973, rok po uvedení do provozu, došlo k velkému požáru vlivem vznícení sodíku v sekundárním okruhu, tento požár však neohrozil bezpečnost elektrárny a technologie FBR v SSSR byla dále zdokonalována a připravována na komerční využití [17][26].

1.3.4.7 Reaktory chlazené tekutými solemi (MSR)

MSR je typ reaktorů chlazených roztavenými solemi, nejčastěji solemi kyseliny fluorovodíkové, jež mají vysokou teplotu varu (okolo 700 °C). Z důvodu vysokých provozních teplot používají MSR jako moderátor většinou grafit, tlak v PO těchto reaktorů tedy nemusí být vysoký (do 1 MPa). Specifikem MSR je použití tekutého paliva. Reaktory MSR se dělí do dvou skupin [27]:

- „*Single fluid*“ – Palivo, ve formě roztavené palivové soli, je smíšené s chladící roztavenou solí v roztoku, který slouží jako štěpný materiál i chladivo.
- „*Two-fluid*“ – Obsahuje dva okruhy s roztoky tekutých solí, v prvním je směs tekuté soli a štěpného materiálu a ve druhém je do tekuté soli přidán množivý materiál, který absorbuje neutrony uvolněné štěpnou reakcí v prvním okruhu, přičemž transmutací vzniká nový štěpný materiál.

¹⁶ Číslice v názvu vypovídá o ekvivalentním elektrickém výkonu elektrárny.

MSR mohou kromě pomalých neutronů pracovat i s neutrony epitermálními¹⁷ či rychlými [27].

Výzkum technologie MSR probíhal ve větší míře pouze v USA. Zde byl koncentrován v ORNL, kde v roce 1947 započal jako součást programu ANP amerického letectva. Hlavním výstupem této fáze výzkumu byla volba fluoridových solí. Bylo prokázáno, že taveniny těchto solí [29]:

- dobře rozpouští uranové palivo
- jsou vysoce stabilní a nejsou poškozovány radiací
- nejsou vysoce reaktivní s vodou ani vzduchem
- chemicky nereagují s kovy běžně používanými pro konstrukci reaktorů

První, experimentální reaktor, jež měl otestovat využití fluoridových solí a stabilitu u reaktoru s cirkulujícím palivem, byl ARE. (viz 1.3.2) Tento projekt motivoval myšlenku využití MSR pro komerční účely ve výrobě elektrické energie. Výzkum pro tento účel se zaměřoval na množivý MSR a na MSR u nichž se množení štěpného materiálu dosahovalo pomocí konvertoru¹⁸. Výzkum označil za vhodné konstrukční řešení MSR s grafitovým moderátorem, pracujícím s pomalými neutrony. Za vhodný množivý materiál bylo označeno thorium, jehož transmutací vzniká izotop uranu ²³³U, který je následně štěpen. Dále se zvažovalo, jestli má být reaktor založen na systému „single-fluid“ či „two-fluid“ [28][29].

Vývoj v oblasti MSR pokračoval reaktorem MSRE („*Molten Salt Reactor Experiment*“), který byl poprvé uveden do provozu v roce 1965 v ORNL. Pro tento reaktor bylo zvoleno „single-fluid“ řešení s grafitovým moderátorem. Cirkulující tekuté palivo tohoto reaktoru se skládalo z fluoridu berylnatého BeF₂, fluoridu litného LiF, fluoridu zirkoničitého ZrF₄ a fluoridu uraničitého UF₄¹⁹. Cirkulující palivo předávalo ve výměníku teplo chladící roztavené soli (směs BeF₂ a LiF), která jej disipovala do okolí. Ochranu před přehřátím reaktoru zajišťovaly zámrazné bezpečnostní ventily, které v případě zvýšené teploty umožnily odčerpání paliva z reaktoru (viz Obr. 1-7). Reaktor dosahoval maximálního tepelného výkonu 8 MWt a jeho provoz úspěšně potvrdil stabilitu tohoto typu MSR. Komponenty reaktoru nepodléhaly korozi a v reaktoru byly z paliva úspěšně separovány vzácné plyny, jež by při úniku zdravotně ohrozily personál. MSRE byl také prvním reaktorem na světě, ve kterém byl jako štěpný materiál použit izotop uranu ²³³U. Provoz tohoto reaktoru byl ukončen v roce 1969 [28][29].

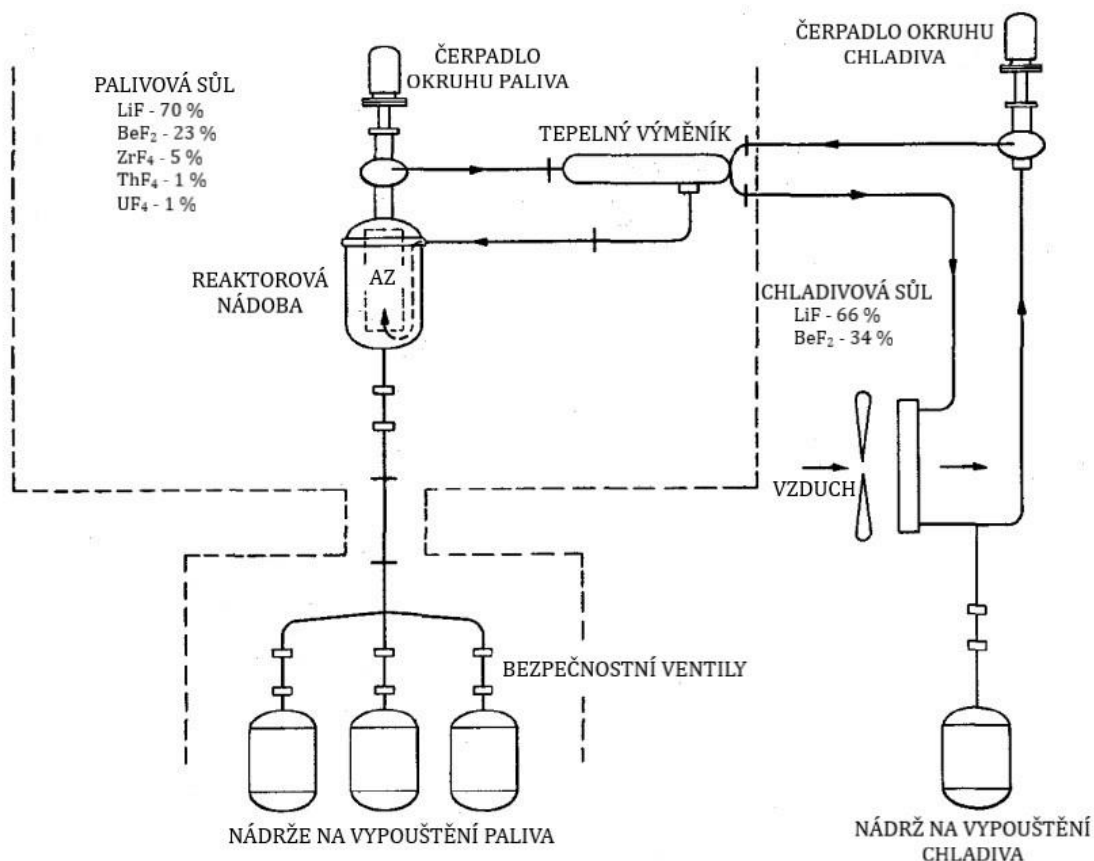
V ORNL následně dále probíhal výzkum za účelem návrhu designu množivého MSR (koncept MSBR – „*Molten Salt Breeder Reactor*“) (viz 3.1.2.1). Tento koncept však nebyl realizován a MSRE a ARE tak dodnes zůstaly jedinými zhotovenými reaktory typu MSR. Důvody odklonu od reaktorů typu MSR pro komerční využití byly následující [28][29]:

- nedořešené technické problémy (materiály, zpracování paliva, nové komponenty)
- zaměření na rozvoj a realizaci reaktorů LWR pro energetické využití v USA
- upřednostnění vývoje sodíkem chlazených reaktorů v oblasti množivých reaktorů
- možné použití ²³³U v jaderných zbraních a s tím spojená hrozba jejich šíření

¹⁷ Epitermálními neutrony jsou označovány neutrony s energií ležící mezi energiemi pomalých a rychlých neutronů.

¹⁸ Speciální typ množivých MSR ve kterých, na rozdíl od jiných množivých reaktorů, není množivý materiál obsažen v množivé zóně v reaktoru, ale je přímo součástí v cirkulující palivové směsi.

¹⁹ Nebo směsí UF₄ a fluoridu thoričitého ThF₄



Obr. 1-7 Schéma MSRE [28]

Tab. 1-1 Přehled výzkumné a vývojové fáze jednotlivých typů jaderných reaktorů [17][18]

TYP	CHLADIVO	MODERÁTOR	PALIVO	ENERGIE NEUTRONŮ	STÁT ²⁰	PRVNÍ PROTOTYP	KOMERČNÍ PROVOZ
PWR	H ₂ O	H ₂ O	Obohacený UO ₂	pomalé	USA	Shippingport (1957)	ANO
VVER	H ₂ O	H ₂ O	Obohacený UO ₂	pomalé	SSSR	Novovoronež-1 (1964)	ANO
BWR	H ₂ O	H ₂ O	Obohacený UO ₂	pomalé	USA	Dresden-1 (1960)	ANO
RBMK	H ₂ O	grafit	Obohacený UO ₂	pomalé	SSSR	Bělojarsk-1 (1964)	ANO
PHWR	D ₂ O	D ₂ O	Přírodní UO ₂	pomalé	Kanada	NPD (1962)	ANO
GCR	CO ₂ / He	grafit	Přírodní UO ₂	pomalé	VB, Francie	Calder Hall (1956)	ANO
FBR	tekuté kovy	-	PuO ₂ , UO ₂	rychlé	USA, SSSR	Fermi-1 (1963)	ANO ²¹
MSR	tekuté soli	grafit	UF ₄	pomalé/rychlé	USA	-	NE

²⁰ Zmíněné jsou zde státy, které se výzkumem daného typu reaktoru zabývaly přednostně ve svém jaderném programu.

²¹ Úspěšný komerční provoz pouze v SSSR

1.3.5 NÁSTUP KOMERČNÍCH JADERNÝCH REAKTORŮ

Komerční využití – Obecně tento termín zahrnuje činnosti, jež používají jistý produkt, službu nebo zařízení za účelem finančního zisku. Termín „komerční jaderný reaktor“ byl popsán již v bodě 1.3.4.

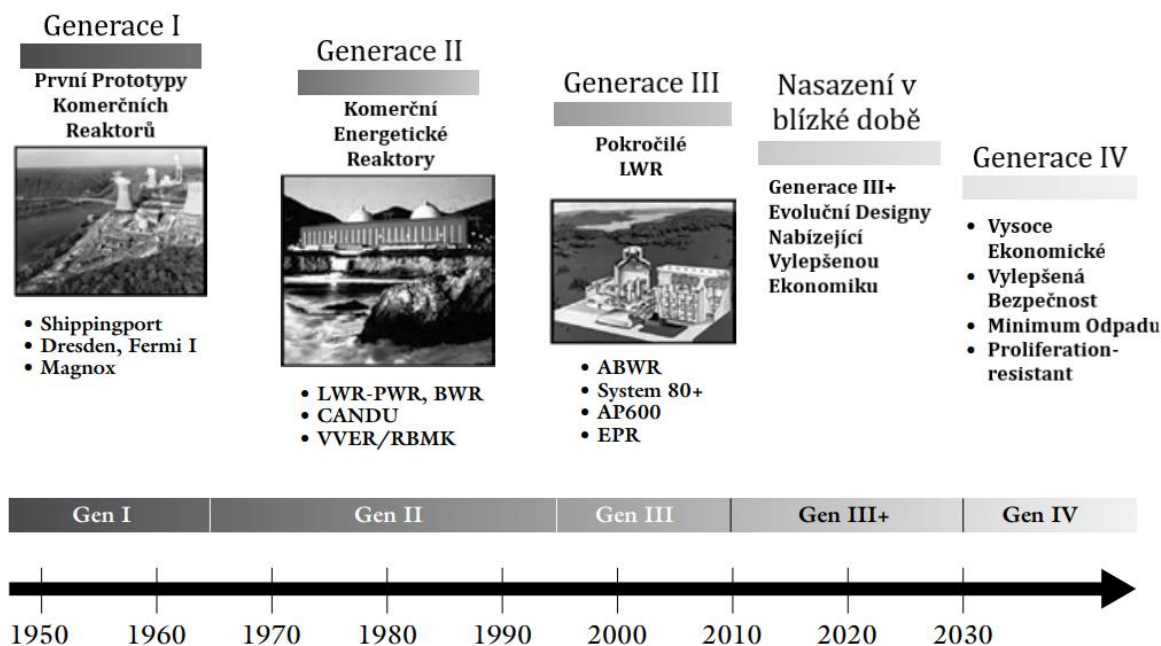
FOAK („first of the kind“) – Tento termín je používán pro zprovozněné reaktory, jež přichází s novou technologií nebo designem. Nejedná se však o prototypy nebo demonstrační zařízení. Tyto reaktory jsou realizované jako „první z mnoha“ využívajících danou technologii, koncept či design. Tyto jednotky bývají nákladnější, než jednotky pokračující tzv. NOAK („nth of the kind“), které zakládají na poznatcích z realizace a provozu předešlých jednotek stejného druhu [15].

1.3.5.1 Generace komerčních jaderných reaktorů

Jaderné reaktory v komerčních jaderných elektrárnách jsou rozdělovány do vývojových skupin, jež jsou označovány jako generace (viz Obr. 1-8).

Jednotlivé generace jaderných reaktorů jsou specifikovány následovně [30]:

- **Generace I** – Označuje první prototypy komerčních reaktorů, uvedené do provozu v 50. a 60. letech 20. století. Reaktory této generace dosahovaly nižších výkonů a jejich účelem byla demonstrace komerčního využití jaderné energie.
- **Generace II** – Zahrnuje reaktory v komerčních elektrárnách realizovaných od konce 60. let 20. století. Tyto elektrárny byly projektovány s důrazem na spolehlivost, bezpečnost a ekonomickou efektivnost. Plánovaná životnost reaktorů této generace byla 40–60 let.
- **Generace III** – Vychází z reaktorů II. generace se zásadními pokrokovými změnami v oblasti bezpečnosti, účinnosti a zejména schvalování a realizace projektu (standardizované projekty).
- **Generace III+** – Přináší další vývoj generace III v oblasti bezpečnosti (pasivní bezpečnost, odolnost vůči vnějším vlivům).
- **Generace IV** – Tato generace reaktorů je stále předmětem vývoje. Jedná se zatím o demonstrační reaktory, které by kromě dalšího rozvoje bezpečnosti a ekonomické efektivnosti měly přinést i efektivnější využití jaderného paliva a snížení množství odpadů. Tato generace reaktorů pracuje s chlady, doposud nevyužívanými v komerčních zařízeních, která značně zvyšují tepelnou účinnost reaktoru.



Obr. 1-8 Generace jaderných reaktorů [30]

1.3.5.2 Elektrárna Calder Hall

Elektrárna Calder Hall je považována za první prototyp komerční JE na světě. V následujícím textu je rozebrán projekt prvních dvou bloků této JE uvedených do provozu v letech 1956 (Calder Hall-1) a 1957 (Calder Hall-2). Projekt je představen v následujících bodech:

- Motivace pro realizaci projektu
- Financování a ekonomika projektu
- Technické parametry
- Odkaz projektu

Motivace

Britský jaderný program byl po 2. světové válce, v kontextu Studené války, zaměřen na vývoj jaderných zbraní a s tím spojenou produkcí plutonia (viz 1.3.4.5). Po úspěšném testu britské jaderné bomby v roce 1952 bylo cílem britské armády vyrobit 200 jaderných zbraní, což vyžadovalo nové reaktory produkující plutonium. Soudobě bylo prokázáno, že produkce energie z uhlí nebude v blízké budoucnosti postačovat na pokrytí spotřeby energie ve VB. Na základě těchto faktorů vznikla myšlenka dvouúčelových jaderných reaktorů tzv. PIPPA („pile for production of plutonium and power“). Calder Hall byla první z tohoto druhu JE [31].

Výstavba prvních dvou bloků elektrárny byla zahájena v roce 1953 pod záštitou britského Ministerstva zásobování²². Energetické využití zařízení bylo sekundární motivací, převažoval tlak ze strany armády, který značně urychlil procesy schvalování a realizace tohoto projektu. Britské veřejnosti byla situace prezentována právě opačně, Calder Hall se stala symbolem národní hrdosti a byla prezentována jako moderní zdroj levné elektrické energie [31].

²² Ministerstvo zásobování bylo založeno v roce 1939 a bylo mj. zodpovědné za armádní výzkum, včetně výzkumu pro účel konstrukce jaderných zbraní [31].

Financování a ekonomika projektu

Projekt byl nejprve zadán a financován ze strany Ministerstva zásobování. V roce 1954 převzala projekt nově vzniklá vládní organizace „United Kingdom Atomic Energy Authority“ (UAKEA), která převzala řízení v oblasti jaderné energetiky ve VB. Tato organizace disponovala nezvyklou mírou samostatnosti na britské vládě a ročním rozpočtem 53 milionů britských liber (GBP). Tato fakta poukazují na vysokou míru podpory jaderné energetiky ze strany britské vlády během výstavby prvních dvou bloků Calder Hall [31].

Odhadovaná cena elektrické energie vyrobené v elektrárně Calder Hall byla značně vyšší než v případě ostatních elektráren provozovaných ve VB. Argumentem UAKEA bylo, že tento rozdíl bude vyvážen produkcí cenného plutonia a provoz elektrárny se tak ekonomicky vyrovná ostatním zdrojům. Plánovaná životnost elektrárny byla 20 let [31].

Technické parametry elektrárny

Tab. 1-2 Parametry elektrárny Calder Hall [32]

BLOK	CALDER HALL-1	CALDER HALL-2
TYP REAKTORU	GCR (Magnox)	GCR (Magnox)
CHLADIVO	CO ₂	CO ₂
PALIVO	Přírodní kovový uran (NU)	Přírodní kovový uran (NU)
MODERÁTOR	grafit	Grafit
CELKOVÁ ÚČINNOST	23 %	23 %
TEPELNÝ VÝKON	182 MWt	182 MWt
ELEKTRICKÝ VÝKON	2x23 MWe	2x23 MWe
ZAHÁJENÍ VÝSTAVBY	1.8.1953	1.8.1953
PŘIPOJENÍ NA SÍŤ	27.8.1956	1.2.1957

Odkaz elektrárny Calder Hall

V roce 1955 vydala britská vláda vyhlášku, jež obsahovala návrh na zajištění 1500–2000 MWe instalovaného výkonu do roku 1965, výstavbou nových jaderných elektráren Magnox po vzoru Calder Hall. Ještě před uvedením prvních dvou bloků elektrárny Calder Hall do provozu byla v roce 1955 zahájena výstavba bloků 3 a 4, stejně tak jako čtyř elektrárenských bloků Chapelcross ve Skotsku [31].

Elektrárna Calder Hall představovala vstup do éry komerčního využívání jaderné energie ve VB. Komerzializace jaderné energie probíhala ve světě různým způsobem, nicméně první komerční elektrárny byly s Calder Hall srovnávány z hlediska technického i ekonomického po celém světě.

1.3.6 PŘEHLED VÝZNAMNÝCH MEZNÍKŮ VE VÝVOJI JADERNÝCH REAKTORŮ PO NÁSTUP REAKTORŮ II. GENERACE

VÝVOJ JADERNÝCH REAKTORŮ

1942
Chicago Pile-1 (USA)
První jaderný reaktor na světě

1951
EBR-1 (USA)
První využití jaderného reaktoru k produkci elektrické energie

1956
Calder Hall (VB)
První prototyp komerční jaderné elektrárny na světě

1957
Shippingport (USA)
První prototyp komerční jaderné elektrárny s reaktorem typu PWR

1960
Dresden-1 (USA)
První prototyp komerční jaderné elektrárny realizovaný bez vládního financování

1946
FP-1 (SSSR)
První jaderný reaktor v Evropě

1954
AM-1 (SSSR)
Reaktor první elektrárny připojené k elektrické síti v Obninsku

1964
Novovoronež-1 (SSSR)
Bělojarsk-1 (SSSR)
První prototypy komerčních jaderných elektráren v SSSR

VÝVOJ UDÁLOSTÍ

1932 *Objevení neutronu Jamesem Chadwickem*

1938 *První demonstrace štěpení atomových jader uranu neutrony*

1945 *Úspěšný test první atomové bomby v USA*

1946 *Založení FEI v Obninsku
Založení AEC*

1949 *Úspěšný test první sovětské atomové bomby*

1953 *Atoms for Peace Speech*

1954 *V USA je umožněno soukromým subjektům vlastnit a provozovat jaderná zařízení*

1955 *Konference OSN řešící téma mírového využití jaderné energie*

Do provozu je uvedeno první plavidlo s jaderným pohonem USS Nautilus

1957 *Založení IAEA*

Obr. 1-9 Časová osa vývoje jaderných reaktorů po reaktory II. generace

KAPITOLA 2: AKTUÁLNÍ STAV PROJEKTŮ SMR VE SVĚTĚ

2.1 MOTIVACE VYUŽITÍ TECHNOLOGIE SMR

Otázka elektrifikace a rapidně rostoucí spotřeby elektrické energie je v současnosti celosvětově intenzivně řešeným tématem. V roce 2021 byla celosvětová spotřeba elektrické energie 26467 TWh. Výroba elektřiny byla ve stejném roce z 36 % zajištěna z uhelných zdrojů a celkový podíl fosilních paliv na výrobě elektřiny v roce 2021 byl 61,5 %. Energetické koncepce jednotlivých státních celků po celém světě se stále více orientují na přechod k nízkoemisní elektrické energii, prostřednictvím odstupů od fosilních zdrojů. Tento fakt společně s rostoucí poptávkou po elektřině implikuje nutnost zvýšení instalovaného výkonu v nízkoemisních zdrojích, pokrývajících především základní zatížení, jako jsou zdroje jaderné [33].

