

I. Personal and study details

Student's name: **Krýcha Martin** Personal ID number: **499207**
Faculty / Institute: **Faculty of Electrical Engineering**
Department / Institute: **Department of Electrical Power Engineering**
Study program: **Electrical Engineering, Power Engineering and Management**
Specialisation: **Applied Electrical Engineering**

II. Bachelor's thesis details

Bachelor's thesis title in English:

Potencial application of pressurized water SMR in CR energy industry

Bachelor's thesis title in Czech:

Potenciál uplatn ní tlakovodních SMR v energetice R

Guidelines:

- 1) Maturity of pressurized water SMRs
- 2) Advantages and disadvantages of SMRs innovations
- 3) Technical comparison of selected pressurized water SMR projects with large PWRs
- 4) Pressurized water SMR and CR economy

Bibliography / sources:

- 1) Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. IAEA ARIS [online]. Austria: IAEA, 2020, s. 343 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf
- 2) BE VÁ , Josef. Druhé opravné vydání. Praha: SNTL, 1981.
- 3) Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda. Renewable and Sustainable Energy Reviews [online]. 2020, (118), 20 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109519](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109519)
- 4) MORALES PEDRAZA, Jorge. Small Modular Reactors for Electricity Generation: An Economic and Technologically Sound Alternative. 2017. Vienna, Austria: Springer International Publishing, 2017. ISBN 9783319522159.

Name and workplace of bachelor's thesis supervisor:

Ing. Jakub Líman, Ph.D. EZ, a. s.

Name and workplace of second bachelor's thesis supervisor or consultant:

Date of bachelor's thesis assignment: **20.02.2023** Deadline for bachelor thesis submission: **26.05.2023**

Assignment valid until: **16.02.2025**

Ing. Jakub Líman, Ph.D.
Supervisor's signature

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
Head of department's signature

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
Dean's signature

III. Assignment receipt

The student acknowledges that the bachelor's thesis is an individual work. The student must produce his thesis without the assistance of others, with the exception of provided consultations. Within the bachelor's thesis, the author must state the names of consultants and include a list of references.

Date of assignment receipt

Student's signature

Bakalářská práce

POTENCIÁL UPLATNĚNÍ TLAKOVODNÍCH SMR V ENERGETICE ČR

Martin Krýcha

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky
Vedoucí: Ing. Jakub Líman, Ph.D.
24. května 2023

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

© 2023 Martin Krýcha. Všechna práva vyhrazena.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě elektrotechnické. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci: Krýcha Martin. *Potenciál uplatnění tlakovodních SMR v energetice ČR*. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2023.

Obsah

Poděkování	vi
Prohlášení	vii
Abstrakt	viii
Seznam zkratk	ix
Úvod	1
1 Typy malých modulárních reaktorů	3
1.1 WCR (Water Cooled Reactor)	4
1.2 HTGR (High Temperature Gas-cooled Reactor)	4
1.3 LMR (Liquid Metal Reactor)	4
1.4 MSR (Molten Salt Reactor)	4
2 Vyspělost tlakovodních SMR	5
2.1 Seznámení se s tlakovodními SMR	5
2.2 Typy PWR SMR	7
2.2.1 Formy výstupní energie	7
2.2.2 Uspořádání primárního okruhu	7
2.2.3 Cirkulace chladiva	8
2.2.4 Druh a obohacení paliva	8
2.2.5 Způsob výměny paliva a délka palivové kampaně	9
2.2.6 Koncept bezpečnostních systémů	9
2.3 Aktuální evropský vývoj	10
2.3.1 Green Deal	10
2.3.2 Problematika snižování emisí v energetice	11
3 Inovativní prvky	13
3.1 Modularita	13
3.2 Bezpečnost a provozní prvky	15
3.2.1 Ochrana do hloubky (Defence in Depth)	15
3.2.2 Inherentní bezpečnost	15
3.2.3 Koncepce bezpečnostních systémů	16
3.2.4 Systémy havarijního chlazení AZ (Emergency Core Cooling Systems)	16
3.2.5 Systém odvádění zbytkového tepla (Decay Heat Removal System)	17
3.2.6 Systém pasivního chlazení AZ (Passive Core Cooling System)	17
4 Technické porovnání vybraných projektů tlakovodních SMR s velkými PWR	19
4.1 Bezpečnostní parametry	19
4.1.1 Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti	19
4.1.2 CDF (Core Damage Frequency)	20
4.1.3 LRF (Large Release Frequency)	20

4.2	Provozní parametry	21
4.2.1	Výkon na plochu	21
4.2.2	Účinnost	21
4.2.3	Poměr výkonu a množství paliva	22
4.2.4	Vyhoření paliva	23
4.3	Hodnocení parametrů vybraných projektů SMR	23
4.3.1	VOYGR SMR	23
4.3.2	UK SMR	24
4.3.3	SMR-160	24
4.3.4	Porovnání parametrů	25
5	Tlakovodní SMR z pohledu ekonomiky ČR	29
5.1	Produkty tlakovodních SMR	29
5.1.1	Elektrická energie	29
5.1.2	Tepelná energie	29
5.1.3	Vodík	30
5.1.4	Podpůrné služby	30
5.2	Zákon č. 367/2021 Sb.	31
5.3	Plánované SMR projekty v ČR	31
5.4	Ekonomické příležitosti	32
5.4.1	Zdrojová přiměřenost elektrizační soustavy	32
	Závěr	33

Seznam obrázků

1.1	Počet SMR projektů	3
2.1	Technologické schéma SMR	6
2.2	PWR VVER-1000	8
2.3	iPWR SMR SMART	8
2.4	Energetický mix 2021	11
3.1	Modularita modulů	14
4.1	Elektrický výkon analyzovaných reaktorů	24

Seznam tabulek

2.1	Vlastnosti projektů PWR SMR	10
4.1	Technické parametry vybraných reaktorů 1	26
4.2	Hmotnost palivové vsázky UO_2 vybraných projektů	27
4.3	Technické parametry vybraných reaktorů 2	27

Chtěl bych poděkovat Ing. Jakubu Límanovi, Ph.D., za vedení této bakalářské práce a cenné rady, které mi poskytl. Rovněž bych rád ze srdce poděkoval své rodině za jejich nepostradatelnou podporu a zázemí, které mi poskytli nejen ve věcných záležitostech, ale i na emocionální úrovni.

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 24. května 2023

.....

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá tlakovodními malými modulárními reaktory a jejich potenciálním uplatněním v energetice České republiky. Čtenář je nejprve seznámen s různými technologiemi malých modulárních reaktorů a poté konkrétněji s tlakovodní technologií a inovacemi, které tyto reaktory nabízí. Hlavní částí této bakalářské práce je ověření technické konkurenceschopnosti vybraných designů v kontextu dnešní doby a České republiky. Pro porovnání bezpečnostních a provozních parametrů byly vybrány tři pokročilé projekty malých modulárních reaktorů, dva projekty uvažované při výstavbě nového jaderného zdroje v Dukovanech a již postavené reaktory v Dukovanech a Temelíně. Dále je v práci nastíněn ekonomický přínos z pohledu ekonomiky České republiky, dekarbonizačního scénáře do roku 2040 a její legislativy.

Klíčová slova SMR, malé modulární reaktory, tlakovodní SMR, SMR v ČR, energie, energetika ČR, malé modulární reaktory v České republice, konkurenceschopnost SMR

Abstract

This bachelor's thesis focuses on pressurized water small modular reactors and their potential application in the energy sector of the Czech Republic. The reader is first introduced to various small modular reactor technologies and then specifically to pressurized water technology and the innovations offered by these reactors. The main part of this bachelor's thesis verifies the technical competitiveness of selected designs in the context of the present time and the Czech Republic. For comparison of safety and operational parameters, three advanced projects of small modular reactors were selected, including two projects considered for the construction of a new nuclear power source in Dukovany, as well as the already built reactors in Dukovany and Temelín. Furthermore, the thesis outlines the economic benefits from the perspective of the Czech Republic's economy, the decarbonization scenario until 2040, and its legislation.

Keywords SMR, small modular reactor, pressurized water SMR, SMR in CR, energy, energy industry of CR, small modular reactors in Czech republic, competitiveness of SMR

Seznam zkratek

AZ	Aktivní zóna
CDF	Core Damage Frequency Frekvence výskytu poškození paliva v AZ
DiD	Defence in Depth Ochrana do hloubky
DHRS	Decay Heat Removal System Systém odvádění zbytkového tepla
ETE	Elektrárna Temelín
EDU	Elektrárna Dukovany
IAEA	International Atomic Energy Agency Mezinárodní agentura pro atomovou energii
JE	Jaderná elektrárna
LR	Large Release Velký únik
LRF	Large Release Frequency Frekvence velkého úniku
LER	Large Early Release Velký časný únik
LERF	Large Early Release Frequency Frekvence velkého časného úniku
LOCA	Loss of Coolant Accident Havárie s únikem chladiva primárního okruhu
MOX	Mixed Oxide Fuel Směsné oxidické palivo
NPM	NuScale Power Module NuScale výkonový modul
NRC	Nuclear Regulatory Commission Jaderný regulační úřad pro jadernou bezpečnost v USA
PWR	Pressurized-Water Reactor Tlakovodní reaktor
PCCS	Passive Core Cooling System Systém pasivního chlazení AZ
PSA	Probabilistic Safety Assessment Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti
SMR	Small Modular Reactor Malý modulární reaktor
η	Účinnost
$P_{t/S}$	Tepelný výkon na plochu
$P_{e/S}$	Netto elektrický výkon na plochu
$P_{t/m}$	Tepelný výkon na hmotnost paliva
$P_{e/m}$	Netto elektrický výkon na hmotnost paliva

Úvod

Energetika v evropském měřítku prochází razantní transformací, která produkuje vysokou míru nejistoty v jejím dalším vývoji. Příštích dvacet let bude pro sektor energetiky kritickým obdobím, ve kterém se rozhodne jakým způsobem se Česká republika vypořádá se stále rostoucí poptávkou po energii v různých formách a současném nárůstu nároků na její produkci.

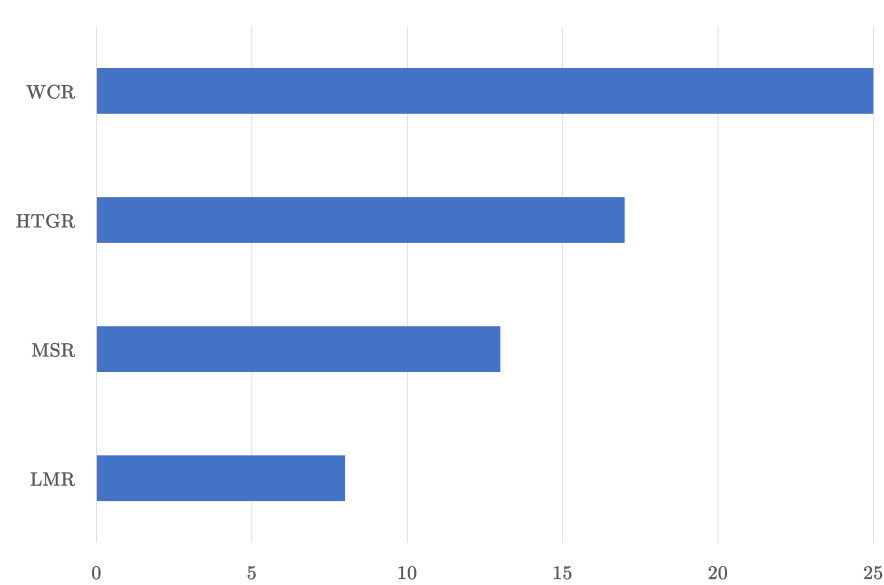
V rámci nastaveném trendem dekarbonizace Evropy roste v energetice podíl intermitentních zdrojů energie. Tyto zdroje jsou sice schopné dodávky levné a bez-emisní energie, ale postrádají stabilitu, která je nezbytná pro dodržení bilance mezi výrobou a spotřebou. V uplynulých dvou letech se také projevila závislost tuzemské energetiky na importech plynu a možnost narušení energetické bezpečnosti v případě nenaplnění těchto dodávek.

Jaderná energetika je součástí tuzemského energetického mixu od května roku 1985, kdy byl do provozu uveden první blok jaderné elektrárny Dukovany. Od té doby až po současnost zajišťují jaderné elektrárny významnou část pokrytí základního zatížení a jsou zdrojem stabilní a bez-emisní elektrické energie. Bohaté zkušenosti inženýrských kapacit v oblasti tlakovodních reaktorů otevírají možnost dalšího rozvoje jaderné energetiky a to skrze výstavbu nových a inovativních generací jaderných reaktorů s vylepšenou úrovní jaderné bezpečnosti. Jaderná energie je odpovědí na současné politicko-ekonomické a environmentální zadání.