Realizace nových jaderných zdrojů s velkými reaktory (viz Obr. 2-1) v současnosti čelí následujícím bariérám [34]:

- Vysoké počáteční investice a vysoké finanční riziko pro investory
- Dlouhá doba realizace
- Nesoulad výkonu reaktoru s potřebami/možnostmi elektrické sítě s mnoha zdroji na daném území

Náročnost realizace nových velkých jaderných zdrojů zpomaluje rozšíření komerčních jaderných zařízení s reaktory generace III+ a vývoj a postup ke komerčnímu využívání reaktorů generace IV (viz 1.3.5.1). Tento problém může být překonán s pomocí SMR, jelikož některá z technických řešení tohoto typu jaderných reaktorů jsou na těchto technologiích reaktorů založena.

2.1.1 REDUKCE POČÁTEČNÍCH INVESTIC A SNÍŽENÍ RIZIK

Modulární přístup (viz 2.2) umožňuje investorovi postupného dosažení požadovaného instalovaného výkonu pro pokrytí poptávky po energii. Odstupňovaná výstavba jednotlivých modulů umožňuje zlepšení ekonomiky projektu, jelikož při jejich postupném uvádění do komerčního provozu posouvají výnosy z komerčního provozu časový profil kapitálových investic a mohou přispět k financování výstavby dalších modulů. Nižší finanční riziko je implikováno nižšími náklady než v případě velkých reaktorů, danými menší konstrukcí reaktoru [34].

2.1.2 ZKRÁCENÍ DOBY VÝSTAVBY

Potenciální zkrácení doby výstavby je možné díky jednodušší, menší konstrukci a standardizované sériové výrobě komponent zařízení. Zkrácení doby výstavby umožňuje jednodušší plánování projektu a snížení nákladů na financování projektu.

2.1.3 KOMPATIBILITA S MENŠÍMI ELEKTRICKÝMI SÍTĚMI

Lokální poptávka po elektrické energii často vyžaduje přírůstek instalovaného výkonu nižší, než by byl zprostředkován výstavbou JE s velkým reaktorem (1000 MWe a více). SMR svým elektrickým výkonem a možností jeho škálování nabízí řešení i pro menší elektrické sítě v odlehlých oblastech nebo v menších státech. Použití SMR je zároveň vhodné pro zajištění bezpečných a stabilních dodávek elektřiny pro důležitá strategická zařízení jako datová centra nebo vojenské základny.

2.1.4 ÚROVEŇ BEZPEČNOSTI

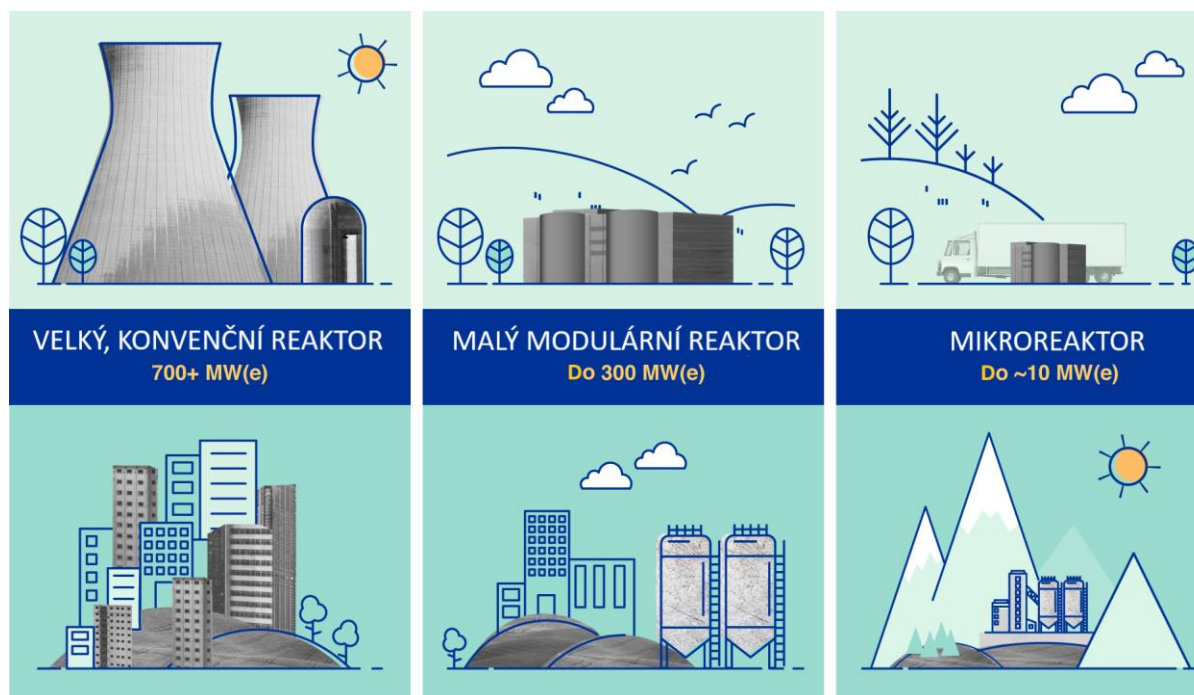
SMR poskytují vysokou úroveň bezpečnosti založenou na pasivních bezpečnostních systémech, konceptu ochrany do hloubky („*Defence in depth*“ - DiD) a inherentní bezpečnosti zařízení.²³

Vysoká úroveň bezpečnosti a menší konstrukce AZ reaktoru implikuje zmenšení zóny havarijního plánování (ZHP) u zařízení s technologií SMR oproti velkým JE.

2.2 ZÁKLADY KONCEPTU SMR

Pojem SMR, tedy z angličtiny „*small modular reactor*“, odkazuje na technické atributy těchto jaderných zařízení. Při rozboru tohoto pojmu získáváme [35]:

- **Small** (malý) – Odkazuje na instalovaný elektrický výkon do 300 MWe, respektive do 700 MWe v případě reaktorů středních.
- **Modular** (modulární) – Modularitu lze v tomto případě chápat jako koncept projektování klíčových komponent a systémů umožňující jejich výrobu ve formě standardizovaných modulů a následnou montáž těchto systémů a komponentů společně s transportem jako celku na místo instalace. Tato vlastnost SMR rovněž umožňuje postupné zvyšování instalovaného výkonu zařízení, ve formě připojování dalších modulů.
- **Reactor** (reaktor) – Zařízení využívající jaderného štěpení paliva na produkci tepla pro výrobu elektrické energie nebo jiné využití



Obr. 2-1 Rozdělení jaderných reaktorů dle elektrického výkonu [35]

2.2.1 MODULARITA VÝKONOVÝCH MODULŮ

Modulární konstrukce SMR umožňuje škálovat výkon elektrárny podle potřeb. To znamená, že lze přidávat další moduly podle rostoucí poptávky po energii. Tato flexibilita je obzvláště užitečná

²³ Tyto bezpečnostní koncepty nejsou předmětem této práce, nebudou tedy podrobně vysvětleny.

v oblastech s omezenou kapacitou sítě. SMR jsou tak zvláště výhodné pro off-grid aplikace²⁴. Modularita výkonových modulů dále umožňuje rychlejší nasazení a snížení celkových nákladů na výstavbu. Nabízí se také možnost financování nových modulů ze zisku z provozu modulů provozovaných (viz 2.1.1).

2.2.2 MODULARITA KOMPONENT

Modularitou komponent rozumíme standardizovanou sériovou výrobu komponent v off-site výrobě²⁵ a jejich následnou kompletaci a montáž v lokalitě umístění zařízení. Předpokládá se, že modularita komponent sníží náklady na pracovní sílu, protože pracovní síla se nebude muset přesouvat pokaždé, když je třeba vyrobit modul reaktoru. Předpokládá se také úspora nákladů spojených s kratšími lhůtami projektů, které souvisejí se sériovými výrobními technikami, větším počtem dílů a efektivnějším využitím materiálů. Standardizované komponenty rovněž ulehčí projektování a ušetří čas při návrhu výstavby jaderného zařízení [36].

2.3 JADERNÉ REAKTORY S TECHNOLOGIÍ SMR

2.3.1 VÝZKUM A VÝVOJ V OBLASTI SMR

Malé reaktory byly předmětem VaV již ve 40. a 50. letech 20. století, kdy bylo zkoumáno jejich využití jako zdrojů energie pro pohony vojenských zařízení. (viz 1.3.2) Výsledky VaV fáze a provozu těchto reaktorů lze, stejně tak jako provoz prvních prototypů komerčních reaktorů, považovat za inspiraci pro technologii SMR. Výzkumná a vývojová činnost zaměřená na technologie SMR byla zahájena v 90. letech 20. století.

VaV technologie SMR je v současnosti veden ze strany vládních organizací i ze soukromého sektoru. Předmětem výzkumu SMR jsou nové přístupy a materiály, vedoucí k zapojení reaktorů IV. generace. Reaktory IV. generace jsou rozvíjeny v rámci programu GIF („*Generation IV International Forum*“) [37].

VaV u technologií SMR je v současnosti zaměřen na [37]:

- **Palivo a palivový cyklus** – Paliva prochází termomechanickou analýzou a je zkoumána jejich bezpečnost.
- **Použité materiály** – Nové materiály jsou testovány z hlediska odolnosti vůči korozi, radioaktivnímu záření a podmínkám při havarijních stavech reaktoru.
- **Komponenty reaktorů** – Zkoumána je jejich spolehlivost v různých provozních stavech i odolnost a kompatibilita s materiály chladiv a moderátorů.
- **Jaderný odpad** – Předmětem výzkumu je zpracování, recyklace a omezení množství produkovaného jaderného odpadu.
- **Výrobní procesy** – Zefektivnění výrobních procesů je součástí konceptu SMR a je rovněž stále vyvíjeno za účelem zlepšení ekonomické efektivity projektů SMR.

²⁴Aplikace v oblastech odříznutých od hlavní elektrické sítě

²⁵Výroba mimo lokalitu, ve které bude zařízení umístěno.

2.3.2 FORMY FINANCOVÁNÍ PROJEKTŮ SMR

Současné jaderné projekty, zahrnující projekty SMR, se z investičního hlediska obecně vyznačují:

- vysokými počátečními kapitálovými náklady,
- dlouhou dobou realizace projektu,
- nízkými, stabilními provozními náklady,
- vysokým poměrem fixních a variabilních nákladů,
- dlouhou dobou návratnosti,
- vysokou mírou investičních rizik a
- dlouhodobými závazky spojenými s nakládáním s jadernými odpady a vyřazováním z provozu.

2.3.2.1 Veřejné a soukromé financování

Financování projektu lze podle původu kapitálu rozdělit na [38]:

- **Veřejné (vládní)** – Vláda nebo vládní organizace přímo dluhově či kapitálově financuje daný projekt. Zapojení vlády do financování projektu přináší větší jistoty pro věřitele, a to v případě přímého financování i nepřímého zapojení, jako například vlastnictví podílu na projektu, a tím možnost sjednání lepších podmínek dluhového financování. Historicky byla tímto způsobem financována většina projektů JE.
- **Soukromé (podnikové)** – Kapitál je zajištěn v rámci soukromé společnosti, která většinou dluhově financuje daný projekt. Společnost přebírá všechna rizika, jež jsou s projektem spojená. V případě investičně náročných projektů se rovněž nabízí spolupráce několika soukromých subjektů na financování. Tento obchodní model je nazýván „*joint venture*“ (JV).

2.3.2.2 Motivace financování projektů SMR

Zásadní otázkou pro nasazení a rozšíření technologie SMR je prospěch z projektů pro stakeholdery²⁶. Motivace financování těchto projektů z veřejných prostředků jsou:

- připojení nízkoemisních, stabilních energetických zdrojů, zajišťujících bezpečné dodávky elektřiny a tepla
- podpora rozvoje jaderné energetiky a nových technologií s přínosy v dlouhodobém horizontu
- mezinárodní prestiž v oblasti vědy a techniky

Na druhé straně, financování projektů SMR ze soukromého sektoru je motivováno:

- výnosem z prodeje elektřiny a tepla (pro soukromého investora je zásadní vhodný poměr výnosů a rizik spojených s investicí) a
- možnou finanční podporou státu nebo nadnárodních organizací v rámci podpory technického rozvoje a poskytování energetických služeb.

2.3.2.3 Způsoby financování

- **Granty** – Granty jsou přímé finanční příspěvky, poskytnuté za konkrétním veřejně prospěšným účelem. O grant je obecně nutné zažádat příslušnou organizaci nebo státní

²⁶ Anglický pojem „stakeholder“ nemá v českém jazyce jednoznačný ekvivalent. V kontextu projektů SMR se jedná o zájmové skupiny (zainteresované skupiny).

orgán, jež následně prostřednictvím komise rozhoduje o jeho udělení. Výše grantu se odvíjí od nákladů vynaložených žadatelem na daný projekt. Grant je poskytován bez nároku na výnosy z projektu.

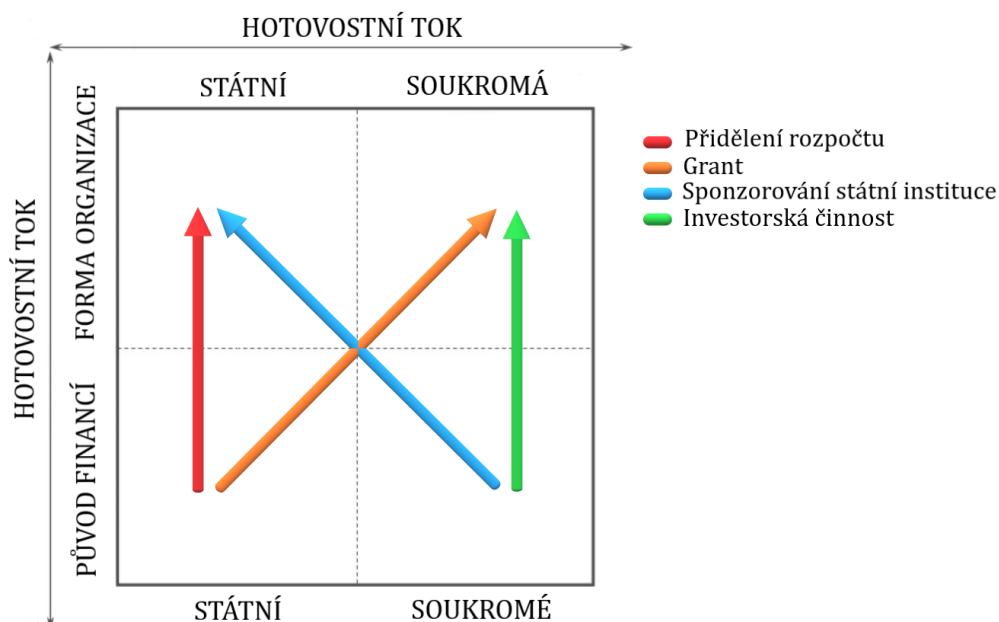
- **Z rozpočtu organizace** – Jedná se o dluhové nebo kapitálové financování z rozpočtu státní nebo soukromé organizace. Dluhové financování představuje financování projektu pomocí cizího kapitálu. Předkladatel projektu si v tomto případě sjedná úvěr u banky, nebo jiného věřitele, kterým pokryje část investic do projektu a postupně jej věřiteli splácí se smluvně stanovenou úrokovou mírou. Dlužník věřiteli ručí svými aktivy [38].

Kapitálové financování zahrnuje investory, kteří poskytují peněžní prostředky na realizaci projektu, výměnou za podíl v projektu. V případě elektráren investor získává část výnosu z prodeje elektřiny po uvedení elektrárny do komerčního provozu.

- **Projektové financování** – Představuje alternativní způsob financování, které je používáno u rozsáhlých projektů s vysokou mírou rizik. Banka pro mezinárodní vypořádání („Bank for International Settlements“ – BIS) definuje projektové financování následovně:

„Projektové financování je způsob financování, při kterém věřitel hledí především na příjmy generované jedním projektem, a to jak jako na zdroj splácení, tak jako na zajištění expozice²⁷. Tento typ financování je obvykle určen pro velká, složitá a nákladná zařízení, která mohou zahrnovat například elektrárny, závody na zpracování chemických látek, doly, dopravní infrastrukturu, životní prostředí a telekomunikační infrastrukturu. Projektové financování může mít podobu financování výstavby nového investičního zařízení nebo refinancování stávajícího zařízení s vylepšením nebo bez něj [39].“

U projektového financování energetických projektů je žádoucí zapojení státu, z důvodu snížení rizik pro stakeholdery vlivem poskytnutí záruk²⁸ [38].



Obr. 2-2 Schéma hotovostních toků při financování jaderných projektů

²⁷ Používáno k popisu čisté pozice portfolia. Formální definice vyjadřuje základ pro výpočet rizika maximální možné ztráty z dané pozice [40].

²⁸ Těmito zárukami jsou například zajištění návratnosti investice, smlouva o výkupu energie („Power purchase agreement“ – PPA) nebo tzv. „Contract for Difference“ (CfD) [38].

Tab. 2-1 *Formy financování jaderných projektů*

FORMA FINANCOVÁNÍ	ALOKACE PROJEKTŮ	PŘÍKLAD PROJEKTU	VLASTNOSTI
PŘIDĚLENÍ ROZPOČTU / GRANT STÁTNÍ ORGANIZACI	většina historických projektů JE, současné projekty JE v ČLR	CALDER HALL (viz 1.3.5.2)	nižší rizika, plné záruky, dlouhodobě stabilní
GRANT SOUKROMÉ ORGANIZACI Z VEŘEJNÝCH PROSTŘEDKŮ	projekty v USA a EU	CFFP (viz 2.3.3.5)	plná rizika pro soukromou společnost, dlouhodobě nejisté
SPONZOROVÁNÍ STÁTNÍ INSTITUCE	sponzorování vysokých škol	-	podpora výzkumu a vývoje v rámci státních institucí
INVESTORSKÁ ČINNOST / ROZPOČET SOUKROMÉ SPOLEČNOSTI	většina současných projektů JE	CFFP (viz 2.3.3.5)	plná rizika pro investora, závisí na hospodaření společnosti

2.3.3 STAV PROJEKTŮ SMR VE SVĚTĚ

V této části jsou prezentovány aktuální projekty a vyvíjená technická řešení SMR. Technická řešení jsou rozdělena do jednotlivých kategorií na základě použitého chladiva. V kapitole budou rovněž z hlediska časového průběhu dosahování cílů rozebrány tři příklady projektů komerčního nasazení SMR.

2.3.3.1 Vodou chlazené (WCR) SMR

Vodu jako primární chladivo v současnosti využívá 80 % komerčně provozovaných jaderných reaktorů. Tento typ chladiva převažuje rovněž v případě technických řešení SMR. Pouze malá část technických řešení je typu HWR, jelikož zkušenosti s provozem reaktorů typu LWR jsou celosvětově větší a na provozu těchto reaktorů jsou postaveny jaderné programy většiny států komerčně využívajících jaderná zařízení. Dlouholetá zkušenost s provozem u typu LWR, ukazuje tento typ jako dobrou volbu pro obchodníky, jelikož nabízí rychlejší uvedení do provozu, i pro investory, z důvodu nižších investičních rizik. V rámci těchto technických řešení pak převažují PWR nad BWR. Jednotlivé typy vodou chlazených SMR pracují na stejných fyzikálních principech, jako odpovídající typy velkých reaktorů. Velká část vodou chlazených SMR se řadí do reaktorů generace III+.