Typy malých modulárních reaktorů

Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA) definuje SMR, jako pokročilé jaderné reaktory s elektrickým výkonem až 300 MW, jejichž komponenty a systémy mohou být továrně vyráběny a poté transportovány ve formě modulů na místo výstavby. Tyto reaktory lze dělit podle použitého chladiva na

- reaktory chlazené vodou WCR (Water Cooled Reactor),
- vysokoteplotní plynem chlazené reaktory HTGR (High Temperature Gas-cooled Reactor),
- reaktory chlazené kapalnými kovy LMR (Liquid Metal Reactor),
- a reaktory chlazené tavenými solemi MSR (Molten Salt Reactor).[1]



■ **Obrázek 1.1** Počet SMR projektů daných typů dle IAEA přehledu [1].

1.1 WCR (Water Cooled Reactor)

Mezi WCR spadají lehkovodní reaktory LWR (Light Water Reactor) a těžkovodní reaktory (Heavy Water Reactor). Voda u obou skupin reaktorů působí jako moderátor, tedy zpomaluje rychlé neutrony na tepelné. Tyto reaktory jsou nejvíce zastoupenou skupinou z projektovaných SMR.

Lehkovodní reaktory využívají jako moderátor lehkou vodu a dále se dělí na

- tlakovodní reaktory PWR (Pressurized Water Reactor),
- varné reaktory BWR (Boiling Water Reactor)
- a reaktory chlazené vodou se superkritickými parametry SCWR (Supercritical Water Reactor).

Těžkovodní reaktory mají jako moderátor oxid deutéria DO_2 (těžkou vodu). Zástupcem této skupiny je

- tlakovodní reaktor na těžkou vodu PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor).

Speciálním příkladem je reaktor HWLWR (Heavy Water Light Water Reactor) chlazený lehkou vodou a moderovaný těžkou vodou.[2]

1.2 HTGR (High Temperature Gas-cooled Reactor)

HTGR jsou vysokoteplotní, plynem chlazené reaktory, využívající grafit jako moderátor a helium jako chladivo. Tyto reaktory jsou zástupci generace IV¹. Tyto reaktory pracují při vysoké teplotě typicky v rozmezí 750-950°C. To z tohoto typu reaktoru dělá dobrého kandidáta pro pokročilé metody výroby vodíku jako je například vysokoteplotní elektrolyza. Rizika tohoto typu reaktoru mohou být spojena s menšími provozními zkušenostmi.[3]

1.3 LMR (Liquid Metal Reactor)

LMR jsou dalšími zástupci reaktorů z generace IV. Tento typ reaktorů je bezmoderátorový, tedy využívá štěpné reakce na rychlých neutronech. Chladícím médiem LMR je buď sodík, olovo, či slitina olovo bismut. LMR se dělí na

- sodíkem chlazené rychlé reaktory SFR (Sodium Fast Reactor)
- a tekutým olovem chlazené rychlé reaktory LFR (Lead Cooled Fast Reactor).[4]

1.4 MSR (Molten Salt Reactor)

MSR jsou opět reaktory IV generace. MSR se dělí na dva typy a to homogenní a heterogenní. V prvním případě je jaderné palivo rozpuštěné v chladivu primárního okruhu a ve druhém případě je chladivo od paliva oddělené. Chladivem, které cirkuluje při téměř atmosférickém tlaku, je solná tavenina. MSR pracují při teplotách až 700-750°C. V případě heterogenního typu tekuté palivo přináší některé výhody, jako je například lepší záporný koeficient reaktivity nebo hlubší vyhoření paliva, například až 180 GWd/t u reaktoru Mk1 PB-FHR[5] navrženého na University of California v Berkeley.[6]

¹Generace IV je generace inovativních typů reaktorů, které byly vybrány v roce 2001 na mezinárodní konferenci GIF. Tato generace cílí na efektivnější palivový cyklus a zlepšování úrovně jaderné bezpečnosti oproti předchozím generacím.

Vyspělost tlakovodních SMR

2.1 Seznámení se s tlakovodními SMR

PWR SMR (Pressurized Water Small Modular Reactor) je koncept jaderných reaktorů, který je v dnešní době velice diskutovaným tématem. Jedná se o design tlakovodního reaktoru na lehkou vodu, který je však výkonově i velikostí značně menší oproti velkým jaderným blokům, které mají výkony běžně nad 1 GWe. Skupina ČEZ pro účely ČR definuje SMR jako lehkovodní reaktory, které jsou alespoň III+ generace¹ o instalovaném výkonu 100-520 MWe. Je nutné zmínit, že PWR SMR pracují na stejných fyzikálních principech jako velké lehkovodní reaktory, tedy na principu jaderného štěpení tepelných neutronů a přeměně energie vazební na energii tepelnou. Díky tomu je možné využít bohaté zkušenosti, které lidstvo provozem lehkovodních reaktorů, od spuštění prvního tlakovodního reaktoru americké jaderné elektrárny Shippingport v 60. letech minulého století, nasbíralo.[2] Koneckonců i samotná Česká republika má bohaté provozní zkušenosti s tlakovodními jadernými reaktory provozovanými přímo na našem území. Díky těmto technologickým a provozním zkušenostem se PWR SMR jeví jako vhodnější varianta oproti reaktorům typu breeder² pracujícím na U^{238} a reaktorům chlazeným roztavenými solemi, či superkritickou vodou, se kterými takto rozsáhlé zkušenosti nemáme.

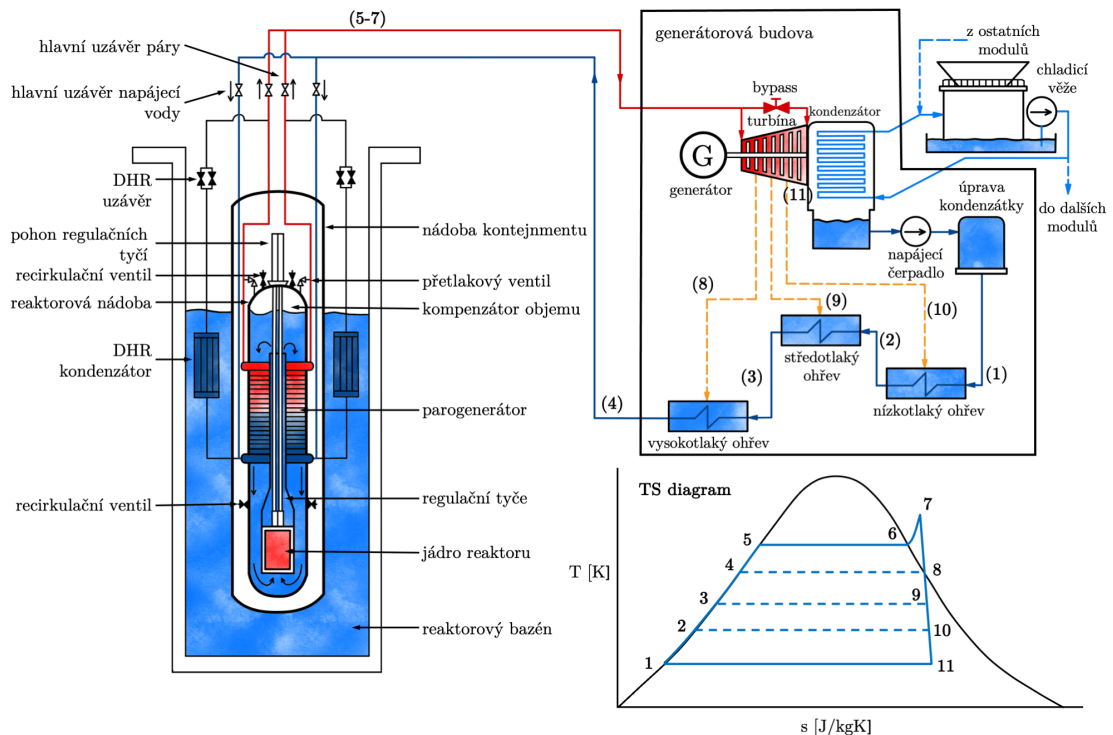
Na jaderné elektrárny typu SMR je nutno nahlížet jako na potenciální doplněk aktuálního energetického mixu, který nemá za cíl nahradit velké jaderné bloky. Výstavba jaderných bloků je časově velice náročná, nejen z hlediska samotné výstavby, ale také procesu otevírání lokality pro stavbu nového jaderného zdroje a procesů povolování - každý blok je svým způsobem unikát. Koncept SMR je založen na sériové výrobě, takže se jeví jako ideální náhrada za postupně vyřazované uhelné elektrárny. Standardizace sériové výroby nabízí snížení doby výstavby SMR až o 50 % oproti velkým blokům[7]. Jedná se zároveň o low-carbon zdroj energie, který by mohl napomoci k dekarbonizaci EU podle dohody Green Deal do roku 2050. PWR SMR lze využít nejen k výrobě elektrické energie, ale také v teplárenském průmyslu a k jiným energetickým účelům - více v kapitole 5.1. PWR SMR jako zástupce reaktorů generace III+ zavádějí v oblasti jaderné energetiky nové bezpečnostní prvky a inovace stávajících systémů velkých reaktorů. Zvýšená úroveň jaderné bezpečnosti těchto reaktorů by mohla napomoci k uvolnění tlaku kladeného na jadernou energetiku ze strany veřejného mínění.

¹Generace III+ jaderných reaktorů zahrnuje podstatné změny v bezpečnosti a hospodárnosti provozu oproti III. generaci

²Breeder (množivý) je typ reaktoru, který pracuje s rychlými neutrony a při svém provozu produkuje větší množství štěpitelných izotopů, než sám spotřebuje.

Tlakovodní SMR mají ve většině případů tři okruhy:

- primární - reaktorový okruh,
- sekundární - okruh páry,
- terciární - okruh chladicích věží.



■ **Obrázek 2.1** Zjednodušené tříokruhové technologické schéma iPWR SMR.

V primárním okruhu se nachází jaderný reaktor, který obsahuje jaderné palivo. V aktivní zóně jaderného reaktoru probíhá řetězová štěpná reakce štěpitelných izotopů jaderného paliva. Tento okruh je zaplaven lehkou vodou, která zde plní funkci média, které odvádí teplo vzniklé řetězovou štěpnou reakcí a zároveň plní funkci moderátoru, který snižuje energii rychlých neutronů na úroveň energie neutronů tepelných. Snížením energie neutronu se sníží energie potřebná pro překonání sil mezi tímto neutronem a izotopem jaderného paliva - zvýší se pravděpodobnost štěpné reakce. Teplo je z reaktoru odváděno do parogenerátoru, který slouží jako výměník tepla do sekundárního okruhu. Po předání energie v parogenerátoru se voda vrací zpět do reaktoru. Tlak primárního okruhu se u PWR SMR pohybuje od 12 do 17 MPa[1] v závislosti na konkrétním designu.

Médiem sekundárního okruhu je také lehká voda, která zprostředkovává transport tepelné energie. V parogenerátoru je voda ohřívána a odpařována teplem předaným primárním okruhem. Pára je dále v přehříváku přehřívána na větší teplotu. Tlak admissní páry SMR se pohybuje okolo 5 MPa[1]. Následně admissní pára putuje do turbíny, expanduje a přeměňuje část své tepelné energie na energii kinetickou, která je pomocí hřídele turbíny přenesena do generátoru a zde přetransformována na energii elektrickou. Výstupní (emisní) pára z turbíny má vysokou hodnotu entropie s . Proto je odváděna do kondenzátoru, kde kondenzuje při okolní teplotě na vodu

a předává svoji entropii chladicí vodě terciárního okruhu. Z kondenzátoru vystupuje napájecí voda, která je napájecím čerpadlem odčerpávána zpět do parogenerátoru a tím se okruh uzavírá.