Vodou chlazené SMR jsou navrhovány ve třech variantách uspořádání PO [34]:

- **Tradiční smyčkové** – V tomto smyčkovém uspořádání PO je PG s reaktorovou nádobou spojeny velkým potrubím.
- **Kompaktní** – V tomto uspořádání je PG spojen s reaktorovou nádobou redukováným potrubím.
- **Integrální** – V integrální konstrukci jsou všechny komponenty PO uzavřeny v reaktorové nádobě, což eliminuje potřebu potrubí PO.

Použití vodou chlazených reaktorů není omezené pouze na pozemní stavby, část technických řešení je navržena na použití jako mobilní či fixované plovoucí zdroje energie.

V následující tabulce jsou uvedeny aktuální projekty SMR s vodním chlazením. Z celkově 33 projektů uvedených v dokumentu „*Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*“, vydaného v roce 2022 IAEA, bylo vybráno 10 projektů.

Tab. 2-2 Aktuální projekty SMR s vodním chlazením [34][41]

TECHNICKÉ ŘEŠENÍ	SPOLEČNOST	TYP	VÝKON [MWt/MWe]	MODULY ²⁹	STATUS	PROVOZ
ACP100	CNNC/NPIC (ČLR)	iPWR	385/125	1	Výstavba prototypu	2026
CAREM	CNEA (Argentina)	iPWR	100/30	1-8	Výstavba prototypu	2026
BWRX-300	GE Hitachi ³⁰ (USA, Jap.)	BWR	870/290	1	DD	2028
KLT-40S	OKBM (RF)	PWR (kompaktní)	150/35	2	Provoz	2020
NUWARD	EDF (Francie)	iPWR	540/170	2	CD	2030
NuScale	NuScale Power Corporation (USA)	iPWR	250/77	4-12	DD	2029 ³¹
RITM-200N	OKBM (RF)	iPWR	190/55	1	DD	2027
SMART	KAERI (Korejská republika ³²)	iPWR	365/107	1	DD	-
SMR-160	HI (USA)	PWR (kompaktní)	525/160	1	DD	-
UK SMR	Rolls Royce (VB)	PWR (smyčkové)	1358/470	1	DD	2030

2.3.3.2 SMR chlazené vysokoteplotními plynem (HTGR)

Mezi technickými řešeními SMR s plynným primárním chladivem v současnosti převažují heliem chlazené reaktory. Výhodou plynného chladiva je možnost vysokých provozních teplot. Výstupní teplota chladiva u tohoto typu SMR je typicky 700–800 °C, což implikuje vyšší účinnost při přeměně tepla na elektrickou energii a možnost zajištění tepla pro širší řadu průmyslových procesů. Nevýhodou tohoto typu chlazení je velký rozdíl teplot, okolo 500 °C, v rámci AZ a s tím spojené nároky na použité materiály. Moderátorem tohoto typu SMR je grafit. U většiny konceptů HTGR SMR je použita technologie paliva „*coated particle fuel*“ (TRISO) [34].

V následující tabulce jsou uvedeny aktuální projekty SMR s plynným chlazením. Z celkově 17 projektů uvedených v dokumentu „*Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*“, vydaného v roce 2022 IAEA, bylo vybráno 5 projektů.

Tab. 2-3 Aktuální projekty SMR s plynným chlazením [41]

TECHNICKÉ ŘEŠENÍ	SPOLEČNOST	TYP	VÝKON [MWt/MWe]	MODULY	STATUS	PROVOZ
EM ²	General Atomics (USA)	HTGR	500/265	4	CD	-
GT-MHR	OKBM (RF)	HTGR	600/288	1	CD	-
HTR-PM	INET (ČLR)	HTGR	2x250/210	2-6	V provozu	2022
HTTR	JAEA (Japonsko)	HTGR	30/0	1	V provozu	2021
Xe-100	X-Energy (USA)	HTGR	200/82,5	4	BD	-

²⁹ Plánovaný počet modulů na zařízení

³⁰ GE-Hitachi Nuclear Energy (USA) a Hitachi-GE Nuclear Energy (Japonsko)

³¹ Projekt FOAK ukončen v roce 2023 (viz 2.3.3.5).

³² Korejská republika a Saudská Arábie

2.3.3.3 SMR chlazené tekutými kovy (LMFR)

Chlazení tekutými kovy umožňuje v jaderných reaktorech práci s rychlými neutrony. V minulosti byly tyto reaktory konstruovány jako reaktory množivé (viz 1.3.4.6). Zájem o tyto reaktory však postupně klesal s přibývajícím nalezišti uranové rudy. Tyto reaktory v současnosti nabízejí možnost dalšího využití jaderného paliva použitého ve WCR, a tím zlepšování procesu zpracování radioaktivního odpadu. Technická řešení SMR tohoto typu jsou díky provozní výstupní teplotě chladiva okolo 500 °C, kromě použití na výrobu elektřiny vhodné i na výrobu tepla. Současná technická řešení LMR SMR využívají jako chladivo roztavený sodík, olovo nebo slitinu olova a bismutu. Sodík je vysoce reaktivní s vodou a vzduchem a slitiny olova jsou korozivní. Technická řešení LMFR SMR používají tedy oproti technickým řešením WCR SMR jiných bezpečnostních systémů [34].

V následující tabulce jsou uvedeny aktuální projekty SMR s chlazením tekutými kovy. Z celkově 8 projektů uvedených v dokumentu „*Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*“, vydaného v roce 2022 IAEA, bylo vybráno 5 projektů.

Tab. 2-4 Aktuální projekty SMR chlazené tekutými kovy [41]

TECHNICKÉ ŘEŠENÍ	SPOLEČNOST	TYP	VÝKON [MWt/MWe]	MODULY	STATUS	PROVOZ
4S	Toshiba (Japonsko)	LMFR	30/10	1	DD	-
ARC-100	ARC (Kanada)	LMFR	286/100	1	CD	-
BREST-OD-300	NIKIET (RF)	LMFR	700/300	1	Výstavba	2026
SVBR	JCM AKME (RF)	LMFR	280/100	1-6	DD	2031
Westinghouse LFR	Westinghouse (USA)	LMFR	950/450	1	CD	2030

2.3.3.4 SMR chlazené tekutými solemi (MSR)

Výzkum MSR byl historicky utlumen s přechodem k reaktorům vysokého výkonu, v rámci množivých reaktorů byly pak upřednostněny LMR. Technická řešení SMR s technologií MSR byly tak vyvíjeny nejpozději, nicméně některá z nich jsou v již v pokročilém stádiu vývoje. Soli používané jako chladiva v MSR mají vysokou teplotu tání. U těchto technických řešení SMR se výstupní teplota chladiva pohybuje v rozmezí 600–800 °C, což implikuje využití těchto SMR pro výrobu tepla v průmyslu, například k vysokoteplotní elektrolýze (HTE) při výrobě vodíku. Na základě technologie MSR jsou v současnosti vyvíjeny reaktory typu FHR („*Fluoride salt-cooled high-temperature reactor*“). Tyto reaktory kombinují technologii MSR a HTGR [34].

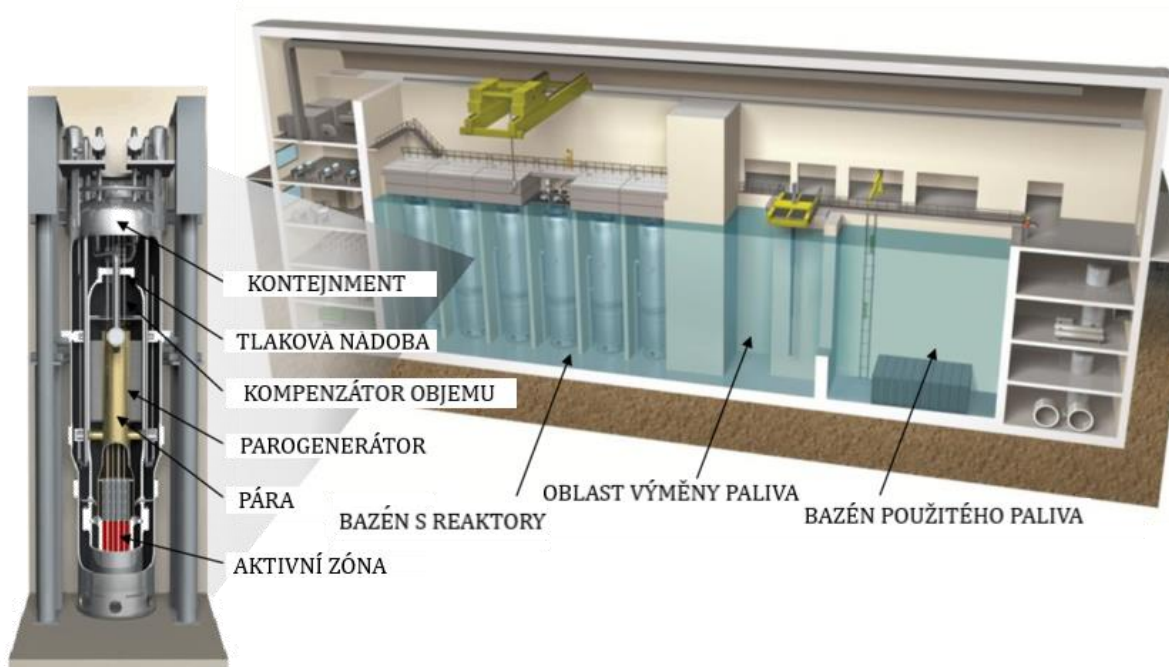
V následující tabulce jsou uvedeny aktuální projekty SMR s chlazením tekutými solemi. Z celkově 13 projektů uvedených v dokumentu „*Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*“, vydaného v roce 2022 IAEA, bylo vybráno 5 projektů.

Tab. 2-5 Aktuální projekty SMR chlazené tekutými solemi [41]

TECHNICKÉ ŘEŠENÍ	SPOLEČNOST	TYP	VÝKON [MWt/MWe]	MODULY	STATUS	PROVOZ
CMSR	Seaborg Tech. (Dánsko)	MSR	250/100	1	KD	2028
FUJI	ITMSF (Japonsko)	MSR	450/200	1	BD	-
IMSR 400	Terrestrial Energy Inc. (Kanada)	MSR	440/195	1	DD	2031
KD-FHR	KAIROS Power (USA)	FHR	320/140	1+	CD	-
LFTR	Flibe Energy (USA)	MSR	600/250	1	CD	-

2.3.3.5 NuScale

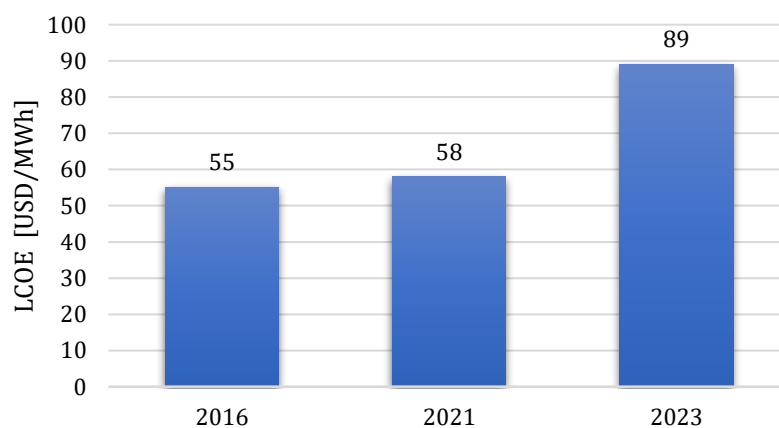
Americký projekt tlakovodního SMR NuScale (VOYGER SMR) je jedním z nejpokročilejších projektů SMR v USA. Koncept elektráren s těmito iPWR reaktory nabízí varianty čtyř, osmi nebo dvanácti modulového uspořádání, při brutto elektrickém výkonu každého modulu 77 MWe. Koncept počítá rovněž s použitím na výrobu tepla pro neelektrické aplikace nebo jako zařízení pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla (KVET). Tento iPWR se vyznačuje přirozenou cirkulací chladiva a pasivními bezpečnostními systémy, zajišťujícími chlazení reaktoru za všech možných podmínek a zmírňujícími následky vážných havárií. Jednotlivé moduly mají vlastní systém turbína-generátor, což při výměně paliva u některého z modulů umožňuje provoz modulů ostatních [34][41].



Obr. 2-3 Model JE s moduly NuScale [42]

Časový vývoj projektu NuScale lze zachytit následovně [41][43][44][45][46][47][48]:

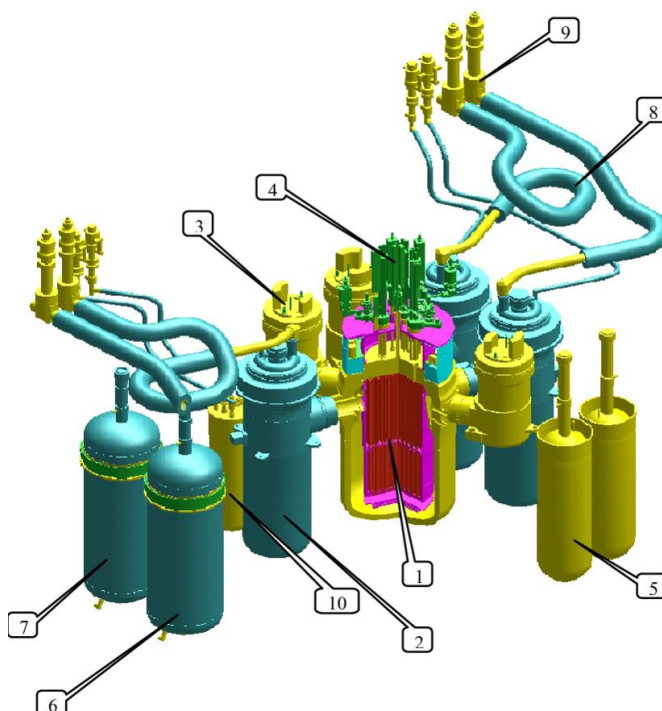
- **2000–2003** – Vyvinutí konceptu reaktoru na OSU („Ohio State Universty“) bylo v rámci výzkumu SMR v USA financovaného Ministerstvem energetiky Spojených států amerických („United States Department of Energy“ – DOE). V roce 2003 byl do provozu uveden testovací reaktor NIST („NuScale Integral System Test“), účelem zařízení bylo ověřit bezpečnostní prvky technického řešení.
- **2007** – Byla založena společnost NuScale Power LLC, jejímž cílem byla komercializace tohoto technického řešení SMR.
- **2011** – Společnost Fluor Corporation odkoupila většinový podíl v NuScale Power LLC a zafinancovala další vývoj projektu.
- **2012** – Byla podána žádost o finanční podporu projektu SMR na DOE. V tomto roce se očekávalo první zapojení FOAK v roce 2020.
- **2013** – DOE rozhodla o financování technického řešení NuScale ve výši až 226 milionů USD.
- **2014** – Cíl uvést do provozu první komerčně využívanou jednotku v Idahu v USA byl stanoven na rok 2023.
- **2015** – Společnost UAMPS („Utah Associated Municipal Power Systems“) formálně zahájila projekt CFPP („Carbon Free Power Program“) jehož cílem byla realizace komerčního SMR s technickým řešením NuScale – VOYGER-12 (původní návrh dvanácti modulové elektrárny) v Idahu.
- **2016** – NRC („US Nuclear Regulatory Comission“) byla předložena žádost o certifikaci technického řešení. Schválení žádosti bylo očekáváno v roce 2020. Dle odhadu z tohoto roku neměla cena za kWe výkonu realizované elektrárny přesáhnout 5000 USD.
- **2018** – Plán schválení technického řešení od NRC byl odsunut na rok 2022. Uvedení FOAK do provozu bylo odloženo na rok 2026.
- **2020** – Technické řešení bylo schváleno NRC. Jednalo se o první technické řešení SMR schválené NRC. Společnost na základě výzkumu a testovacího provozu NIST změnila výkon modulu z původních 50 MWe na 77 MWe, což implikovalo nutnost licencování této varianty technického řešení. Začátek výstavby FOAK, šesti modulové elektrárny VOYGER-6, v Idahu byl plánován na rok 2023 s uvedením do provozu v roce 2027.
- **2022** – Došlo k dalšímu odsunutí termínu zprovoznění FOAK na rok 2029.
- **2023** – Z důvodu nízkého zájmu zákazníků a vysokých prognozovaných měrných nákladů na výrobu („Levelised Cost of Electricity“ – LCOE) byl projekt CFPP ukončen.



Obr. 2-4 Vývoj LCOE u projektu CFPP [49]

2.3.3.6 KLT-40S

Toto technické řešení PWR SMR ruské společnosti OKBM Afrikantov³³ vychází z konstrukce reaktorů KLT-40, jež jsou v RF komerčně provozované jako pohony ledoborců. Technické řešení je přizpůsobeno pro dvou modulové využití jako plovoucí zařízení na KVET. Konstrukčně se jedná o čtyřkruhový PWR reaktor s kompaktním uspořádáním PO, nucenou cirkulací chladiva a aktivními bezpečnostními systémy. Jednotlivé moduly jsou připojené k nezávislým systémům turbína–generátor. Plovoucí elektrárna s tímto technickým řešením reaktoru je schopna při plném výkonu dodávat 70 MWe a je určena pro pokrytí spotřeby energií v odlehlých oblastech RF [37].



Obr. 2-5 Konstrukce reaktoru KLT-40S [50]

1-Reaktor, 2-PG, 3-Hlavní cirkulační čerpadlo, 4-Mechanismus regulačních tyčí,
5-Nouzové chlazení AZ, 6-Kompenzátor objemu, 7-Kompenzátor objemu, 8-Parní potrubí,
9 - Odlehčovací ventily, 10-Výměník tepla

Časový vývoj projektu KLT-40S lze zachytit následovně [41][43][44][45][46][47][51]:

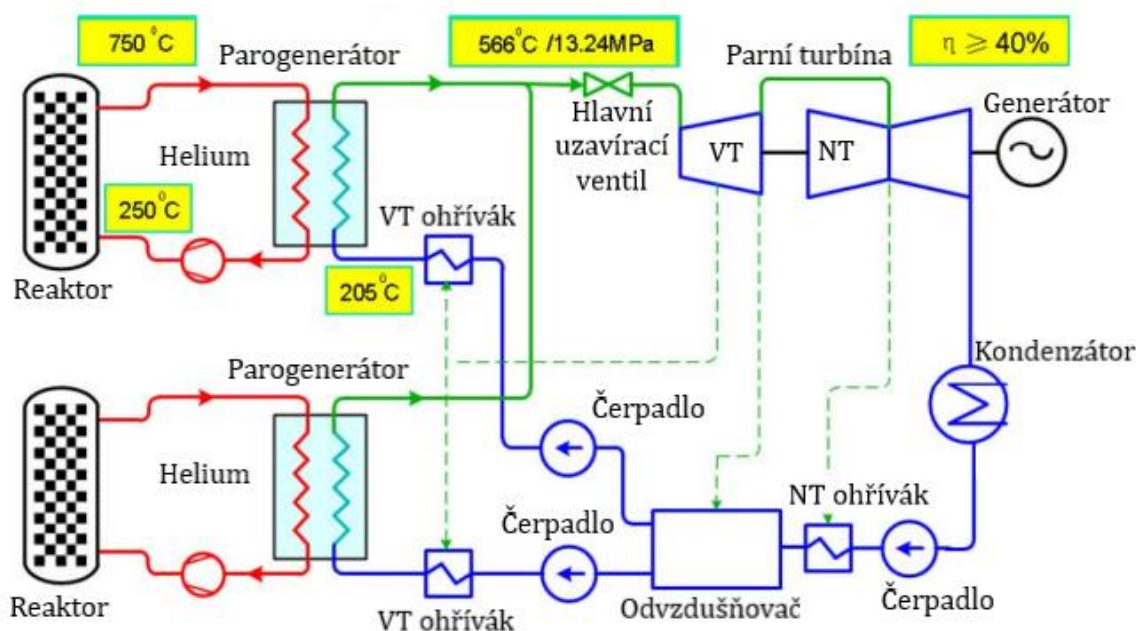
- **1998** – V RF byl odstartován projekt první plovoucí jaderné elektrárny.
- **2002** – Ministerstvo přírodních zdrojů Ruské federace schvaluje posudek vlivu na životní prostředí u technického řešení KLT-40S.
- **2003** – Projekt první plovoucí jaderné elektrárny získal povolení na umístění stavby a povolení k výstavbě od jaderné regulační organizace Rostechndzor.
- **2006** – Projekt byl po četných odkladech znovu oživen Ministerstvem pro jadernou energetiku Ruské Federace. Cena projektu byla v tomto roce odhadována v přepočtu na 140 milionů USD (9,1 miliard RUB).

³³ Jedná se o dceřinou společnost Státní korporace pro atomovou energii Rosatom (SKAER).