Terciární okruh zajišťuje odvod entropie emisní páry z elektrárny do okolí - odvod odpadního nízko-potenciálního tepla. Chlazení je buď mokré s uzavřeným cyklem, suché s uzavřeným cyklem, kombinace obojího či průtočné. Daná metoda chlazení je volena na základě dostupnosti vody v lokalitě, rozlohy terciárního okruhu a nároků na úsporu vody.[8]

2.2 Typy PWR SMR

Jak už bylo výše zmíněno, princip výroby elektrické energie, který PWR SMR využívá, se provozně příliš neliší od velkých PWR reaktorů. Proto jednotlivé typy PWR SMR vycházejí především z již ověřených technologií, přejatých od velkých reaktorů, a ty rozvíjí nově aplikovanými inovativními prvky generace III+. Tlakovodní malé modulární reaktory lze tedy rozlišovat podle následujících kritérií:

- formy výstupní energie,
- uspořádání primárního okruhu,
- cirkulace chladiva,
- druhu a obohacení paliva,
- způsobu výměny paliva a délky palivové kampaně,
- konceptu bezpečnostních systémů.

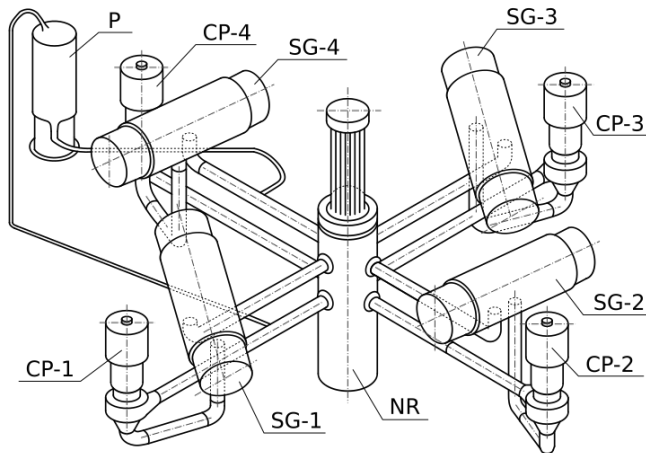
2.2.1 Formy výstupní energie

PWR SMR jsou tedy reaktory o maximálním elektrickém výkonu 300 MWe, maximální tepelný výkon je však až do hodnot 1000 MWt. Nabízí se tedy možnost, stejně jako u velkých tepelných elektráren využívat jednu, či obě formy energie. Přeměna tepelné energie na elektrickou v elektrárnách, které využívají vodu či páru jako médium, je účinnostně omezena Rankin-Clausiovým cyklem. Účinnost tohoto cyklu se u velkých jaderných bloků pohybuje v rozmezí 30 % - 35 %. U PWR SMR je tato účinnost obdobná jako u velkých bloků. Tento druh přeměny energie je tedy z fyzikálních principů velice ztrátový. Nabízí se možnost energii nepřeměňovat, ale přímo dodávat vyrobené teplo do měst či průmyslových podniků - SMR jako teplárny či výtopy.

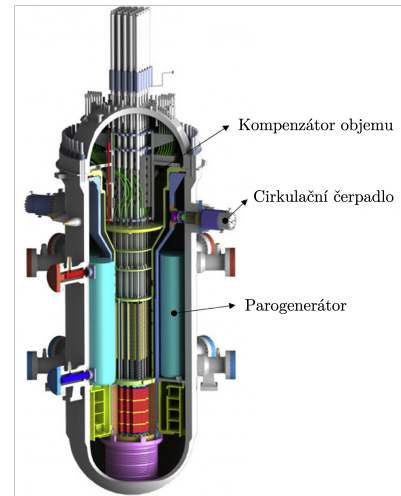
2.2.2 Uspořádání primárního okruhu

Při smyčkovém uspořádání je chladicí voda z reaktoru přenášena do parogenerátoru pomocí potrubí. V parogenerátoru předá chladicí voda svoji energii do sekundárního okruhu, kde vzniká pára a potrubím se opět vrací do reaktoru. Na obrázku 2.2 je zobrazen primární okruh ruského reaktoru VVER-1000 složený ze čtyř parogenerátorů a příslušných hlavních cirkulačních čerpadel.

Integrální uspořádání (obrázek 2.3) naopak vsazuje všechny prvky primárního okruhu do reaktorové tlakové nádoby. Přesunutím parogenerátoru, hlavních cirkulačních čerpadel a kompenzátoru objemu přímo a dalších komponent do tlakové nádoby reaktoru odpadá potřeba potrubí pro přenášení chladiva mezi jednotlivými segmenty primárního okruhu. Integrální uspořádání tím slibuje zvýšenou bezpečnost a spolehlivost provozu.



■ **Obrázek 2.2** Smyčkové uspořádání reaktoru VVER-1000[9]. NR - reaktorová nádoba, SG - parogenerátory, CP - hlavní cirkulační čerpadla, P - kompenzátor objemu



■ **Obrázek 2.3** Integrované uspořádání reaktoru iPWR SMR SMART[10].

2.2.3 Cirkulace chladiva

Některé SMR používají princip přirozené cirkulace chladiva primárního okruhu, která zajistí dostatečný odvod tepla i při plném výkonu a zároveň i dostatečný odvod tepla k zajištění dostatečného času na reakci při havarijních stavech[7]. Přirozená cirkulace je zapříčiněna rozdílem hustoty, který vzniká vlivem rozdílných teplot uvnitř reaktoru (ohřáté chladivo stoupá vzhůru). V tomto případě z primárního okruhu úplně odpadají čerpadla pro cirkulaci chladiva. Nucený oběh chladiva probíhá stejným způsobem jako u velkých jaderných zdrojů pomocí hlavních cirkulačních čerpadel, která jsou u SMR podle typu uspořádání uvnitř, nebo vně reaktorové tlakové nádoby.

2.2.4 Druh a obohacení paliva

Jaderné palivo musí splňovat požadavek velkého účinného průřezu pro štěpení, dostatečný koeficient tepelné vodivosti a zároveň požadavek na dostatečně velký výtěžek neutronů při jedné štěpné reakci, aby bylo možné dosáhnout udržitelné kontinuální štěpné reakce a uvést reaktor do kritického stavu. Již v minulosti se provozem velkých PWR osvědčilo palivo oxid uraničitý UO_2 s obohacením U_{92}^{235} do 5 %. UO_2 se nejčastěji zpracovává do tvaru sintrovaných tablet s čoučkovitě vydutými čely, či otvorem uvnitř pro snížení teplotních špiček uvnitř paliva a snížení rizika tavení paliva za provozu. Vytěžený přírodní uran obsahuje asi 0,71 % štěpitelného izotopu uranu U_{92}^{235} . Energetický výtěžek paliva reaktorů pracujících na přírodní uran nepřesahuje $0,69 \text{ TJ kg}^{-1}$. Pokud však zvedneme obohacení paliva uranem U_{92}^{235} na 3 %, dosáhne energetický výtěžek až $2,9 \text{ TJ kg}^{-1}$ [2]. Úroveň obohacení paliva je v současné době stanovena několika mezinárodními normami a to ISO³ 7195, ANSI⁴ N14.1, ASTM⁵ C-996-15[11]. První dvě normy stanovují úroveň obohacení hexafluoridu UF_6 , který se používá při výrobě obohaceného jaderného paliva, na 5 %, aby jej bylo možné přepravovat mezi jednotlivými výrobny. Třetí norma poskytuje pouze standard nastavený na 5 % obohacení, který může být navýšen. Členské státy IAEA v posledních letech vznášejí požadavky na navýšení tohoto limitu. Navýšení limitu může vést k provozu

³International Organization for Standardization

⁴American National Standards Institute

⁵American Society for Testing and Materials

elektráren s vysokým stupněm vyhoření paliva a důsledkem by bylo zlepšení dlouhodobé udržitelnosti palivových cyklů. V reakci na tyto požadavky uspořádala IAEA v letech 2015 a 2018 technické konference k projednání tohoto tématu týkajícího se provozu LWR. Toto dění však nemá dopad na aktuální PWR SMR projekty - viz. tabulka 2.1[12].

2.2.5 Způsob výměny paliva a délka palivové kampaně

Palivovou kampaní rozumíme dobu, po které se musí vyhořelé palivo vyměnit za nové. Kampaněová výměna může probíhat na odstaveném reaktoru při zachování provozního tlaku chladiva, či na odstaveném reaktoru s atmosferickým tlakem za současného demontování některých částí reaktoru. Výhoda kampaňovitého provozu spočívá v jednoduchosti provedení výměny a jednoduchosti zařízení potřebných k výměně. Nevýhodou je naopak nutnost odstavení reaktoru - při odstávce generátor nedodává do sítě elektrickou energii.[2]

Z konceptu velikosti SMR vyplývá, že při odstávce jednoho SMR nedochází k přerušení dodávky tak velkého výkonu jako v případě velkých reaktorů. U vzdálených instalací se klade důraz na dlouhé palivové kampaně, které přispívají k autonomnímu provozu.

2.2.6 Koncept bezpečnostních systémů

Reaktory generace III+ nabízejí oproti III. generaci celkové zlepšení úrovně jaderné bezpečnosti. Jedním z klíčových prvků, které PWR SMR můžou nabídnout díky jejich velikosti, oproti velkým PWR, jsou pasivní bezpečnostní systémy.

Pasivní bezpečnostní systémy fungují na základě fyzikálních principů a přírodních sil. SMR například umožňují pasivní odvod zbytkového tepla pomocí přirozené cirkulace chladiva a využití gravitačních sil při možných haváriích - odpadnou tak například havarijní čerpadla. Pasivní systémy ke svému provozu nepotřebují zdroj elektrické energie a jsou zajištěny pouze samotným designem reaktoru a kontejnmentu. Využitím pasivních systémů se zvýší spolehlivost provozu a snižuje se riziko úniku radioaktivních látek do okolí. Jednou z pasivních ochran je i integrální design reaktoru.[7]

Aktivní bezpečnostní systémy se naopak spoléhají na odvod zbytkového tepla pomocí aktivních havarijních systémů, oběhových čerpadel a v některých případech motorově ovládaných ventilů. Všechny tyto systémy jsou závislé na externím zdroji elektrické energie, a tím se zvyšuje riziko havárie. Při použití aktivních systémů musí být zajištěny redundantní zdroje elektrické energie - např. dieselařegátorové generátory. Aktivní a pasivní bezpečnost je více rozebrána v kapitole 3.2.

⁶MOX je směs oxidu uraničitého UO₂ a oxidu plutoničitého PO₂ v přibližném poměru 19:1.

■ **Tabulka 2.1** Přehled aktuálních projektů PWR SMR a jejich vlastností[1].

Reaktor	Původ	Typ	Výkon [MWt/MWe]	Cirkulace	Palivo	Obohacení [%]	Kampaň [měs.]	Koncept BS
Carem	CNEA, Argentina	iPWR	100 / 30	přirozená	UO2	3,1	14	pasivní
ACP100	CNNC, Čína	iPWR	385 / 125	nucená	UO2	< 4,95	24	pasivní
CAP200	SNERDI/SPIC, Čína	PWR	660 / > 200	nucená	UO2	4,2	24	pasivní
HAPPY200	SPIC, Čína	PWR	200 / 0	nucená	UO2	2,26	18	aktivní / pasivní
NUWARD	EDF Consortium, Francie	iPWR	540 / 170	nucená	UO2	< 5	24	pasivní
IRIS	IRIS International Consortium	iPWR	1000 / 335	nucená	UO2 / MOX ⁶	4,95	48	pasivní
IMR	MHI, Japonsko	iPWR	1000 / 350	přirozená	UO2	4,8	26	hybridní
SMART SMR	KAERI, Korea, Saudská Arábie	iPWR	365 / 107	nucená	UO2	< 5	30	pasivní
RITM-200	OKBM Afrikantov, Ruská federace	iPWR	165 / 53	nucená	UO2	< 20	72-84	hybridní
UK SMR	RR, Spojené království	PWR	1358 / 470	nucená	UO2	4,95	18-24	hybridní
NuScale	NuScale Power, USA	iPWR	250 / 77	přirozená	UO2	< 4,95	24	pasivní
SMR-160	HI, USA	PWR	525 / 160	přirozená	UO2	4,95	24	pasivní
Westinghouse	Westinghouse EC LLC, USA	iPWR	800 / > 225	nucená	UO2	< 5	24	pasivní
KLT-40S	OKBM Afrikantov, Ruská federace	PWR	150 / 35	nucená	UO2	18,6	30-36	aktivní
RITM-200M	OKBM Afrikantov, Ruská federace	iPWR	175 / 50	nucená	UO2	< 20	< 120	hybridní
ACPR50S	CGNPC, Čína	PWR	200 / 50	nucená	UO2	< 5	30	pasivní
VBER-300	OKBM Afrikantov, Ruská federace	iPWR	917 / 325	nucená	UO2	4,95	72	hybridní