- **2007** – Byla zahájena konstrukce první plovoucí jaderné elektrárny Akademik Lomonosov s dvěma reaktory KLT–40S.
- **2012** – Bylo potvrzeno umístění této JE u čukotského města Pevek.
- **2014** – Zahájení komerčního provozu FOAK plánováno na rok 2017.
- **2015** – Odhadované náklady na elektrárnu Akademik Lomonosov byly v tomto roce již 740 milionů USD (37 miliard RUB). Vláda RF rozhodla o přímém financování projektu.
- **2016** – Očekávané zahájení komerčního provozu přesunuto do let 2018–2019.
- **2017** – Byla dokončena konstrukce plovoucí elektrárny Akademik Lomonosov.
- **2018** – Dokončeno testování FOAK.
- **2019** – Elektrárna byla přemístěna do města Pevek a zde byla poprvé připojena k elektrické síti.
- **2020** – Elektrárna byla plně uvedena do provozu 22. května 2020.

2.3.3.7 HTR-PM

HTR-PM („High temperature reactor pebble bed module“) je koncept reaktoru chlazeného vysokoteplotním plynem („High temperature gas cooled reactor“ – HTGR) vyvinutý na INET („Institute of Nuclear and New Energy Technology“) čínské univerzity Čching–chua („Tsinghua University“). Koncept konstrukčně vychází z experimentálního reaktoru HTR–10 provozovaného od roku 2003. HTR–PM je heliem chlazený, grafitem moderovaný reaktor navržený na dvou modulové³⁴ uspořádání. Tyto moduly, každý o tepelném výkonu 250 MWt, sdílejí společný systém turbína–generátor o výkonu 210 MWe. V PO HTR–PM cirkuluje helium nuceně při výstupní teplotě 750 °C. Elektrárna HTR–PM má projektovanou životnost 40 let a v ČLR je plánované použití tohoto konceptu SMR jako zdroje energie v sušších oblastech, které jsou více omezené z hlediska zásobování vodou [37].



Obr. 2-6 Schéma elektrárny s dvěma moduly HTR-PM [44]

³⁴ Dvou modulové uspořádání je použito v demonstrační elektrárně, u následujících projektů se předpokládá použití šesti a deseti modulového uspořádání připojeného ke společné turbíně [41].

Časový vývoj projektu HTR-PM lze zachytit následovně [37][41][43][44][46][47]:

- **2001** – Byl odstartován projekt demonstrační jednotky HTR-PM („*High Temperature Gas Cooled Reactor-Pebble Bed Module*“), projekt byl plně financován vládou ČLR.
- **2006** – V tomto roce byl projekt vládou ČLR zařazen mezi 16 prioritních projektů plánu vědeckého a technického vývoje v ČLR pro období mezi lety 2006–2020.
- **2006–2008** – Vývoj BD HTR-PM. Současně probíhalo schvalování PSAR³⁵ licenčním orgánem. Před formálním začátkem licencování byly již důležitá licenční kritéria, standardy a bezpečnostní cíle zpracovány a předběžně schváleny licenčním orgánem.
- **2009** – Zprovoznění elektrárny bylo plánováno na rok 2013.
- **2011** – Realizace je odložena v důsledku havárie japonské jaderné elektrárny Fukušima 1.
- **2012** – Byla zahájena konstrukce demonstrační elektrárny v Shidao Bay-1 v čínské provincii Shandong.
- **2014** – Zahájení provozu elektrárny Shidao Bay-1 očekáváno v roce 2017.
- **2018** – Byla dokončena stavba elektrárny, začalo testování.
- **2021** – Bylo dokončeno schválení FSAR³⁶, elektrárna získává povolení k provozu a je v tomto roce poprvé připojena k elektrické síti.
- **2023** - Elektrárna byla plně uvedena do provozu 6. prosince 2023. Elektrárna Shidao Bay-1 se v tomto roce stala první komerčně provozovanou JE s reaktorem generace IV.

2.4 KOMERČNÍ VYUŽITÍ TECHNOLOGIE SMR

V současnosti je v provozu několik prototypů jaderných zařízení s technologií SMR v RF a ČLR, nicméně technologie není ve větší míře komerčně využívána.

Komerční využití reaktorů s technologií SMR má potenciál i v jiných odvětvích než jen ve výrobě elektrické energie. SMR jsou díky svému výkonu, vysoké úrovni bezpečnosti a menšímu designu vhodné i pro následující aplikace:

- Lokální zásobování municipalit teplem
- Výroba tepla pro průmysl
- Výroba radioizotopů pro využití v medicíně a zemědělství
- Výroba vodíku elektrolýzou vody
- Odsolování mořské vody

2.4.1 LICENCOVÁNÍ

Licencováním JE se rozumí proces, při kterém jsou příslušnému držiteli licence udělovány povolení k:

- umístění,
- výstavbě,
- uvedení do provozu a
- provozování jaderné elektrárny v konkrétní lokalitě.

³⁵ PSAR – „*preliminary safety analysis report*“

³⁶ FSAR – „*final safety analysis report*“

V případě licencování JE s technologií SMR je v tomto procesu zahrnuto také schválení technického řešení aplikované na modul reaktoru a primární bezpečnostní systémy. V případě projektu SMR, ve kterém je pro dodání technologie zvolen technologický partner z jiného státu, je výhodné, aby dané technické řešení obdrželo licenci v zemi původu. Licence v zemi původu má pozitivní vliv na průběh licencování v zemi nasazení a snižuje rizika projektu [52].

Proces licencování je pro zavedení komerčního využívání SMR klíčový. Jedná se o náročný proces, který má vliv na délku realizace a cenu projektu a liší se v jednotlivých státech s rozvinutou jadernou energetikou (viz Tab. 2-7). Pro usnadnění rozsáhlého zavádění SMR bude potřebná úprava regulačních rámců v jednotlivých státech. Zjednodušení regulačního rámce je možné například prostřednictvím použití odstupňovaného přístupu³⁷ [52].

Aktuálně je činnost regulačních orgánů v kontextu technologie SMR zaměřena na následující problematiky [52]:

- **Ověření technologie** (testování komponent, modelování a demonstrace cirkulace primárního chladiva, výroba a testování paliva)
- **Zapojení zařízení sestávající se z více modulů**
- **Dodavatelský řetězec a možnosti výroby**
- **Testování zařízení onsite a v rámci výrobní továrny**
- **Výkon pasivních bezpečnostních systémů a demonstrace spolehlivosti**

Tab. 2-6 Přehled jaderných regulačních organizací v jednotlivých státech [52]

STÁT	ORGANIZACE ³⁸	ZDROJ FINANCOVÁNÍ
FRANCIE	Nuclear Safety Authority (ASN)	Jaderný průmysl
KANADA	Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC)	Vláda / jaderný průmysl
KOREJSKÁ REPUBLIKA	Nuclear Safety and Security Commission (NSSC)	Vláda / jaderný průmysl
ČLR	National Nuclear Safety Administration, (NNSA)	Vláda
RF	Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service (Rostechnadzor)	Vláda
USA	Nuclear Regulatory Commission (NRC)	Jaderný průmysl
VB	Office for Nuclear Regulation (ONR)	Jaderný průmysl

³⁷ Odstupňovaný přístup v kontextu kontrolních systémů, jako je regulační systém nebo bezpečnostní systém, představuje proces, u kterého přísnost kontrolních opatření a podmínek, které mají být použity, odpovídá v proveditelné míře pravděpodobnosti, možným důsledkům a úrovni rizika spojeného se ztrátou kontroly [53].

³⁸ Názvy organizací jsou pro zjednodušení uvedeny v anglickém jazyce.

Tab. 2-7 Průběh licencování SMR v jednotlivých státech [52]

STÁT	PŘEDLICENČNÍ PROCES	PRŮBĚH LICENCOVÁNÍ		
FRANCIE	Posouzení technického řešení ASN	Žádost o udělení stavebního povolení	Povolení k výstavbě	Povolení k provozu
KANADA	Vendor Design Review (VDR)	Povolení k přípravě lokality	Povolení k výstavbě	Povolení k provozu
KOREJSKÁ REPUBLIKA	Standard Design Approval (SDA)	Povolení k výstavbě		Povolení k provozu
ČLR	-	Povolení k výstavbě (zahrnuje hodnocení bezpečnosti lokality a dopadu na životní prostředí)		Autorizace k uvedení do provozu
RF	-	Schválení lokality	Povolení k výstavbě	Povolení k provozu
VB	Generic Design Assesment (GDA)	Schválení jaderné lokality		
USA	Standard Design Certification Standard Design Approval	Povolení k výstavbě		Povolení k provozu
		Combined construction and operating license (COL)		

KAPITOLA 3: FAKTORY ÚSPĚCHU A NEÚSPĚCHU VÝZKUMNÉ, VÝVOJOVÉ A REALIZAČNÍ FÁZE NOVÝCH JADERNÝCH TECHNOLOGIÍ

V této kapitole jsou analyzovány zásadní faktory ovlivňující úspěch a neúspěch u pokrokových projektů jaderných zařízení. Tato kapitola se vztahuje pouze na projekty jaderných zařízení na přeměnu energie pomocí jaderného štěpení, v úvahu nejsou brána zařízení využívající termojaderné fúze, jejichž využití je ve stádiu výzkumu.

Dále jsou zde porovnány současné projekty SMR s historickými projekty prvních prototypů JE a VaV fáze předcházející těmto projektům.

Závěr kapitoly je věnován alokaci faktorů, které by mohly rozhodovat o úspěchu či neúspěchu komerčního nasazení reaktorů s technologií SMR.

3.1 FAKTORY ÚSPĚCHU A NEÚSPĚCHU JADERNÝCH PROJEKTŮ

Pro analýzu byly vybrány čtyři projekty jaderných elektráren, jež jsou zde popsány z technického hlediska a následně hodnoceny na základě následujících faktorů:

- Průběh VaV fáze projektu
- Průběh povolovacích procesů
- Doba výstavby a její průběh
- Ekonomika a financování projektu
- Podpora a zajištění projektu
- Provozní zkušenosti

3.1.1 ÚSPĚŠNÉ PROJEKTY

3.1.1.1 Shippingport

Specifikace

Elektrárna Shippingport v americkém státě Pensylvánie byla prvním komerčním prototypem JE s reaktorem typu PWR na světě. Jednalo se rovněž o první komerční JE v USA. Elektrárna byla poprvé připojena k elektrické síti v roce 1957, přičemž do plného komerčního provozu byla uvedena v roce 1958 [54].

Tab. 3-1 Technické parametry elektrárny Shippingport [55]

REAKTOR	PLWBR (PWR)
TEPELNÝ VÝKON	236 MWt
ELEKTRICKÝ VÝKON	60 MWe
CHLADIVO	H ₂ O
PALIVO	Vysoce obohacený UO ₂
MODERÁTOR	H ₂ O

VaV fáze

VaV reaktorů typu PWR v USA v 50. letech 20. století byl popsán již v bodě 1.3.4.1. VaV fáze byla v tomto případě financována z vládních prostředků prostřednictvím amerického námořnictva. Přesné náklady VaV fáze pro tento projekt nejsou, z důvodu vojenského utajení, dostupné.

JE Shippingport představovala přenesení reaktorů využívaných v jaderných ponorkách do výroby elektrické energie. To dokazovalo například i použití vysoce obohaceného uranového paliva (míra obohacení 93 %) ³⁹ v reaktoru této elektrárny [55].

Licencování

V rámci zákona č. 703 – „*Atomic energy Act of 1954*“ byl v USA zaveden dvojestupňový povolovací proces JE. Jednalo se o povolení k výstavbě a povolení k provozu. Organizací zodpovědnou za licencování byla stanovena AEC, která projekt JE Shippingport iniciovala. Průběh povolovacích procesů byl značně urychlen tím, že se jednalo o demonstrační projekt [56].

Výstavba

Výstavba elektrárny byla zahájena v roce 1954 a trvala 3 roky. Reaktor pro tuto elektrárnu byl vyroben společností Westinghouse Electric Corporation.

Financování

Projekt JE Shippingport byl financován kombinací veřejných a soukromých prostředků. Přičemž majoritní podíl na financování měla vláda USA společně s americkým námořnictvem a minoritní společnost Dusquene Light Company, která byla provozovatelem elektrárny. Z celkových nákladů projektu dosahujících 72,5 mil. USD₁₉₅₇ (přibližně 808 mil. USD₂₀₂₄) zafinancovala tato společnost 22,5 mil. USD₁₉₅₇ (přibližně 251 mil. USD₂₀₂₄). Reaktor elektrárny byl ve vlastnictví AEC, která dodávala páru společnosti Dusquene Light Company, vlastníci systém turbína–generátor, která obchodovala s vyrobenou elektřinou. Tento koncept byl použit i u dalších JE v USA, uvedených do provozu v 60. letech 20. století, přičemž účelem tohoto modelu bylo snížení finančních rizik pro soukromé společnosti provozující JE [16][57].

Podpora projektu

Projekt byl součástí amerického vládního programu „*Power Reactor Demonstration Program*“ (PRDP), jehož účelem bylo přinést kapitál ze soukromého sektoru do rozvoje jaderné energetiky v USA. Vládní podpora byla v tomto ohledu nezbytná pro překonání nákladových rozdílů mezi JE a investičně výhodnějšími uhelnými elektrárnami [16].

Provoz

JE Shippingport byla provozována do roku 1982. Během provozu elektrárny byly postupně testovány tři varianty AZ reaktoru, přičemž poslední instalovaná varianta AZ byla množivého typu. Elektrárna nezaznamenala během svého provozu žádnou havárii, a mimo demonstrace komerční výroby elektřiny⁴⁰ byl její přínos v testování nových technických řešení reaktorů typu PWR a školení odborného personálu [55].

3.1.1.2 Novovoronež II

Specifikace

Elektrárenské bloky Novovoronež 2-1 a Novovoronež 2-2 byly do komerčního provozu uvedeny v letech 2017, respektive 2019. Tyto bloky se vyznačují reaktory VVER–1200 (V–392M), které se řadí mezi reaktory generace III+ (viz 1.3.5.1). Uvedení prvního bloku Novovoronež 2-1 do provozu v roce 2017 bylo prvním komerčním nasazením reaktoru generace III+ na světě [58][59].

³⁹ Pro srovnání, v současnosti je průměrné obohacení paliva u JE s reaktory typu PWR 3,5 % [4].

⁴⁰ Do elektrické sítě dodávala JE Shippingport elektřinu do roku 1974 [55].

Tab. 3-2 Technické parametry elektrárny Novovoronež II [58][59]

REAKTOR	V-392M (VVER-1200)
TEPELNÝ VÝKON	2x3200 MWt
ELEKTRICKÝ VÝKON	2x1181 MWe
CHLADIVO	H ₂ O
PALIVO	Obohacený UO ₂
MODERÁTOR	H ₂ O

VaV fáze

Technické řešení reaktorů VVER-1200 navazuje na reaktory generace III typu VVER-1000⁴¹. Vývoj technického řešení byl zahájen v polovině prvního desetiletí 21. století a zaměřoval se na zvýšení úrovně bezpečnosti oproti výchozímu technickému řešení, při zachování stejného systému sekundárního okruhu. Vývoj technického řešení se zaměřil i na zajištění následujících bezpečnostních prvků [60]:

- Možnost dlouhodobého chlazení reaktoru bez nutnosti elektrické energie
- Dlouhodobý odvod zbytkového tepla nezávislý na jímce tepla (chladičí věž, moře)
- Ochrana integrity reaktoru a přidružených systémů při roztavení jádra

Tyto bezpečnostní prvky se po havárii JE Fukušima-1, v roce 2011, ukázaly být zcela zásadní a jsou jedním z rysů reaktorů generace III⁺.

VaV tohoto technického řešení byl veden pod záštitou SKAER [60].

Licencování

Dlouhá zkušenost s provozem reaktorů VVER-1000 usnadnila a urychlila proces licencování designu u reaktorů VVER-1200. Technické řešení AES-92, které bylo předlohou pro reaktory instalované v Novovoroneži, získalo v roce 2007 certifikát od „European Utility Requirements“ (EUR). Toto technické řešení tedy odpovídalo i mezinárodním standardům [60].

Výstavba

Výstavba prvních dvou bloků JE Novovoronež II byla zahájena v roce 2008, respektive v roce 2009 v případě druhého bloku. Plánovaná délka výstavby byla 3 až 4 roky. Očekávané měrné investiční náklady byly, v době zahájení výstavby, 2224 USD₂₀₀₈/kWe (přibližně 3200 USD₂₀₂₄/kWe). Fáze výstavby a testování se u prvního bloku prodloužila na 9 let a na 10 let u druhého bloku. Prodloužení výstavby jistě zasáhlo do výsledných měrných investičních nákladů, výše těchto nákladů však není, vzhledem k současné geopolitické situaci, veřejně dostupná [61].

Financování

Celý projekt včetně VaV fáze byl financován z prostředků koncernu Rosenergoatom, který je součástí SKAER.

Podpora projektu

Projekt JE Novovoronež II byl od svého začátku prioritizován v rámci SKAER a podporován vládou RF. SKAER kromě realizace JE v RF dodává svá technická řešení a zajišťuje výstavbu i v jiných státech, jako například v Číně, Indii nebo Turecku. Design VVER-1200 byl vyvíjen i pro zakázky v těchto státech, přičemž úspěch projektů s tímto technickým řešením reaktoru v RF má zásadní vliv na zisk dalších mezinárodních zakázek pro SKAER.

⁴¹ Konkrétně verze V-392M (VVER-1200) instalovaná v bloku 6 a 7 Novovoronežské JE konstrukčně vychází z designu AES-92 (VVER-1100) [60].

Provoz

Dva bloky JE Novovoronež II dodaly do roku 2022⁴² do elektrické sítě okolo 70,5 TWh elektrické energie a společně se dvěma staršími bloky JE Novovoronež I pokrývají přibližně 90 % celkové spotřeby elektřiny ve Voronežské oblasti [58][59][62].

3.1.2 NEÚSPĚŠNÉ PROJEKTY

3.1.2.1 Molten Salt Breeder Reactor (MSBR)

Specifikace

MSBR byl koncept reaktoru pro demonstrační JE v průběhu 60. a 70. let 20. století v ORNL v USA. Vývoj konceptu MSBR byl motivován výsledky z provozu experimentálního reaktoru MSRE a výzkumu množivých reaktorů chlazených tekutými solemi v ORNL (viz 1.3.4.7). Program na vývoj tohoto reaktoru byl ukončen v roce 1976 [29].

Tab. 3-3 *Technické parametry konceptu elektrárny s MSBR [63]*

REAKTOR	MSBR (MSR)
TEPELNÝ VÝKON	2225 MWt
ELEKTRICKÝ VÝKON	1000 MWe
CHLADIVO	Chladivová sůl (NaF, NaBF ₄)
PALIVO	Palivová sůl (LiF, BeF ₂ , UF ₄)
MODERÁTOR	Grafit

VaV fáze

Předmětem VaV fáze tohoto projektu bylo zejména řešení problémů s odolností komponent reaktoru vůči použitým materiálům fluoridových solí, zachycení radioaktivního tritia⁴³ a optimální zajištění výroby a údržby cirkulujícího paliva v elektrárně s instalovaným výkonem 1000 MWe. Zkoumané byly i alternativní koncepty technického řešení reaktoru zahrnující například variantu bez moderátoru či variantu s konvertorem (viz 1.3.4.7) [29][63].

Financování

Projekt MSBR byl financován americkou vládou, přičemž schvalování financování bylo v pravomocích AEC. V roce 1972 byl ze strany ORNL představen návrh vývojového programu zakončeného výstavbou demonstrační jednotky JE s MSBR. Odhadované roční náklady tohoto programu byly 350 mil. USD₁₉₇₂ (přibližně 2,62 mld. USD₂₀₂₄) a očekávaná délka programu byla 11 let. Tento program byl ze strany AEC zamítnut [29].

Podpora projektu

Projekt MSBR od svého začátku soupeřil o podporu AEC s programem vyvíjejícím rychlý množivý reaktor chlazený tekutými kovy („*Liquid Metal Fast Breeder Reactor*“ – LMFBR), jelikož plán na zapojení množivých reaktorů do komerční výroby elektrické energie v USA počítal pouze s jedním typem těchto reaktorů. Program LMFBR byl AEC upřednostněn, což zapříčinilo ukončení projektu MSBR v roce 1976. Hlavním důvodem volby programu LMFBR bylo množství již vynaložených finančních prostředků a vospělost programu [29].

⁴² Informace o výrobě elektrické energie po roce 2022 nejsou, vzhledem k současné geopolitické situaci, veřejně dostupné.

⁴³ Tento radioaktivní izotop vodíku, který vzniká v MSR při reakcích neutronů s lithiem, snadno proniká do kovů a pokud by nebyl zachycen, hrozí jeho uvolnění do atmosféry [29].

3.1.2.2 Superphénix

Specifikace

Superphénix byl mezinárodní⁴⁴ projekt JE s reaktorem typu FBR. Elektrárna byla kromě komerční výroby elektřiny používána na přepracování vyhořelého jaderného paliva z francouzských JE. Tento FOAK projekt JE typu FBR byl do provozu uveden v roce 1986 [64].

Tab. 3-4 Technické parametry elektrárny Superphénix [65]

REAKTOR	Na-1200 (FBR)
TEPELNÝ VÝKON	3000 MWt
ELEKTRICKÝ VÝKON	2x620 MWe
CHLADIVO	Na
PALIVO	PuO ₂ , UO ₂
MODERÁTOR	-

VaV fáze

Technologie reaktorů typu FBR byla v 60. a 70. letech 20. století předmětem VaV v několika evropských státech. Důvodem byla zejména vysoká cena uranového paliva a možnost znovuvyužití vyhořelého jaderného paliva v tomto typu JE. V rámci států zapojených do projektu Superphénix byl program VaV FBR nejrozsáhlejší ve Francii, kde byl veden státními společnostmi CEA („Commissariat à l’Energie Atomique“) a EdF („Électricité de France“). V průběhu programu byl v roce 1967 do provozu uveden sodíkem chlazený experimentální FBR Rapsodie, jehož účelem bylo testování materiálů a paliv. Využití na výrobu elektřiny bylo testováno na prototypu JE s LMFBR Phénix uvedeného do plného provozu v roce 1974. Na obou těchto zařízeních došlo k několika haváriím spojených s únikem sodíku a kontaminací chladiva vzduchem. VaV technologie LMFBR byl velice nákladný a ve Francii do něj bylo v letech 1973–1996 investováno o 50 % více veřejných peněžních prostředků než do VaV technologie LWR [66].

Licencování

Přes komplikace s FOAK technickým řešením JE Superphénix byl průběh povolovacích procesů v případě tohoto projektu časově srovnatelný s tehdejšími projekty JE s PWR ve Francii. Povolovací procesy JE Superphénix byly zajištěny francouzským jaderným regulátorem [64].

Výstavba

Fáze výstavby a testování JE Superphénix probíhala mezi lety 1976–1986. V průběhu této fáze došlo k několika protestům proti realizaci tohoto projektu, z nichž největší byla demonstrace v roce 1977, které se zúčastnilo až 60 tisíc lidí. Navzdory těmto událostem výstavba pokračovala dle plánu do roku 1981.

V roce 1982 bylo staveniště elektrárny cílem sabotážního raketového útoku, který poškodil kontejnment reaktoru. Uvedení reaktoru do provozu bylo odkládáno a náklady fáze výstavby tím vzrostly k roku 1986, kdy byla JE uvedena do provozu, o 80 % a jejich výše byla v přepočtu 9,5 mld. USD₂₀₀₈ (přibližně 13,8 mld USD₂₀₂₄) [66].

Financování

Pro účel řízení projektu a provozování JE Superphénix byla založena společnost NERSA („Centrale Nucléaire Européenne à Neutrons Rapides S.A.“), vlastnictví NERSA bylo do zakládajících společností rozděleno následovně [64]:

⁴⁴ Projekt byl veden v mezinárodní spolupráci Francie, Itálie a Spolkové republiky Německo.

- 51 % EdF (Francie)
- 33 % ENEL (Itálie)
- 15 % RWE (Německo)

Projekt Superphénix byl financován prostřednictvím NERSA z rozpočtů těchto státních společností, přičemž každá z těchto společností se zároveň zavázala požadovat finanční podporu příslušné vlády [64].

Podpora projektu

Projekt byl od přípravné fáze odmítán velkou částí odborné i laické veřejnosti, což vytvářelo tlak na vlády zapojených států. Silný odpor proti projektu byl, vzhledem k umístění jaderné lokality⁴⁵, i ve Švýcarsku, které nebylo do projektu Superphénix zapojeno. Problémy tohoto nadnárodního projektu vznikaly, vlivem nedostatečné standardizace, mezi zapojenými státy také na diplomatické scéně. Přes všechny negativní faktory byl projekt Superphénix realizován a nadále pokračovala i evropská spolupráce na vývoji reaktorů s technologií FBR [64].

Provoz

Koncept této JE, založený na úspoře uranového paliva, byl zastaralý již během uvedení do provozu v roce 1986, jelikož cena uranového paliva během přípravy a realizace projektu značně poklesla. V roce uvedení elektrárny do provozu došlo k havárii JE Černobyl, tato událost přispěla k další vlně odporu proti této JE [66].

V elektrárně došlo během jejího provozu k několika haváriím, spojeným s únikem sodíkového chladiva, které vedly k přerušování provozu JE. Překážkou v provozu JE se ukázalo být obnovení povolení k provozu po těchto haváriích, což ve spojení s administrativním zpožděním způsobilo, že elektrárna byla do svého vyřazení z provozu v roce 1996 v komerčním provozu pouze čtyři a půl roku. Za dobu své životnosti dosáhla elektrárna kapacitního faktoru 7,1 %, čímž se řadí mezi nejhorší v historii [66].

3.2 POROVNÁNÍ PROJEKTŮ SMR S PROJEKTY PRVNÍCH PROTOTYPŮ JE

V následujícím textu jsou na základě informací rozvedených v Kapitole 1 a Kapitole 2 porovnány projekty prvních prototypů JE a aktuálních projektů SMR v oblastech:

- motivace a zapojení státu do projektů,
- financování projektů a
- rizik spojených s projekty.

3.2.1 MOTIVACE A ZAPOJENÍ STÁTŮ

U projektů prvních JE byl evidentní značný vliv vojenských zájmů. Zapojení armády do projektů bylo přirozené vzhledem k tomu, že armáda většinou zaštiťovala VaV fázi u dané technologie reaktoru a byla zde možnost potenciálního přínosu z provozu elektrárny pro vojenství ve formě testování materiálů a paliv pro jaderné pohony nebo dvouúčelových JE s možností výroby plutonia. Projektům, ve kterých byla armáda jedním ze stakeholderů, byla vlivem výsadního postavení armády po Druhé světové válce věnována vysoká pozornost a podpora dané vlády.

Projekty prvních komerčních JE byly pro politické zastoupení daných států otázkou státní prestiže, vlivu a demonstrace výsledků vědeckotechnického pokroku.

⁴⁵ Lokalita Creys–Malville (Francie) se nachází přibližně 56 km od Švýcarských hranic.

Zapojení států do těchto projektů bylo zcela fundamentální, a to i v zemích s tržní ekonomikou.

Investice do jaderné energetiky jako nového energetického odvětví představovaly pro investory ze soukromého sektoru obrovská rizika, která by bez státního zapojení nebyli ochotni podstoupit⁴⁶. Příkladem zapojení státu pro podpoření investic do jaderné energetiky ze soukromého sektoru byl program PRDP v USA (viz 3.1.1.1).

Současné projekty SMR jsou z hlediska celospolečenského přínosu motivovány především zlepšením konkurenceschopnosti jaderné energetiky, zvýšením energetické bezpečnosti a přechodem k nízkoemisním zdrojům elektrické energie. Státy zahrnují SMR do svých energetických koncepcí, ty však často nejsou rozpracovány do detailu a chybí konkrétní nástroje státní podpory. V případě RF a ČLR je státní podpora zaměřena primárně na výstavbu nových velkých jaderných zdrojů (viz Obr. 2-1) a v případě „západních států“ jsou prioritizovány obnovitelné zdroje energie (OZE).

3.2.2 FINANCOVÁNÍ PROJEKTŮ

VaV fáze u jednotlivých typů reaktorů souvisela s vojenským využitím. Financování této fáze zajišťovala v dané zemi přímo armáda, pověřený vládní orgán nebo státní organizace. V zemích s centrálně plánovanou ekonomikou byly takto financovány i další fáze projektů. V zemích s tržní ekonomikou bylo státní financování u projektů prvních JE rovněž neodmyslitelné. V Evropě byly tyto projekty rovněž financovány pouze z veřejných prostředků a elektrárny zde byly následně provozovány příslušnou státní organizací. Podíl financování ze soukromého sektoru byl u těchto projektů pouze v USA. Větší část financování byla však i zde zajištěna z veřejných prostředků.

Způsoby financování projektů SMR se liší v jednotlivých státech. V RF a ČLR je financování zajištěno státními společnostmi, respektive dceřinými společnostmi SKAER v případě RF. Projekty SMR v ostatních státech jsou v současnosti financovány společnostmi v soukromém nebo státním vlastnictví. Vývoj technických řešení je financován z prostředků společností, jež dané technické řešení SMR vyvíjí. Státní prostředky jsou věnovány na výzkum technologií a podporu společností vyvíjejících technická řešení prostřednictvím grantů nebo přidělení rozpočtu státní společnosti.

3.2.3 RIZIKA

3.2.3.1 Finanční rizika

Vysoké počáteční kapitálové investice spojené s realizací JE byly příčinou vysokých finančních rizik dříve stejně jako dnes. V případě prvních projektů komerčních JE byla tato rizika podstoupena ze strany armád nebo státních organizací. Trh s elektřinou byl v tomto období rozvoje jaderné energetiky vládami plně regulovaný⁴⁷, což představovalo snížení finančních rizik pro investory [38].

Současný trh s elektřinou je liberalizovaný a cena elektrické energie na burze je volatilní. Tato skutečnost snižuje jistoty a zvyšuje finanční rizika u projektů nových jaderných zdrojů. Tento problém sdílí i projekty SMR. V případě projektu CFPP (viz 2.3.3.5) byla konkurenceschopnost této JE na trhu s elektřinou zásadní faktor, který rozhodl o neúspěchu projektu.

Finanční rizika se rovněž zvyšují s časovým prodloužením projektu ve fázi přípravy nebo ve fázi výstavby. Náklady na financování projektu jsou v současnosti hlavní položkou celkových nákladů u projektů JE. U projektů SMR, stejně jako u současných projektů velkých JE, dochází

⁴⁶ Výjimkou byla společnost GE, která bez státního financování realizovala projekt prototypu JE Dresden-1.

⁴⁷ Spotřebitelé platili za elektrickou energii standardizovanou cenu [38].

k opakovanému odkládání termínů, což zvyšuje finanční rizika a snižuje konkurenceschopnost jaderné energetiky na trhu s elektřinou.

3.2.3.2 Bezpečnostní rizika

Z hlediska bezpečnosti byly projekty prvních JE na značně nižší úrovni a jejich bezpečnostní systémy musely být během jejich provozu upravovány tak, aby vyhovovaly pozdějším bezpečnostním standardům. Zároveň ale nižší nároky na bezpečnost u těchto projektů urychlily proces licencování a fáze výstavby těchto JE. Problematické z hlediska bezpečnosti se ukázaly být především JE s reaktory typu FBR chlazenými tekutým sodíkem.

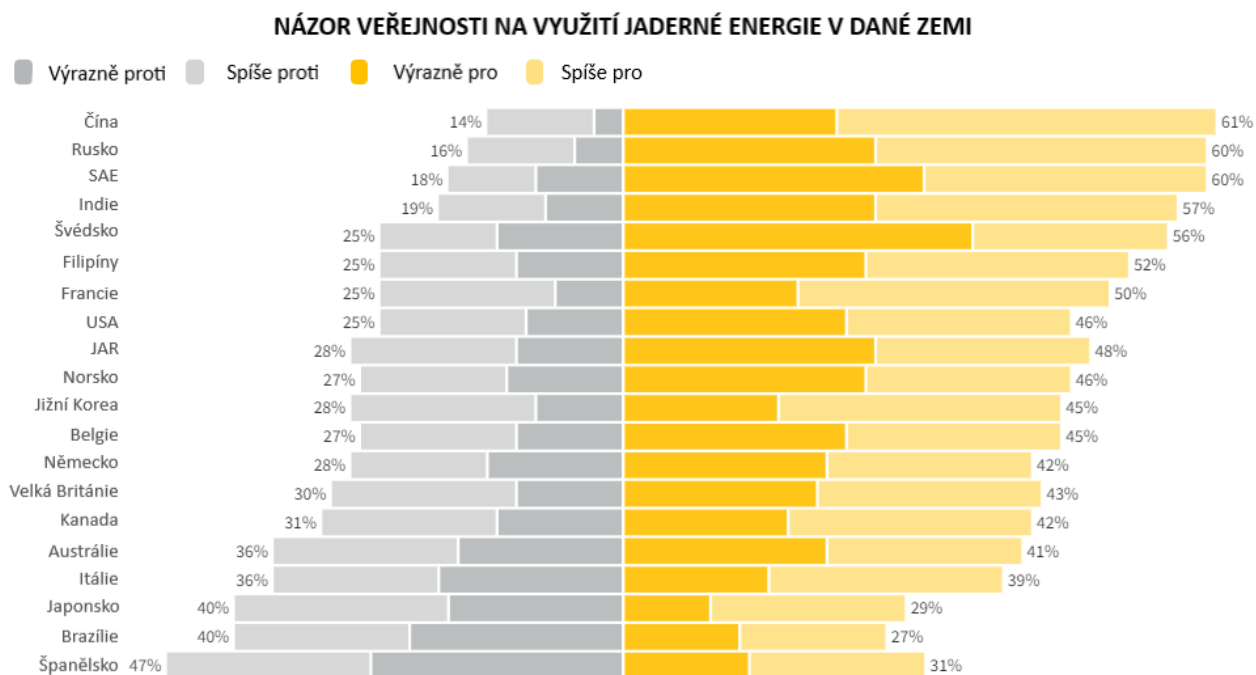
Koncept SMR je založen na dosažení vysoké úrovně bezpečnosti. Bezpečnostní prvky u většiny technických řešení SMR splňují bezpečnostní požadavky stanovené na základě analýzy JE Fukušima. Riziko z hlediska bezpečnosti představuje použití tekutých kovů jako chladiva i u SMR. Dalším bezpečnostním riziko představuje, pro technická řešení SMR tomuto nasazení přizpůsobená, instalace modulů do zařízení s dříve instalovanými moduly v provozu.

3.2.3.3 Riziko podpory veřejnosti

Podpora veřejnosti je důležitý faktor z hlediska tlaku na vládu nebo nadnárodní organizace. Historicky byla podpora jaderné energetiky ze strany veřejnosti kolísavá a značně ji ovlivnily události jaderných havárií.

Postoj veřejnosti k jaderné energetice obecně se v současnosti v různých státech liší. Největší podporu má jaderná energetika v ČR a RF. V těchto státech jsou aktuálně ve výstavbě nové jaderné bloky s reaktory generace III+ a v provozu zde jsou první komerční JE s technologií SMR. V obou těchto státech není v blízké době v plánu odstup od energetických zdrojů spalujících fosilní paliva, které tvoří více než polovinu jejich energetického mixu.

Postoj veřejnosti k jaderné energetice ve státech odstupujících od fosilních zdrojů je paradoxně více negativní a podporovány jsou zde zejména obnovitelné zdroje, které ovšem z hlediska stability, pokrytí zatížení a zapojení v teplárenství nejsou vhodnou náhradou fosilních zdrojů [68].



Obr. 3-1 Průzkum postoje veřejnosti k jaderné energetice v dané zemi [68]

3.3 FAKTORY ÚSPĚCHU A NEÚSPĚCHU PROJEKTŮ SMR

Na základě analýzy faktorů úspěchu a neúspěchu jaderných projektů (viz 3.1) a stavu projektů SMR ve světě (viz 2.3.3) byly alokovány hlavní rizikové body při realizaci projektů SMR, které by potenciálně mohly ohrozit realizaci jaderných zařízení tohoto typu a zároveň byla formulována doporučení pro řešení těchto problémů.

3.3.1 SYSTÉM A MÍRA FINANČNÍ PODPORY STÁTU

Státní finanční podpora v oblasti SMR má v současnosti zejména podobu grantů určených na vývoj technického řešení. Vládní finanční podpora ve formě grantového financování byla poskytnuta na realizaci projektu CFPP (viz 2.3.3.5), který byl neúspěšně ukončen vlivem rostoucích nákladů na kapitál implikující špatnou konkurenceschopnost této elektrárny na lokálním trhu s elektřinou [49].

Grantová finanční podpora státu nedokázala zabránit neúspěchu projektu CFPP, jelikož neochránila investory před tržními riziky. Projekty FOAK jsou obecně nákladnější než následující projekty NOAK, což zhoršuje jejich konkurenceschopnost na trhu. Státní podpora by se tedy u těchto projektů měla orientovat především na zajištění záruk, které sníží tržní rizika a rizika návratnosti investic pro investory, tedy konkrétně [38]:

- **Smlouva o rozdílu (CfD)** – Rozdělí riziko nejistého vývoje ceny elektřiny na trhu mezi smluvní strany.
- **Smlouva o výkupu (PPA)** – Stanoví pevnou cenu, množství a dobu po kterou bude za těchto podmínek od výrobce elektřina vykupována, po tuto dobu tedy garantuje výrobci výnos.

Vhodným zapojením státu může být rovněž poskytnutí úvěru s nízkou úrokovou sazbou na financování projektu. Příkladem takového zapojení je v současnosti projekt FOAK společnosti Ontario Power Generation v kanadské jaderné lokalitě Darlington, na jehož přípravu poskytla Kanadská infrastrukturní banka („Canada Infrastructure Bank“) úvěr s nízkou úrokovou sazbou⁴⁸ ve výši 970 milionů kanadských dolarů (CAD) [67].

3.3.2 MNOHO TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ SMR S RŮZNÝMI TECHNOLOGEMI

Nejnovější soubor technických řešení SMR „*Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*“ vydaný IAEA v roce 2022 obsahuje 71 technických řešení SMR⁴⁹.

Velké množství vyvíjených technických řešení SMR může způsobit rozptýlení státní finanční podpory vývoje technologie SMR. Při vyvinutí velkého množství designů SMR rovněž hrozí přesycení trhu. Technologie SMR chlazených tekutými kovy a tekutými solemi představují sice pokroková řešení s vysokou termodynamickou účinností, ale jejich komerční nasazení je stále spojeno s riziky plynoucími s malými provozními zkušenostmi a potenciálními technickými a bezpečnostními problémy s materiály chladiv. Komerční nasazení SMR s těmito technologiemi by bylo zároveň spojeno s komplikovanými a delšími povolovacími procesy, které jsou v současnosti přizpůsobené jaderným zařízením s reaktory typu PWR, respektive BWR. Nedostatek provozních zkušeností je problém i u technologie HTGR, nicméně tato technologie je z hlediska bezpečnosti a technické vyspělosti nejlepší z variant reaktorů IV. generace.

Pozornost v aktuální fázi komerčního nasazování SMR by měla být věnována technickým řešením s technologií chlazení lehkou vodou. Tato technologie je ověřena dlouhodobým provozem velkých

⁴⁸ Přesná výše úrokové sazby tohoto úvěru není veřejně dostupná.

⁴⁹ Bez započítání technických řešení mikroreaktorů („*Micro Modular Reactor*“ – MMR)

bloků s PWR nebo BWR a není tedy, v zemích s rozvinutou jadernou energetikou, neznámá příslušným národním jaderným regulátorům.

3.3.3 PROBLÉM S REALIZACÍ PROJEKTŮ FOAK

Realizace demonstračních projektů FOAK je pro ověření technologie a přechod k sériovému nasazování komerčních jednotek SMR stejného technického řešení zcela zásadní. U těchto projektů jsou v současnosti časté odklady termínů. Příčinou odkladů jsou zvýšená finanční rizika spojená s FOAK projektem, ale i nejistý postoj států k technologii SMR. Investor nemá v současnosti záruky týkající se realizace projektů následujících po investičně náročném FOAK.

Komerční využívání technologie SMR v energetice, a tedy i výstavba FOAK, je především v zemích odstupujících od fosilních zdrojů otázkou státních zájmů. Zájem na úspěšné demonstraci technologie mají fundamentálně rovněž společnosti vyvíjející technická řešení SMR. Je zde tedy opodstatněná možnost pokrytí financování projektů FOAK těmito stakeholdery.

3.3.4 ZAJIŠTĚNÍ DODAVATELSKÉHO ŘETĚZCE

Vybudování efektivně fungujícího dodavatelského řetězce je pro SMR, jako novou technologii založenou na standardizované sériové výrobě, velice důležitým faktorem úspěchu. Neefektivní a složitý dodavatelský řetězec může způsobit prodloužení doby výstavby, čímž se značně zhoršuje ekonomická efektivnost projektu. Budování dodavatelského řetězce bude zejména v evropském prostředí vyžadovat rozšířenou mezinárodní spolupráci.

Současný přístup při výstavbě nových JE je většinou založen na velkém množství dodavatelů, z nichž každý dodává některou z komponent elektrárny. Výjimkou je ruská SKAER, která pokrývá dodávku i instalaci všech klíčových komponent elektrárny. SKAER zároveň zajišťuje i zavážení paliva, zaškolení operátorů, zpracování jaderného odpadu i budoucí vyřazení elektrárny z provozu. Tento přístup zjednodušuje průběh výstavby a snižuje rizika pro investory.