2.3 Aktuální evropský vývoj

Podle IAEA jsou SMR ve stavu licencování a výstavby v Argentíně, Kanadě, Číně, Rusku, Severní Koreji a USA, zatímco v Evropě lze v současné době hovořit pouze o UK SMR britské společnosti Rolls-Royce, která v současné době prochází 2. úrovní GDA⁷ (Generic Design Assessment) a první SMR na území Británie by mohl dodávat elektřinu do sítě do roku 2030. S ohledem na dobu výstavby a licencování SMR projektů lze očekávat první SMR na území EU v průběhu příštího desetiletí. Ředitelka útvaru rozvoje malých modulárních reaktorů skupiny ČEZ Silvana Jirotková uvedla ambiciózní cíl uvedení do provozu prvního SMR v České republice v roce 2032 v Temelíně. Je zřejmé, že SMR se budou podílet na splnění cílů nastavených Green Dealem.

2.3.1 Green Deal

V listopadu roku 2019 byl vznesen požadavek k Evropské komisi na adaptaci evropské legislativy v souladu s cílem Pařížské dohody o dosažení globálního oteplení 1,5°C oproti úrovni před průmyslovou revolucí a s ním souvisejícího snížení emisí skleníkových plynů. V návaznosti na tento požadavek vznikl politicko-ekologický plán Evropské unie zvaný Green Deal.

Green Deal (Zelená dohoda) je soubor iniciativ EU, který stanovuje cíl dosažení klimatické neutrality⁸ zemí EU do roku 2050. Green Deal má dopad na řadu oblastí souvisejících s emisemi skleníkových plynů, jako je například energetika, doprava, průmysl a zemědělství. Zahrnuje široké

⁷GDA je proces schvalování, kterým musí jaderné zařízení projít, aby mohlo být na území Velké Británie postaveno a provozováno.

⁸Rovnováha mezi emitováním skleníkových plynů a jejich sekvestrací do přírodních či umělých rezervoárů, také známá pod názvem net zero.

spektrum opatření zaměřených na snižování emisí ekvivalentu CO₂ (emise vyjádřené v ekvivalentu oxidu uhličitého) do atmosféry a na podporu technologií snižujících závislost na fosilních palivech a snížení znečištění ovzduší. Pro energetiku to znamená zvýšení podílu obnovitelných zdrojů v energetickém mixu a odstavení uhelných elektráren.

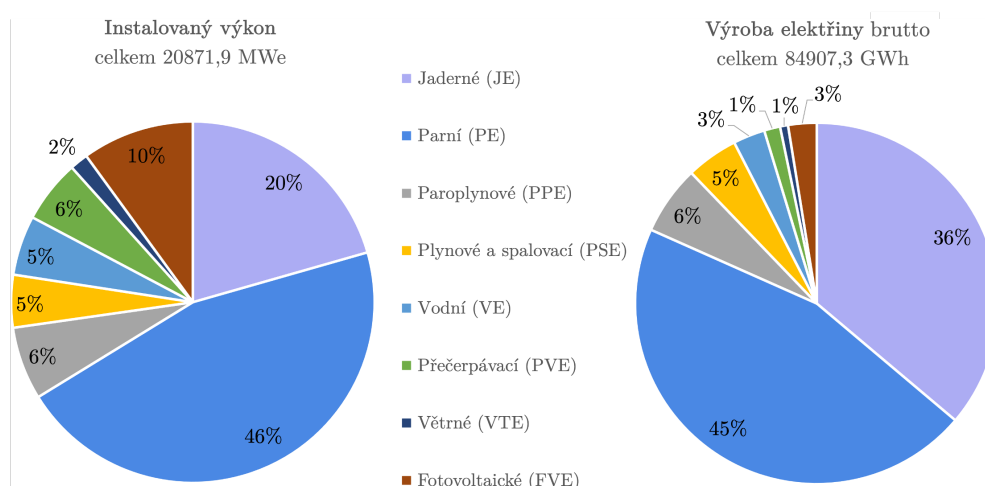
2.3.1.1 Fit for 55

Fit for 55 je legislativní balíček, který obsahuje revizi ekologické legislativy k dosažení cílů stanovených Green Dealem. Tento balíček stanovuje závazek snížení emise skleníkových plynů o 55 % oproti roku 1990. Obsahuje například návrhy na zpřísnění emisí v automobilové dopravě a s tím související podporu elektromobility, revizi systému obchodování s emisními povolenkami (ETS⁹), systém podpory obnovitelných zdrojů energie a revizi směrnice o energetické účinnosti.

2.3.2 Problematika snižování emisí v energetice

EU v rámci cílů Green Dealu postupně s trhu stahuje počet emisních povolenek a jejich cena s časem narůstá. Nárůst ceny emisních povolenek postupně snižuje konkurenceschopnost uhelných elektráren na trhu a to vede k jejich postupnému odstávování.

Green Deal zároveň podporuje výstavbu OZE¹⁰. Většina OZE, jak je patrné z grafu 2.4, spadá do kategorie intermitentních (občasných) zdrojů energie. Intermitentní zdroje energie jsou takové zdroje energie, které nejsou schopné dodávat energii stabilně (tak aby dlouhodobě pokrývaly základní zatížení) nebo v předvídatelných časových intervalech. Dodávka energie z těchto zdrojů se v průběhu dne může výrazně měnit v závislosti na přírodních podmínkách. Příkladem nestability těchto zdrojů byl den 10. 4. 2023, kdy byla společnost ČEPS (provozovatel přenosové soustavy ČR) nucena odpojit stovky mega-watt elektrického výkonu dodávaného fotovoltaickými elektrárnami. ČEPS provozovatelům těchto zdrojů pak platí za tuto odstávku a to se následně negativně projeví v regulované složce ceny energie pro koncové zákazníky. Tyto zdroje mají tedy zpravidla menší dobu využití maxima než uhelné, plynové či jaderné elektrárny a mohou tímto způsobem přispívat k neekonomickému provozu elektrizační soustavy.



Obrázek 2.4 Instalovaný výkon zdrojů v porovnání s podílem na výrobě ČR v roce 2021[13]

⁹ETS je Evropský systém pro obchodování s emisemi.