Přiblížení tomuto schématu dodavatelského řetězce by značně usnadnilo komercializaci SMR. Jeho dosažení by bylo možné například výběrem technologického partnera s rozšířeným polem působnosti.

3.3.5 LICENCE V ZEMI PŮVODU

Licence v zemi původu je podmínkou pro povolení všech životních etap jaderného zařízení v ČR a dalších zemích. Podmínkou získání licence v zemi původu je dostatečně bezpečné a vyspělé technické řešení. Licenci v zemi původu vydávají jaderné dozory, které samy ověřují bezpečnostní výpočty a analýzy. Státní dozor tak garantuje úroveň bezpečnosti technického řešení.

Licence technického řešení SMR v zemi původu je značně výhodná pro menší státy plánující komerční nasazení JE s technologií SMR, zejména pak pro ty, které doposud nemají zkušenost s komerčním provozem JE. Licence v zemi původu zajišťuje určitou úroveň bezpečnosti, ke které bude následně přihlížet jaderný regulátor v zemi, která technologii kupuje. To představuje možnost urychlení povolovacích procesů a vyšší potenciál rozšíření komerčního využívání jaderných zařízení s technologií SMR.

KAPITOLA 4: DOPAD NÁKLADŮ VÝZKUMNÉ A VÝVOJOVÉ FÁZE DO EKONOMICKÉ EFEKTIVNOSTI PROJEKTŮ SMR

Náklady VaV fáze projektu představují důležitou část celkových nákladů spojených s daným projektem. Do nákladů VaV fáze obecně spadají náklady na [69]:

- laboratorní výzkum zaměřený na objevování nových poznatků,
- hledání využití nových výsledků výzkumu,
- formování konceptů a navrhování možných alternativ výrobků nebo procesů,
- testování při hledání nebo hodnocení alternativních technických řešení nebo postupů,
- úpravy dokumentace nebo návrhů technického řešení nebo výrobního procesu,
- návrh, konstrukce a testování experimentálních prototypů a modelů,
- návrh, konstrukce a provoz prototypu zařízení, který není v měřítku, jež je ekonomicky proveditelné pro komerční výrobu,
- inženýrskou činnost potřebnou k vývoji návrhu technického řešení tak, aby splňovalo specifické funkční a ekonomické požadavky a bylo připraveno k výrobě,
- návrh a vývoj nástrojů používaných k usnadnění VaV nebo součástí výrobku či procesu, které jsou předmětem VaV činností.

4.1 EKONOMICKÝ MODEL PWR SMR

4.1.1 VSTUPNÍ INFORMACE

Pro ekonomický model JE bylo zvoleno uspořádání s jedním modulem SMR s technologií PWR. Do ekonomického modelu jsou zahrnuty náklady na VaV fázi pro dané technické řešení PWR SMR. Informace o nákladech VaV fáze, použitých v tomto ekonomickém modelu, pochází z prohlášení a dokumentů americké společnosti NuScale Power LLC. Náklady VaV fáze jsou uvedené pro iPWR technické řešení NuScale. Tyto náklady jsou v modelu stanoveny na 1,5 miliardy USD [70].

Ekonomický model je dále zpracován za následujících předpokladů:

- Ekonomické propočty v modelu jsou zpracovány z hlediska projektu.
- Zařízení bude využíváno pouze ke komerční výrobě elektřiny.
- Elektrárna je provozována celoročně, pouze s odstávkami na výměnu paliva. Zatěžovatel je stanoven na 90 %, čemuž odpovídá doba využití maxima 7884 hodin ročně.
- Zařízení bude umístěno v České republice (ČR).
- Jedná se o projekt první komerční JE s technologií SMR v ČR.
- Přípravná fáze projektu a fáze výstavby jsou obě stanoveny na 5 let.
- Každoročně jsou odváděny peníze na jaderný účet, v rámci zajištění zpracování jaderného odpadu a příspěvků obcím v blízkém okolí zařízení. Tyto poplatky jsou pro provozovatele energetického jaderného zařízení, dle §122 zákona č. 263/2016 Sb., ve znění pozdějších předpisů, (atomový zákon – AtZ), stanoveny na 55 Kč za každou vyrobenou MWh elektrické energie.
- Náklady VaV fáze jsou započítány do prvního roku přípravné fáze projektu.
- Investiční a provozní náklady v ekonomickém modelu byly konzultovány a verifikovány odborníky z Útvaru rozvoj SMR společnosti ČEZ a. s.
- Náklady bloků jednoho technického řešení jsou stejné.
- Projekt je opatřen státními zárukami o výkupu elektrické energie a státní zárukou za úvěr.

Ekonomický model nezohledňuje:

- využití zařízení pro KVET
- využití zařízení pro poskytování podpůrných služeb
- náklady spojené s úpravami elektrické sítě
- provozní náklady spojené se spotřebou vody, materiálů a elektřiny z cizích zdrojů
- časové rozložení nákladů VaV fáze
- odpisy zařízení a daně z příjmu

4.1.2 UVAŽOVANÉ VARIANTY IMPLEMENTACE VaV FÁZE

V ekonomickém modelu jsou uvažovány různé varianty implementace VaV fáze pro dané technické řešení SMR. Varianty se odlišují v počtu realizovaných projektů SMR daného technického řešení, jež sdílejí VaV fázi.

Varianty uvažované v ekonomickém modelu jsou:

- **Varianta 1 (V1)** – Tato varianta počítá s realizací pouze jednoho zařízení s daným technickým řešením SMR. Varianta odpovídá například nasazení reaktoru Na-1200 (FBR) v rámci elektrárny Superphénix uvedené do provozu ve Francii v roce 1986. Toto technické řešení reaktoru nebylo použito pro žádnou další komerční elektrárnu [64].
- **Varianta 2 (V2)** – Tato varianta počítá s realizací deseti projektů SMR se stejným technickým řešením reaktoru. Příkladem podobné implementace technického řešení reaktoru jsou například VVER reaktory typu V-230 (VVER-440). Tento typ reaktoru byl uveden do komerčního provozu v celkem 12 elektrárenských blocích v SSSR, Německé demokratické republice a v Československé socialistické republice.
- **Varianta 3 (V3)** – Tato varianta zahrnuje stonásobné komerční nasazení reaktoru daného technického řešení. Tato forma nasazení nemá v současnosti v jaderné energetice svou obdobu, nicméně je možné ji uvažovat u projektů SMR. Konkrétně se jedná například o nasazení SMR ve VB, kde je v plánu do roku 2050 zvýšit instalovaný výkon v jaderných zdrojích o 17,5 GW právě JE s SMR⁵⁰. V závislosti na volbě technického řešení se pak pohybuje i počet projektů elektrárenských bloků sdílejících VaV fázi (viz Tab. 4-1) [71].

Tab. 4-1 Plán nasazení SMR ve VB do roku 2050

TECHNICKÉ ŘEŠENÍ ⁵¹	ELEKTRICKÝ VÝKON/MODUL [MWe]	POČET MODULŮ SMR [-]
NUWARD	170	Až 103
BWRX-300	290	Až 61
UK SMR	470	Až 38

Tab. 4-2 Přehled variant implementace VaV fáze pro ekonomický model [70]

VARIANTA IMPLEMENTACE	POČET REAKTORŮ [-]	PŘÍKLADY PROJEKTŮ	NÁKLADY VaV [mld. USD]	NÁKLADY VaV [mld. Kč]
Varianta 1	1	Superphénix	1,5	33,45
Varianta 2	10	VVER-440 (V-230)	0,15	3,35
Varianta 3	100	Projekty SMR	0,015	0,33

⁵⁰ Zajištění instalovaného výkonu v JE typu SMR je součástí tohoto plánu, jež zahrnuje i na velké bloky.

⁵¹ Příklady technických řešení SMR aktuálně uvažovaných technologických partnerů ve VB

4.1.3 INVESTICE

Investice ve fázi přípravy projektu a ve fázi výstavby vychází z měrných investičních nákladů zařízení. Odhad měrných nákladů značně převyšuje publikované prognózované měrné náklady u současných projektů SMR. Toto zvýšení odhadu zohledňuje rizika s nasazením první komerční jednotky v dané zemi⁵². Z měrných investičních nákladů jsou následně určeny výdaje přípravné fáze a fáze výstavby, přičemž podíl výdajů na přípravnou fázi byl stanoven na 20 % z výše celkové investice. Výdaje přípravné fáze a fáze výstavby jsou v čase rozděleny rovnoměrně při zohlednění inflace. Fáze výstavby zahrnuje i neaktivní a aktivní zkoušky⁵³ zařízení. V modelu jsou rovněž uvažovány investice do modernizace řídicích systémů elektrárny, jež jsou pořízeny po ukončení periody 20 let provozu elektrárny⁵⁴. Výše těchto nákladů byla stanovena na 10 % z výše celkové vstupní investice (bez nákladů VaV). Jelikož je pro hodnocení ekonomického modelu použito projektové hledisko, není majetek odepisován.

4.1.4 PROVOZNÍ NÁKLADY

Výše provozních nákladů byla určena na základě konzultací s odborníky společnosti ČEZ a. s. (viz 4.1.1). V modelu jsou zahrnuty náklady na provoz a údržbu⁵⁵, náklady na nákup paliva, výrobní i správní režijní náklady, náklady spojené s odvodem na jaderný účet a náklady na udržování rezervy na vyřazení elektrárny z provozu. Provozní náklady jsou vztaženy k vyrobené MWh elektrické energie (viz Tab. 4-3). Roční eskalace provozních nákladů v modelu odpovídá stanovené meziroční míře inflace (viz 4.1.7).

Tab. 4-3 Přehled provozních nákladů PWR SMR

POLOŽKA NÁKLADŮ	ČÁSTKA	JEDNOTKA
Provoz a údržba	340	Kč/MWh
Palivo	150	Kč/MWh
Režie	70	Kč/MWh
Odvod na jaderný účet	55	Kč/MWh
Rezerva na vyřazení z provozu	107	Kč/MWh

4.1.5 FINANCOVÁNÍ

Financování přípravné fáze a fáze výstavby je uvažováno z 20 % vlastním kapitálem a ze zbylých 80 % kapitálem cizím ve formě úvěru čerpaného po dobu přípravné a stavební fáze projektu. Výše úvěru odpovídá, v letech jeho čerpání, vždy 80 % investičních nákladů v daném roce, výjimkou jsou náklady VaV fáze, které jsou započítané do prvního roku přípravné fáze projektu, ale byly financovány v minulosti a pouze vlastním kapitálem. Úvěr bude anuitně splácen od roku uvedení zařízení do provozu s dobou splácení 20 let, přičemž úroky jsou se stejnou úrokovou sazbou spláceny i v letech čerpání úvěru. Úroky z úvěru jsou do uvedení zařízení do provozu kapitalizovány. Úroková sazba byla v modelu stanovena na 4,5 %. Výše úrokové sazby se odvíjí od předpokladu, že jsou projektu poskytnuté státní záruky (viz 4.1.1).

⁵² Odhad vychází i z prognózovaných měrných investičních nákladů projektu velkých jaderných bloků Vogtle 3 a Vogtle 4 v USA. V roce 2022 byla výše těchto nákladů 9200 USD/kWe [72].

⁵³ Neaktivní zkoušky probíhají u jaderných elektráren před zavezením jaderného paliva, aktivní zkoušky testují následné spouštění s palivem.

⁵⁴ V 60. roce provozu již není tato investice pořízena.

⁵⁵ Do této položky jsou započítány i mzdové náklady.

Tab. 4-4 Přehled finančních vstupů projektu PWR SMR

VSTUP	HODNOTA	JEDNOTKA
Doba čerpání úvěru	10	roky
Výše úvěru	50,29	mld. Kč
Úroková sazba	4,5	%
Doba splatnosti	20	roky

4.1.6 PRODEJ ELEKTRINY

Příjmy generované tímto projektem pochází z komerčního prodeje elektřiny. Podíl vlastní spotřeby elektrárny z celkové výroby elektřiny je stanoven na 7 %. Cena elektřiny byla v modelu vypočítána z váženého průměru marginálních cen elektrické energie v ČR, podle dat Operátora trhu s elektřinou (OTE), za jednotlivé měsíce roku 2023. Eskalace ceny elektřiny je obecně složité prognozovatelná, v modelu byla procentuální eskalace této komodity stanovena na hodnotu meziroční míry inflace (viz 4.1.7) [73][74].

4.1.7 OSTATNÍ VSTUPY EKONOMICKÉHO MODELU

V modelu jsou dále uvažovány vstupy uvedené v Tab. 4-5. Meziroční míra inflace je stanovena na hodnotu odpovídající meziročnímu inflačnímu cíli České národní banky⁵⁶. Hotovostní toky v jednotlivých letech projektu jsou diskontovány pomocí vážených nákladů na kapitál („weighted average cost of capital“ – WACC), výpočet hodnoty WACC bude dále rozepsán v bodě 4.1.7.1.

Tab. 4-5 Ostatní vstupy ekonomického modelu

VSTUP	HODNOTA	JEDNOTKA
Doba životnosti zařízení	60	roky
WACC-V1	6,18	%
WACC-V2	5,5	%
WACC-V3	5,49	%
Meziroční míra inflace	2	%

4.1.7.1 Výpočet diskontní míry

Diskontní míra udává očekávanou výnosnost nejlepší neuskutečněné investiční příležitosti. Parametr diskontní míry odráží faktor rizika i faktor času a je zásadní pro rozhodování investora při pořizování investice [75].

Analyzovaný projekt PWR SMR je financován kombinací vlastního a cizího kapitálu, diskontní míra bude vyjádřena pomocí WACC, jelikož tento parametr zohledňuje náklady na vlastní kapitál i na kapitál cizí. Pro výpočet WACC je použit následující vztah [75]:

$$WACC = r_d \cdot \frac{D}{C} + r_e \cdot \frac{E}{C} \quad (4-1)$$

WACC Vážené náklady na kapitál [%]

⁵⁶ Tento cíl byl vyhlášen v roce 2010 a týká se meziročního přírůstku spotřebitelských cen [76].

r_d	Náklady na kapitál věřitelů	[%]
D	Kapitál věřitelů	[mld. Kč]
C	Celkový investovaný kapitál ($C = E + D$)	[mld. Kč]
r_e	Náklady na vlastní kapitál	[%]
E	Vlastní kapitál	[mld. Kč]

Náklady na kapitál věřitelů odpovídají úrokové sazbě, za kterou věřitel poskytuje cizí kapitál. Náklady na vlastní kapitál jsou určeny pomocí modelu oceňování kapitálových aktiv („*Capital Asset Pricing Model*“ - CAPM) pomocí vztahu [75]:

$$r_e = r_f + \beta \cdot (r_m - r_f) \quad (4-2)$$

r_e	Náklady na vlastní kapitál	[%]
r_f	Bezriziková míra výnosu	[%]
β	Koeficient tržního rizika	[-]
r_m	Míra výnosu kapitálového trhu	[%]

Hodnota bezrizikové míry výnosu v ekonomickém modelu odpovídá úrokové sazbě státního dluhopisu ST. DLUHOP. 4,85/57, který má ze stávajících státních dluhopisů nejdelší splatnost. Míra kapitálového výnosu trhu byla získána jako součet zvolené bezrizikové míry výnosu a očekávaných prémie za riziko („*Equity Risk Premium*“ - ERP) [75]:

$$r_m = r_f + ERP \quad (4-3)$$

r_m	Míra výnosu kapitálového trhu	[%]
r_f	Bezriziková míra výnosu	[%]
ERP	Prémie za riziko	[%]

Tab. 4-6 Hodnoty pro výpočet WACC [77][78][79]

VSTUP	HODNOTA	JEDNOTKA
Bezriziková míra výnosu	4,85	%
Prémie za riziko	5,48	%
Míra výnosu kapitálového trhu	10,33	%
Koeficient tržního rizika	0,52	-
Úroková sazba	4,5	%
Vlastní kapitál – V1	55,74	mld. Kč
Vlastní kapitál – V2	25,63	mld. Kč
Vlastní kapitál – V3	22,62	mld. Kč
Cizí kapitál	50,29	mld. Kč

4.1.8 KRITÉRIA EKONOMICKÉ EFEKTIVNOSTI

V ekonomickém modelu jsou pro vyhodnocení ekonomické efektivity investic použita následující standardní kritéria hodnocení ekonomické efektivity investic:

- Čistá současná hodnota (NPV)
- Vnitřní výnosové procento (IRR)
- Doba návratnosti (PP)
- Diskontovaná doba návratnosti (DPP)
- Roční ekvivalentní peněžní tok (RCF)

4.1.8.1 Čistá současná hodnota (NPV)

Čistá současná hodnota („*Net Present Value*“ – NPV) je dynamické kritérium porovnávající kapitálové výdaje a příjmy z investice v jejich současné hodnotě. NPV je definováno jako součet současných hodnot ročních hotovostních toků, tedy hotovostních toků přepočítaných diskontováním na úroveň hodnoty peněz v roce pořízení investice. Výsledné NPV udává, o kolik vzroste hodnota podniku v peněžních jednotkách. Pro kladnou hodnotu NPV se tedy pořízení investice vyplatí, v případě záporného NPV nedojde k navrácení vloženého kapitálu [75].

$$NPV = -C_0 + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (4-4)$$

<i>NPV</i>	Čistá současná hodnota	[mld. Kč]
<i>C₀</i>	Počáteční investice	[mld. Kč]
<i>t</i>	Rok hodnocení investice	[-]
<i>T</i>	Doba životnosti	[roky]
<i>CF_t</i>	Hotovostní tok v roce <i>t</i> hodnocení investice	[mld. Kč]
<i>r</i>	Diskontní sazba	[%]

4.1.8.2 Vnitřní výnosové procento (IRR)

Vnitřní výnosové procento („*Internal Rate of Return*“ – IRR) je relativní dynamické kritérium představující relativní výnos projektu v rámci jeho životnosti. Číselně je IRR vyjádřeno jako hodnota diskontní sazby, pro kterou je hodnota NPV nulová. Čím vyšší hodnotu IRR investice má, tím lepší je její relativní výnosnost. Investice je shledána výhodnou, pokud je hodnota IRR vyšší než diskontní sazba [75].

$$-C_0 + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} = 0 \quad (4-5)$$

<i>C₀</i>	Počáteční investice	[mld. Kč]
<i>t</i>	Rok hodnocení investice	[-]
<i>T</i>	Doba životnosti	[roky]
<i>CF_t</i>	Hotovostní tok v roce <i>t</i>	[mld. Kč]
<i>IRR</i>	Vnitřní výnosové procento	[%]

4.1.8.3 Doba návratnosti (PP)

Doba návratnosti („*Payback Period*“ – PP) je statické kritérium ekonomické efektivity investic. Kritérium nebere v potaz časovou cenu peněz a počítá tedy pouze s nediskontovanými hotovostními toky. PP projektu představuje počet let, za které se kumulované prognózané hotovostní toky vyrovnají počáteční investici [75].

$$C_0 = \sum_{t=1}^{PP} CF_t \quad (4-6)$$

C_0	Počáteční investice	[mld. Kč]
t	Rok hodnocení investice	[-]
PP	Doba návratnosti	[roky]
CF_t	Hotovostní tok v roce t	[mld. Kč]

4.1.8.4 Diskontovaná doba návratnosti (DPP)

Diskontovaná doba návratnosti („*Discounted Payback Period*“ – DPP) je dynamický ekvivalent PP (viz 4.1.8.3). Kritérium zohledňuje faktor času a rizika diskontováním hotovostních toků.

$$C_0 = \sum_{t=1}^{DPP} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (4-7)$$

C_0	Počáteční investice	[mld. Kč]
t	Rok hodnocení investice	[-]
DPP	Diskontovaná doba návratnosti	[roky]
CF_t	Hotovostní tok v roce t	[mld. Kč]
r	Diskontní sazba	[%]

4.1.8.5 Roční ekvivalentní peněžní tok (RCF)

Roční ekvivalentní peněžní tok udává diskontované hotovostní toky rozložené do jednotlivých let projektu. RCF je používán pro hodnocení projektů s různou dobou životnosti, přičemž investice u těchto projektů je pořízena ve stejném roce. RCF je vázáno na NPV, číselná hodnota RCF je dána součinem NPV a anuitního faktoru. Tento ukazatel zohledňuje časovou cenu peněz a rizika projektu.

$$RCF = NPV \cdot \frac{(1+r)^T \cdot r}{(1+r)^T - 1} \quad (4-8)$$

RCF	Roční ekvivalentní peněžní tok	[mld. Kč]
NPV	Čistá současná hodnota	[mld. Kč]
r	Diskontní sazba	[%]
T	Doba životnosti	[roky]

4.1.9 EKONOMICKÁ EFEKTIVNOST JEDNOTLIVÝCH VARIANT PROJEKTU

Číselné hodnoty kritérií pro hodnocení ekonomické efektivity, uvedené v Tab. 4-7 byly vypočítány z hotovostních toků, respektive z diskontovaných hotovostních toků v jednotlivých letech projektu. Časový vývoj kumulovaných diskontovaných hotovostních toků pro jednotlivé varianty projektu je znázorněn na Obr. 4-1. Na základě hodnot kritérií lze zhodnotit jednotlivé varianty projektu z hlediska výnosnosti.

První variantu projektu (V1) jako výnosnou označilo pouze kritérium PP. Tento ukazatel sleduje pouze statistickou výnosnost, bez uvážení faktoru času a faktoru rizika, které jsou velice důležité obzvláště u investičně náročných projektů s dlouhou dobou realizace a životnosti. Tuto variantu projektu lze tedy obecně označit za nevýnosnou. Dopad nákladů VaV fáze se u této varianty projeví nejen v hotovostním toku v prvním roce přípravné fáze, ale i v hodnotě WACC, kterou jsou hotovostní toky diskontovány, jelikož se mění poměr vlastního a cizího kapitálu. U této varianty tvoří vlastní kapitál 53,6 % z celkového vynaloženého kapitálu, přičemž náklady na vlastní kapitál jsou vyšší než náklady na kapitál cizí. Vyšší podíl vlastního kapitálu tedy implikuje vyšší hodnotu WACC a horší ekonomickou efektivity projektu.

Varianty projektu zahrnující sdílení nákladů VaV fáze mezi deseti (V2), respektive sty (V3) projekty se stejným technickým řešením SMR označila za výnosné všechna použitá kritéria ekonomické efektivity. V porovnání V2 k výhodnější V3 se kritéria mění následovně:

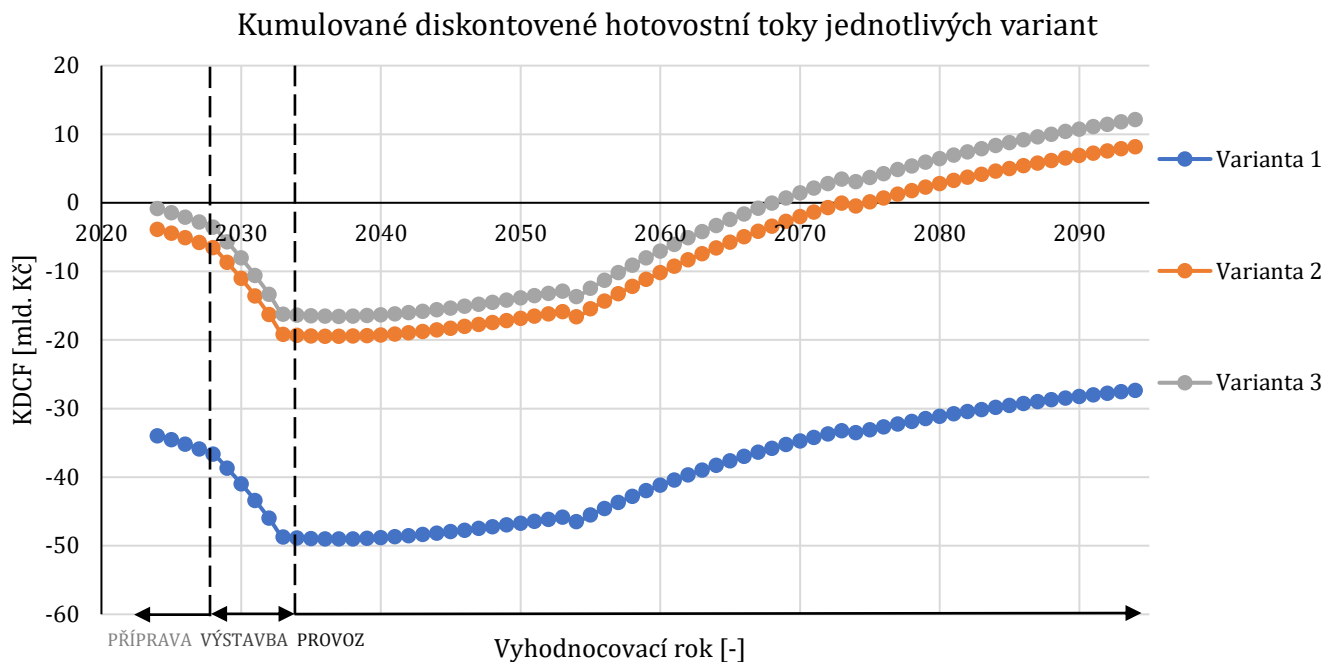
- zvýšení NPV, respektive RCF o 48,3 %
- zvýšení IRR o 8,1 %⁵⁷
- snížení PP o 2,9 %
- snížení DPP o 11,9 %

Obě varianty se vyznačují vysokou PP a DPP, což implikuje zvýšení finančních rizik.

Tab. 4-7 Výsledky hodnocení ekonomické efektivity projektu

KRITÉRIUM HODNOCENÍ	VARIANTA 1	VARIANTA 2	VARIANTA 3
NPV [mld. Kč]	-27,36	8,16	12,11
IRR [%]	4,14	6,57	7,10
PP [roky]	38	34	33
DPP [roky]	-	51	45
RCF [mld. Kč]	-1,72	0,51	0,76

⁵⁷ Podíl z hodnoty IRR



Obr. 4-1 Kumulované diskontované hotovostní toky jednotlivých variant projektu při výchozích vstupních hodnotách

4.1.10 CITLIVOSTNÍ ANALÝZY

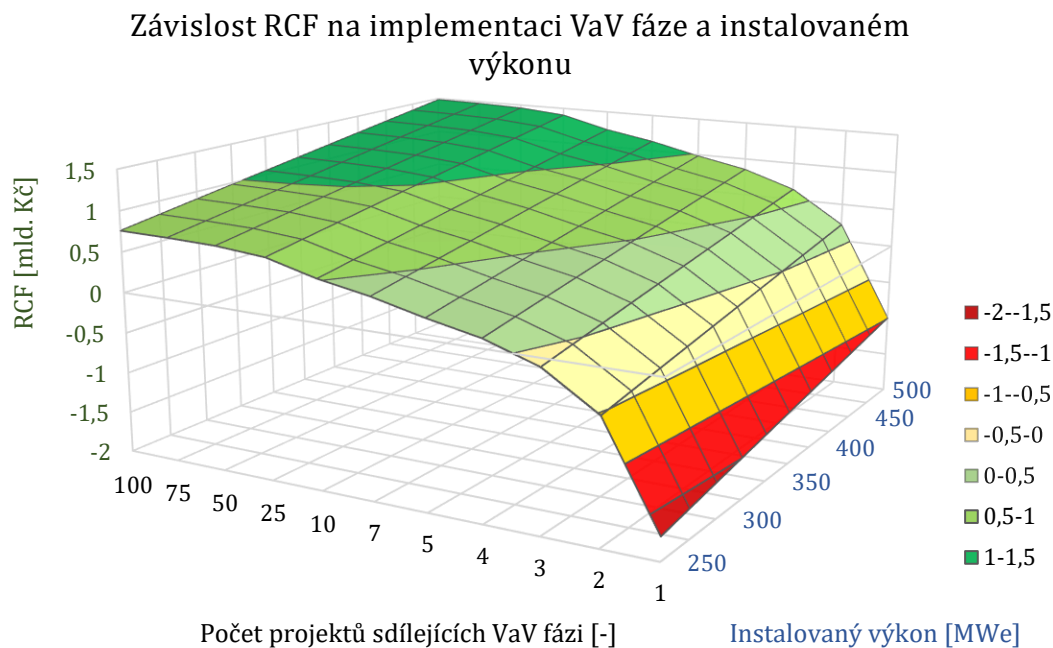
Citlivostní analýzy znázorňují vývoj vybraných kritérií ekonomické efektivity při změně vstupních hodnot v daném rozsahu. Pro citlivostní analýzy byly vybrány vstupní parametry, které zásadně ovlivňují ekonomickou efektivnost projektu. Vybrané parametry jsou:

- Počet projektů sdílejících VaV fázi technického řešení vybraného pro tento projekt
- Instalovaný výkon elektrárny
- Diskontní míra (WACC)
- Měrné investiční náklady
- Eskalace ceny elektřiny v ČR
- Úroková sazba úvěru

Citlivostní analýzy na změnu daného parametru jsou znázorněny graficky, tabulky s hodnotami těchto analýz jsou dostupné v Příloha B: EKONOMICKÝ MODEL – VÝPOČTY.

4.1.10.1 Implementace VaV fáze a instalovaný výkon

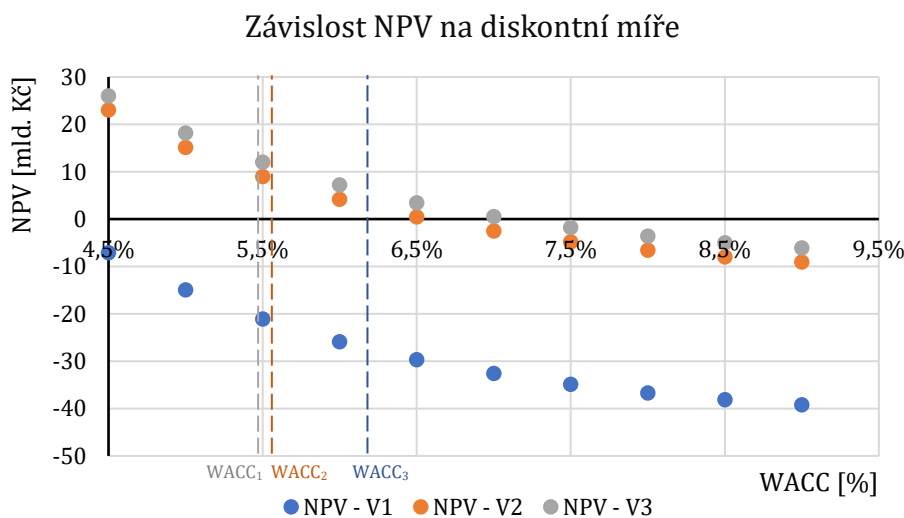
Sdílení nákladů VaV fáze mezi více projekty ovlivňuje ekonomickou efektivnost projektu prostřednictvím výše celkové vstupní investice a WACC. Z grafu na Obr. 4-2 je patrné, že při výchozí hodnotě instalovaného výkonu nastává zlom pro rozdělení nákladů VaV do čtyř projektů. Pro tuto variantu implementace VaV fáze je ukazatel RCF poprvé kladný. Růst hodnoty RCF se postupně zpomaluje. Pro dvacet pět projektů téhož technického řešení je hodnota RCF pouze o 12 % nižší než pro sto projektů, odpovídajících Variantě 3 v ekonomickém modelu.



Obr. 4-2 Závislost RCF na implementaci VaV fáze a instalovaném výkonu

4.1.10.2 Diskontní míra

Diskontní míra byla v ekonomickém modelu stanovena formou WACC pro jednotlivé varianty a byla uvažována konstantní po celou dobu přípravy, realizace a životnosti zařízení. Závislost NPV na tomto parametru zobrazuje Obr. 4-3. V grafu jsou vyznačeny výchozí hodnoty WACC pro jednotlivé varianty.

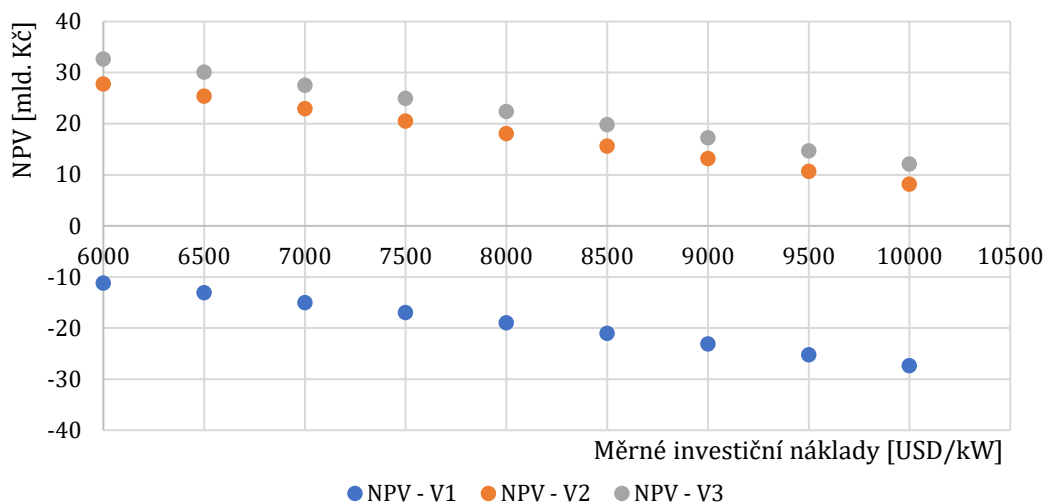


Obr. 4-3 Závislost NPV na diskontní míře

4.1.10.3 Měrné investiční náklady

Měrné investiční náklady uvedené v ekonomickém modelu počítají s nasazením zařízení jako první komerční jednotky v ČR. V případě nasazování dalších komerčních jednotek, se stejným technickým řešením, lze očekávat snížení měrných investičních nákladů vlivem rozvoje dodavatelského řetězce a standardizace výroby.

Závislost NPV na měrných investičních nákladech

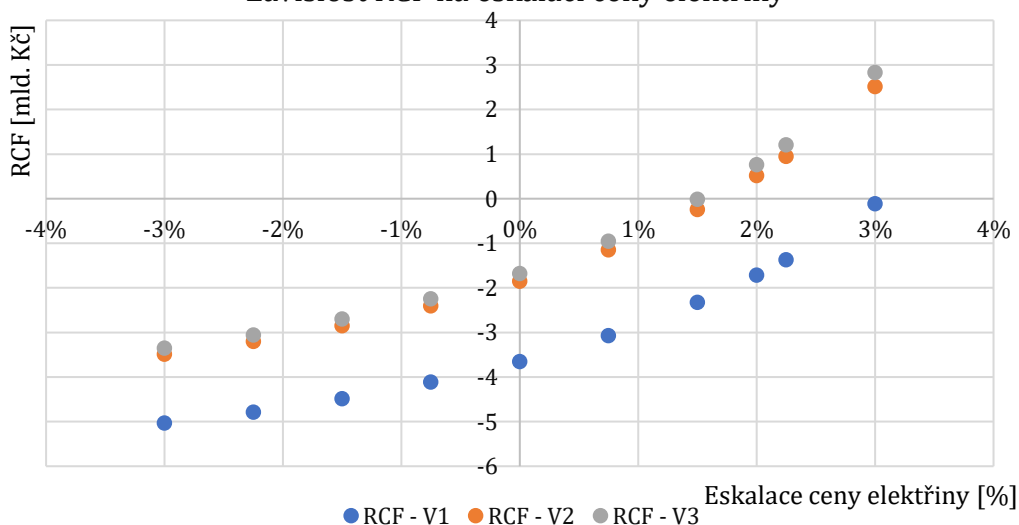


Obr 4-4 Závislost NPV na měrných investičních nákladech

4.1.10.4 Eskalace ceny elektřiny

Závislost RCF na relativní změně ceny elektřiny je zobrazena v grafu na Obr. 4-5. Vzhledem k rostoucím cenám emisních povolenek a plánovanému vyřazování uhelných elektráren z provozu v ČR, lze v dlouhodobém horizontu očekávat růst ceny elektrické energie a relativní eskalace ceny elektřiny. Cena elektřiny uvedená v modelu se vztahuje k roku 2023, v tomto roce byla cena této komodity vysoká a v současnosti klesá. Interval pro tuto citlivostní analýzu byl na základě obou těchto faktorů zvolen od -3 % do 3 % relativní změny.

Závislost RCF na eskalaci ceny elektřiny



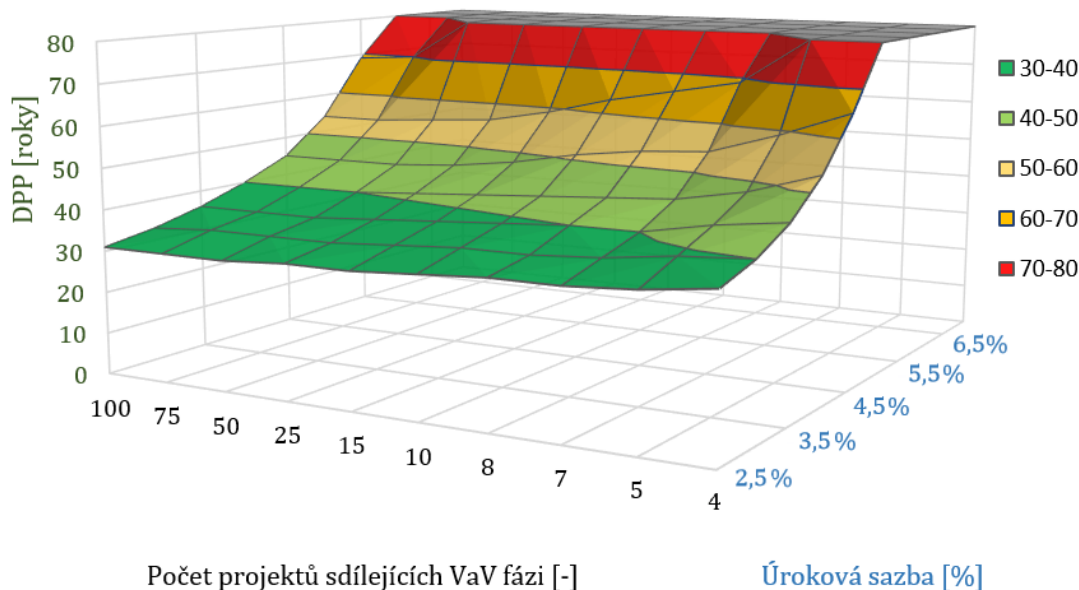
Obr. 4-5 Závislost RCF na eskalaci ceny elektřiny

4.1.10.5 Implementace VaV fáze a úroková sazba

V grafickém znázornění na Obr. 4-6 byla jako nejnižší varianta implementace VaV zvolena varianta se čtyřmi projekty. Varianty s nižším množstvím projektů byly ukazatelem RCF, a tedy i NPV, označeny za nevýnosné (viz 4.1.9), z toho důvodu nejsou pro tuto citlivostní analýzu uvažovány.

Úroková sazba úvěru je pro tento projekt klíčovým parametrem. Financování projektu je z velké části zajištěno cizím kapitálem, v důsledku toho výše úrokové sazby zásadně ovlivňuje náklady na kapitál, které bývají u projektů JE zcela zásadní položkou. Zvýšení úrokové sazby nad výchozí hodnotu, které by mohlo nastat v případě, kdy projekt nebude disponovat státními zárukami způsobuje rapidní zvýšení DPP. Při úrokové sazbě ve výši 6 % tento ukazatel přesahuje časový rámec projektu pro všechny uvedené varianty implementace VaV. Dosažení nižší úrokové sazby, zlepšující ekonomickou efektivnost projektu, oproti sazbě výchozí by bylo možné například při sjednání úvěru u Evropské investiční banky. Tyto úvěry mohou být ze strany Evropské investiční banky poskytovány na projekty podporovaných zdrojů energie (PoZE). V současnosti obecně jaderné zdroje mezi PoZE v rámci Evropské unie (EU) nepatří. Jaderné zdroje jsou do PoZE řazeny, pokud jsou využívány pro vysokoúčinnou KVET. S touto variantou využití zařízení tento model nepočítá (viz 4.1.1) [80].

Závislost DPP na implementaci VaV fáze a úrokové sazbě



Obr. 4-6 Závislost DPP na implementaci VaV fáze a úrokové sazbě

ZÁVĚR

První dva body této práce byly zpracovány jako samostatné rešerše s podobnou strukturou. Zpracování těchto částí bylo, pro účel porovnání zpracovaného v následujícím bodě, zaměřeno na motivace, postup a prostředky při dosahování cílů u jaderných projektů. Rešeršní část práce byla doplněna o analýzu čtyř inovativních jaderných projektů a faktorů jejich úspěchu, respektive neúspěchu. Porovnání projektů prvních prototypů JE se současnými projekty SMR a alokace možných faktorů úspěchu a neúspěchu projektů SMR byly zpracovány na základě syntézy informací z rešeršní části práce. Cílem posledního bodu bylo zpracovat ekonomickou analýzu projektu PWR SMR zohledňující náklady VaV fáze projektu. Tato analýza byla zpracována pro tři varianty rozdělení nákladů VaV fáze.

V porovnání s historickými projekty prvních prototypů JE se současné projekty SMR nachází, navzdory značně pokročilejším možnostem v mnoha oblastech, v komplikovanější pozici. Vlivem nižší míry zapojení států a menší státní podpory jaderné energetiky není, při komplexnosti a komplikovanosti těchto projektů, odpověď na otázku: „Kdo podstoupí rizika?“ zřejmá a rozšíření komerčního nasazení SMR je oddalováno a ohroženo. Zapojení států je zásadním hybatelem v otázce úspěchu technologie SMR, od kterého se odvíjí další faktory úspěchu a neúspěchu. Ze strany států je tedy zapotřebí začít podnikat konkrétní kroky zajišťující snížení rizik a podporující dosažení stanovených cílů.

Ekonomická analýza jednoznačně podpořila koncept realizace většího množství projektů SMR se stejným technickým řešením. Důležitým výstupem analýzy byla skutečnost, že ekonomická efektivnost investic se již od varianty 25 projektů sdílejících náklady VaV zásadně neměnila. Varianty využití stejného technického řešení do 10–25 projektů SMR jsou v aktuální situaci reálné, a to například v Evropě při uvážení mezinárodní spolupráce nebo podpory některého z technických řešení ze strany EU.

Vysoká hodnota měrných investičních nákladů, spojená konceptem nasazení první komerční jednotky SMR v ČR, uvažovaném v ekonomickém modelu, zapříčinila vysoké hodnoty PP a DPP. S touto skutečností spojená, zvýšená finanční rizika by v případě projektů prvních komerčních jednotek SMR v dané zemi odrážela zájem investorů ze soukromého sektoru. Pro úspěch těchto projektů je tedy, stejně jako v případě projektů FOAK, žádoucí buď přímé zapojení státu nebo zapojení značně snižující investiční rizika pro ostatní potenciální investory.

Rozšíření práce je, mimo jiné, možné ve formě zpracování podrobnějšího ekonomického modelu zaměřujícího se na problematiku některého z alokovaných faktorů úspěchu a neúspěchu projektů SMR, v němž by bylo, na rozdíl od této práce, zohledněno využití zařízení pro KVET a zpracovány propočty vedoucí k hodnotě měrných investičních nákladů. Konkrétně může být přínosným zaměřením na analýzu variant zajištění a ekonomiku dodavatelského řetězce u projektů SMR.

LITERATURA

- [1] PINTO, Ricardo et al. The rise and stall of world electricity efficiency:1900–2017, results and insights for the renewables transition. *ENERGY*. 2023, roč. 269. DOI: 10.1016/j.energy.2023.126775. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054422300169X?via%3Dihub>
- [2] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Outline History of Nuclear Energy* [online]. 2020 [cit. 2024-02-26]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx>
- [3] BODANSKY, David. *Nuclear energy: principles, practices, and prospects*. New York: Springer, 2004. ISBN 0-387-20778-3.
- [4] DOLEŽAL, Jaroslav. *Jaderné a klasické elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [5] SVĚT ENERGIE. *FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY*. [online]. [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderna-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/charakteristika-zdroje/fyzikalni-zaklady>
- [6] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *The History of Nuclear Energy* [online]. 1995 [cit. 2024-02-27]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/ne/articles/history-nuclear-energy>
- [7] ROSATOM. *Short history of the russian nuclear industry* [online]. [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://rosatom.ru/en/press-centre/short-history-of-the-russian-nuclear-industry/>
- [8] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Nuclear-Powered Ships* [online]. 2023 [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx>
- [9] UNITED STATES OFFICE OF NUCLEAR NAVAL PROPULSION. *REPORT ON USE OF LOW ENRICHED URANIUM IN NAVAL NUCLEAR PROPULSION* [online]. 1995 [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://fissilematerials.org/library/onnp95.pdf>
- [10] COTRELL, W.B., HUNGERFORD, H.E., LESLIE, J.K. a MEEM, J.L. *OPERATION OF THE AIRCRAFT REACTOR EXPERIMENT*. [online]. 1955 [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/servlets/purl/4237975/>
- [11] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *9 Notable Facts About the World's First Nuclear Power Plant - EBR-I* [online]. 2019 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/ne/articles/9-notable-facts-about-worlds-first-nuclear-power-plant-ebr-i>
- [12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Atoms for Peace Speech* [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/about/history/atoms-for-peace-speech>
- [13] SEMENOV, B.A. Nuclear power in the Soviet Union. *IAEA BULLETIN*. 1983, roč. 25, č. 2. Dostupné z: <https://www.iaea.org/sites/default/files/25204744759.pdf>
- [14] NUCLEAR ENGINEERING INTERNATIONAL. *Obninsk: number one* [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.neimagazine.com/features/featureobninsk-number-one>
- [15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Terms for Describing Advanced Nuclear Power Plants* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2023. [cit. 2024-05-14]. ISBN 978-92-0-146023-3. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB2071_Web.pdf
- [16] PERRY, R., ARTHUR, L., ALEXANDER, J., ALLEN, W., DELEON, P., GANDARA, A., MOOZ, W.E., ROLPH, E.S., SIGEL, S. a SOLOMON, K.A. *Development and Commercialization of the Light Water Reactor, 1946-1976*. [online]. 1977. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.rand.org/pubs/reports/R2180.html>
- [17] WEALER, Ben, Simon BAUER, Nicolas LANDRY, Hannah SEISS a Christian R. VON HIRSCHHAUSEN. *Nuclear power reactors worldwide: Technology developments, diffusion patterns, and country-by-country analysis of implementation (1951-2017)* [online]. 2018 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/179000/1/1023170906.pdf>
- [18] ČEZ, a.s. *Základní typy jaderných reaktorů* [online]. [cit. 2024-01-07]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/zakladni-typy-jadernych-reaktoru>
- [19] ARGONNE NATIONAL LABORATORY. *Light Water Reactor Technology Development* [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.ne.anl.gov/About/reactors/lwr3.shtml>
- [20] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *RBMK Reactors – Appendix to Nuclear Power Reactors* [online]. 2022 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/appendices/rbmk-reactors>
- [21] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Nuclear Power in Canada* [online]. 2024 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/canada-nuclear-power>
- [22] CANADIAN NUCLEAR ASSOCIATION. *History of Nuclear in Canada* [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://cna.ca/history-of-nuclear-in-canada/>

- [23] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Nuclear Development in the United Kingdom* [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/appendices/nuclear-development-in-the-united-kingdom>
- [24] SURAK, Anatol. *FRENCH NUCLEAR REACTOR DEVELOPMENT* [online]. 1965 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD0630360.pdf>
- [25] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Fast Neutron Reactors* [online]. 2021 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/fast-neutron-reactors>
- [26] COCHRAN, Thomas B., Harold A. FEIVERTSON, Walt PATTERSON, Gennadi PSHAKIN, M.V. RAMANA, Mycle SCHNEIDER, Tatsujiro SUZUKI a Frank VON HIPPEL. *Fast Breeder Reactor Programs: History and Status* [online]. 2010 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://fissilematerials.org/library/rr08.pdf>
- [27] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Molten Salt Reactors* [online]. 2021 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/molten-salt-reactors>
- [28] OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. *MSRE DESIGN AND OPERATIONS REPORT PART I DESCRIPTION OF REACTOR DESIGN* [online]. 1965 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/servlets/purl/4654707>
- [29] MACPHERSON, H. G. The Molten Salt Reactor Adventure. *NUCLEAR SCIENCE AND ENGINEERING* [online]. 1985, roč. 90, 374-380 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://moltensalt.org/references/static/downloads/pdf/MSadventure.pdf>
- [30] GOLDBERG, Stephen M. a Robert ROSNER. *Nuclear Reactors: Generation to Generation* [online]. 2011 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.amacad.org/sites/default/files/academy/pdfs/nuclearReactors.pdf>
- [31] TAYLOR, Simon. *Privatisation and financial collapse in the nuclear industry: the origins and causes of the British energy crisis of 2002*. London ; New York: Routledge, 2007. ISBN 0-203-94627-8.
- [32] JENSEN, S. E. a E. NONBØ. *Description of the Magnox Type of Gas Cooled Reactor (MAGNOX)* [online]. Roskilde: NKS, 1999. [cit. 2024-05-14]. ISBN 87-7893-050-2. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/052/30052480.pdf
- [33] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Electricity consumption - IEA* [online]. 2022 [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://www.iea.org/data-and-statistics?type=statistics#data-tool-types>
- [34] INGERSOLL, Daniel T. a Mario D. CARELLI, eds. *Handbook of small modular nuclear reactors*. 2nd Edition. Oxford, United Kingdom ; Cambridge, MA: Woodhead Publishing, an imprint of Elsevier, 2021. ISBN 978-0-12-823916-2
- [35] LIOU, Joanne. *What are Small Modular Reactors (SMRs)?* [online]. 2021 [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>
- [36] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Small Modular Reactors: A new nuclear energy paradigm* [online]. 2020 [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://nucleus.iaea.org/sites/smr/Shared%20Documents/Small%20Modular%20Reactors%20a%20new%20nuclear%20energy%20paradigm.pdf>
- [37] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *TECHNOLOGY ROADMAP FOR SMALL MODULAR REACTOR DEPLOYMENT* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2021. [cit. 2024-05-14]. ISBN 978-92-0-110121-1. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1944_web.pdf
- [38] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Financing Nuclear Energy* [online]. 2024 [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/financing-nuclear-energy>
- [39] BASEL COMMITTEE ON BANKING SUPERVISION. *International convergence of capital measurement and capital standards: a revised framework* [online]. Basel: Bank for Internat. Settlements, 2005. [cit. 2024-05-14]. ISBN 92-9197-669-5. Dostupné z: <https://www.bis.org/publ/bcbs107.pdf>
- [40] ČESKÁ NÁRODNÍ BANKA. *Slovník pojmů - expozice* [online]. [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://cbaonline.cz/slovnicek-pojmu>
- [41] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments (2022)* [online]. 2022 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf
- [42] INGERSOLL, D. T. et al. *Integration of NuScale SMR With Desalination Technologies*. [online] Washington, DC, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2014. [cit. 2024-05-16] DOI: 10.1115/SMR2014-3392. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267649351_Integration_of_NuScale_SMR_With_Desalination_Technologies
- [43] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Status of Small and Medium Sized Reactor Designs (2012)* [online]. 2012 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://aris.iaea.org/Publications/smr-status-sep-2012.pdf>

- [44] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments (2014)* [online]. 2014 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: https://aris.iaea.org/Publications/IAEA_SMR_Booklet_2014.pdf
- [45] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments (2016)* [online]. 2016 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book_2016.pdf
- [46] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments (2018)* [online]. 2018 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book_2018.pdf
- [47] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments (2020)* [online]. 2020 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf
- [48] NUSCALE POWER, LLC. *NUSCALE Small Modular Reactor* [online]. 2022 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://www.nuscalepower.com/-/media/nuscale/pdf/fact-sheets/smr-fact-sheet.pdf>
- [49] UTAH ASSOCIATED MUNICIPAL POWER SYSTEMS. *Announcement (Jan. 2, 2023)* [online]. 2023 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://ieefa.org/sites/default/files/2023-01/UAMPS%20Talking%20Points%20Class%203%20%2020230102%20%20Final.pdf>
- [50] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *KLT-40S* [online]. 2013 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://aris.iaea.org/PDF/KLT-40S.pdf>
- [51] BELLONA. *New documents show cost of Russian floating nuclear power plant skyrockets* [online]. 2015 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://bellona.org/news/nuclear-issues/2015-05-new-documents-show-cost-russian-nuclear-power-plant-skyrockets>
- [52] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Design Maturity and Regulatory Expectations for Small Modular Reactors* [online]. 2021 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/images/articles/smr-design-maturity-report-FINAL.pdf>
- [53] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *IAEA SAFETY GLOSSARY: Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection 2018 Edition* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2018. [cit. 2024-05-16]. ISBN 978-92-0-104718-2. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1830_web.pdf
- [54] IAEA POWER REACTOR INFORMATION SYSTEM. *SHIPPINGPORT* [online]. 2024 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=890>
- [55] CLAYTON, J. C. *THE SHIPPINGPORT PRESSURIZED WATER REACTOR AND LIGHTWATER BREEDER REACTOR* [online]. 1993 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/25/025/25025940.pdf
- [56] AHEARNE, John F., FEDERATION OF AMERICAN SCIENTISTS a WASHINGTON AND LEE UNIVERSITY. *The future of nuclear power in the United States*. [online]. Washington, D.C.: Federation of American Scientists, 2012. [cit. 2024-05-16] ISBN 978-1-938187-00-1. Dostupné z: https://pubs.fas.org/_docs/Nuclear_Energy_Report-lowres.pdf
- [57] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *History of Emergency Preparedness* [online]. 2021 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/about-nrc/emerg-preparedness/history.html>
- [58] IAEA POWER REACTOR INFORMATION SYSTEM. *NOVOVORONEZH 2-1* [online]. 2024 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=899>
- [59] IAEA POWER REACTOR INFORMATION SYSTEM. *NOVOVORONEZH 2-2* [online]. 2024 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=899>
- [60] STATE ATOMIC ENERGY CORPORATION ROSATOM. *The VVER today* [online]. 2012 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/0be/0be1220af25741375138ecd1afb18743.pdf>
- [61] SOCIÉTÉ FRANÇAISE D'ÉNERGIE NUCLÉAIRE. *The cost of nuclear power in France* [online]. 2018 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.sfen.org/wp-content/uploads/2020/04/EN-The-cost-of-new-nuclear-power-plants-in-France.pdf>
- [62] STATE ATOMIC ENERGY CORPORATION ROSATOM. *The second Novovoronezh NPP-2 power block delivers its first megawatts into the Unified Energy System of Russia* [online]. 2019 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://rusatom-energy.ru/en/media/rosatom-news/the-second-novovoronezh-npp-2-power-block-delivers-its-first-megawatts-into-the-unified-energy-syste/>
- [63] OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. *DESIGN STUDIES OF 1000-Mw(e) MOLTEN-SALT BREEDER REACTORS* [online]. 1966 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/servlets/purl/4525388>
- [64] LE RENARD, Claire. *The Superphénix Fast Breeder Nuclear Reactor: Cross-border Cooperation and Controversies*. *Journal for the History of Environment and Society*. 2018, roč. 3. DOI: 10.1484/J.JHES.5.116796. Dostupné z: <https://shs.hal.science/halshs-02088348/document>
- [65] IAEA POWER REACTOR INFORMATION SYSTEM. *SUPER-PHENIX* [online]. 2024 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=178>

-
- [66] SCHNEIDER, Mycle. Fast Breeder Reactors in France. *Science & Global Security*. 2009, roč. 17, č. 1. DOI: 10.1080/08929880902953013. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228343424_Fast_Breeder_Reactors_in_France
- [67] CANADA INFRASTRUCTURE BANK. *CIB commits \$970 million towards Canada's first Small Modular Reactor* [online]. 2022 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://cib-bic.ca/en/medias/articles/cib-commits-970-million-towards-canadas-first-small-modular-reactor/>
- [68] RADIANT ENERGY GROUP. *Public Attitudes toward Clean Energy 2023 - Nuclear* [online]. 2023 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.radiantenergygroup.com/reports/public-attitudes-toward-clean-energy-2023-nuclear>
- [69] NATIONAL SCIENCE FOUNDATION. *Definitions of Research and Development: An Annotated Compilation of Official Sources* [online]. 2018 [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://www.nsf.gov/statistics/randdef/rd-definitions.pdf>
- [70] HOPKINS, John L. *Testimony of NuScale Power before the House Committee on Energy and Commerce Subcommittee on Energy* [online]. 2020 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://docs.house.gov/meetings/IF/IF03/20200303/110640/HHRG-116-IF03-Wstate-Hopkins-20200303.pdf>
- [71] WATSON, Nicole, Paul BOLTON a Nikki SUTHERLAND. *Civil Nuclear roadmap* [online]. 2024 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/CDP-2024-0036/CDP-2024-0036.pdf>
- [72] STEWART, W.R. a K. SHIRVAN. Capital cost estimation for advanced nuclear power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022, roč. 155. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111880. Dostupné z: <https://web.mit.edu/kshirvan/www/research/ANP193%20TR%20CANES.pdf>
- [73] OTE. *Roční zpráva o trhu (verze 2)* [online]. 2023 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/rocnizprava?date=2023-01-01>
- [74] ČESKÁ NÁRODNÍ BANKA. *Prognóza ČNB – jaro 2024* [online]. 2024 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/menova-politika/prognoza/>
- [75] KISLINGEROVÁ, Eva. *Manažerské finance*. 2. přepracované a doplněné vydání. Praha: C.H. Beck, 2007. ISBN 978-80-7179-903-0
- [76] ČESKÁ NÁRODNÍ BANKA. *Inflační cíl* [online]. 2024 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/menova-politika/inflacni-cil/>
- [77] PARTIA.CZ. *Dluhopisy online* [online]. 2024 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.patria.cz/kurzy/online/CZ0001002059/bond.html?type=govcz#online>
- [78] DAMODARAN, Aswath. *Risk Premiums for Other Markets (January 1, 2024 update)* [online]. 2024 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/>
- [79] DAMODARAN, Aswath. *Levered and Unlevered Betas by Industry (Europe)* [online]. 2024 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/>
- [80] KOŠŤÁL, Vratislav. *Přednášky z předmětu Právo a Podnikání B1B16PPP* [přednáška]. Praha: FEL ČVUT. 2024

PŘÍLOHA A: SEZNAM ZKRATEK

AEC	Atomic Energy Comission
ARE	Aircraft Reactor Experiment
ANP	Aircraft Nuclear Propulsion
ANPP	Army Nuclear Power Program
AtZ	Atomový zákon
AZ	Aktivní zóna
BD	Úvodní projekt (Basic design)
BWR	Varný reaktor (Boiling water reactor)
CANDU	Kanadský těžkovodní reaktor (Canadian deuterium uranium)
CFPP	Carbon Free Power Program
ČLR	Čínská lidová republika
ČR	Česká republika
DD	Prováděcí projekt (Detail design)
DPP	Diskontovaná doba návratnosti (Discounted Payback Period)
DOE	Ministerstvo energetiky Spojených států amerických (United States Department of Energy)
ERP	Prémie za riziko (Equity Risk Premium)
EU	Evropská unie
FEI	Fiziko-Energeticheskiy Institut
FBR	Rychlý množivý reaktor (Fast breeder reactor)
FNR	Reaktor pracující s rychlými neutrony (Fast neutron reactors)
FOAK	První svého druhu (first of the kind)
GCR	Reaktor chlazený plynem (Gas-cooled reactor)
GE	General Electric
HTGR	Reaktor chlazený vysokoteplotním plynem (High temperature gas-cooled reactor)
HWR	Těžkovodní reaktor (Heavy water reactor)
IAEA	International Atomic Energy Agency
IRR	Vnitřní výnosové procento (Internal Rate of Return)
iPWR	Integrovaný tlakovodní reaktor (Integral Pressurized water reactor)
CD	Koncepční projekt (Conceptual design)
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
LCOE	Měrné výrobní náklady (Levelised Cost of Electricity)
LMFR	Rychlý reaktor chlazený tekutými kovy (Liquid metal fast reactor)
LMFBR	Rychlý množivý reaktor chlazený tekutými kovy (Liquid metal fast breeder reactor)
LWGR	Lehký vodní grafitový reaktor (Light water graphite reactor)
LWR	Lehký vodní reaktor (Light water reactor)
MSR	Reaktor chlazený tekutými solemi (Molten salt reactor)
MSBR	Množivý reaktor chlazený tekutými solemi (Molten salt breeder reactor)
NPV	Čistá současná hodnota (Net Present Value)
NRC	Americký jaderný regulátor (United States Nuclear Regulatory Comission)
ORNL	Oak Ridge National Laboratory
OSN	Organizace spojených národů
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PHWR	Tlakovodní těžkovodní reaktor (Pressurized heavy water reactor)
PG	Parogenerátor
PO	Primární okruh

PP	Doba návratnosti (Payback Period)
PRDP	Power Reactor Demonstration Program
PWR	Tlakovodní reaktor (Pressurized water reactor)
RBMK	
RCF	Roční ekvivalentní peněžní tok
RF	Ruská federace
RBMK	Kanálový varný reaktor vysokého výkonu (Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalny)
RUB	Ruský rubl
SKAER	Státní korporace pro atomovou energii Rosatom
SMR	Malý modulární reaktor (Small modular reactor)
SSSR	Svaz sovětských socialistických republik
UAKEA	United Kingdom Atomic Energy Authority
USA	Spojené státy americké (United States of America)
USD	Americký dolar (United States dollar)
VaV	Výzkum a vývoj
VB	Spojené království Velké Británie a Severního Irska
VVER	Ruský design tlakovodního reaktoru (Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor)
WACC	Vážené náklady na kapitál (Weighted Average Cost of Capital)
WCR	Vodou chlazený reaktor (Water-cooled reactor)
ZHP	Zóna havarijního plánování

PŘÍLOHA B: EKONOMICKÝ MODEL – VÝPOČTY

Zpracování ekonomických výpočtů je k dispozici ve výpočtovém souboru v Digitální knihovně ČVUT na adrese: <https://dspace.cvut.cz/>