¹⁰Podle zákona č. 165/2012 Sb. se OZE rozumí obnovitelné nefosilní zdroje energie, jimiž jsou energie větru, energie slunečního záření (termální a fotovoltaická), geotermální energie, energie okolního prostředí, energie z přílivu nebo vln a jiná energie z oceánů, energie vody, energie biomasy a paliv z ní vyráběných, energie skládkového plynu, energie kalového plynu z čistření odpadních vod a energie bioplynu.

Odstavováním stabilních zdrojů energie a jejich nahrazování zdroji intermitentními může být tedy z tohoto pohledu problematické. Instalovaný elektrický výkon uhelných elektráren může být sice intermitentními zdroji nahrazen z pohledu velikosti, ne však z pohledu stability. Řešením tohoto problému může být nahrazování uhelných elektráren pomocí SMR, které jsou stabilním zdrojem elektrické energie (mají velkou dobu využití maxima výkonu) a v rámci taxonomie, která je součástí Green Dealu, a jejích technických screeningových kritérií jsou zařazené mezi zdroje čisté energie.

Inovativní prvky

3.1 Modularita

Jak již název SMR napovídá, modularita je jednou ze základních vlastností SMR. Tento pojem můžeme rozvést na dvě skupiny a to modularitu komponent a modularitu jednotlivých výkonových modulů složených z komponent.

Modularitou komponent rozumíme sériovou výrobu jednotlivých dílů, ze kterých je SMR navrhnout, a jejich montáž do funkčních celků v továrnách. Takto vyrobené a smontované celky jsou následně dopravovány do místa jaderné lokality, kde probíhá výstavba SMR, a jsou zde dále sestavovány dohromady.

Výhody plynoucí z modularity komponent:

- Standardizace sériově vyráběných komponent vede k usnadnění projektantských prací a k zisku cenných zkušeností, které lze uplatnit při další výrobě.
- Přechodem na off-site výrobu¹ se zlepšší kontrola kvality jednotlivých komponent a zvýší se efektivita jejich produkce. Přesun výroby do specializovaných výrobních hal zároveň vede ke konzistenci výrobních procesů, a tím dochází ke snížení rizik zpoždění výroby či rizik vzniku vadných modulů.[7]
- Snížení celkové doby výstavby o dvacet pět až padesát procent a snížení výrobní ceny komponent o devatenáct až dvacet procent napomáhá konkurenceschopnosti SMR na trhu.[14]

Nesmíme však zapomínat, že pro první stavěný prototyp tyto výhody nelze předpokládat. Na prototypu a dalších vyráběných SMR je nutné nejprve posbírat potřebné zkušenosti k zajištění sériové výroby. V prvopočátcích realizace jednotlivých SMR projektů tedy nelze počítat s výrazným snížením doby výstavby a snížením investičních nákladů. Princip modularity komponent snižuje výrobní náklady pouze za předpokladu dlouhodobé sériové výroby standardizovaných modulů, ze které lze brát zkušenosti, na základě kterých se výrobní proces zefektivní a zlevní.

Modularita komponent má však i své nevýhody, které mohou vést ke zvýšení některých investičních nákladů. Zavedením off-site výroby se sice rizika spojená se samotnou výrobou snižují, ale zároveň vznikají rizika, která se pojí s dopravou komponent na místo výstavby. Velikost a hmotnost jednotlivých komponent není ovlivněna pouze designem SMR k dosažení potřebných technických parametrů, ale je zároveň omezena způsobem přepravy (vlaková, silniční, lodní, letecká), který záleží na dané lokalitě výstavby SMR. Přeprava některých komponent vyžaduje

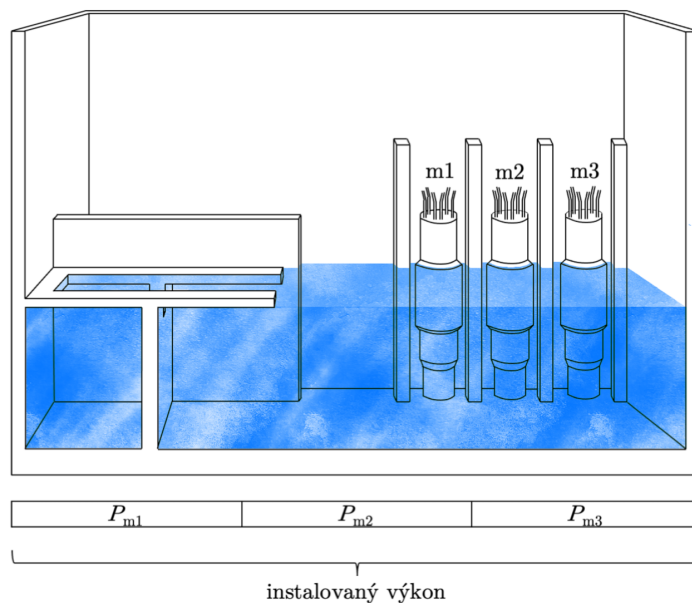
¹Off-site výroba je výroba v prostorách, které jsou k produkci komponent určené. Nejedná se tedy přímo o místo, kde probíhá samotná výstavba jaderného zdroje, jak je tomu u velkých bloků.

dodatečné konstrukční prvky a výztuhy, aby při přepravě nedošlo k deformaci vyrobených částí. Samonosnost konstrukcí při přepravě vede k vyšším nárokům na konstrukční materiály a konkrétní design a to vede ke zvýšení výrobních nákladů.[15]

Modularita výkonových modulů řeší, kolik výkonových modulů bude elektrárenský celek obsahovat, jakým způsobem jsou moduly instalovány a v důsledku tedy stanovuje celkový instalovaný elektrický a tepelný výkon elektrárny - součet elektrických a tepelných výkonů výkonových modulů. Výrobce je schopný nabídnout více výkonových hladin za použití jednotného designu výkonového modulu. VOYGR™ SMR například nabízí 3 projekty VOYGR-12, VOYGR-6 a VOYGR-4 o výkonech 924, 462 a 308 MWe, které jsou sestaveny z výkonových modulů o hrubém výkonu 77 MWe.[16]

Výhody plynoucí z modularity modulů:

- Rozšiřitelnost - zákazníci mohou počítat s flexibilním rozšiřováním daných SMR elektráren, tj. přidávání nových výkonových modulů například v závislosti na rostoucí spotřebě elektrické či tepelné energie[7].
- Flexibilita modularity modulů zajišťuje, že se i za současného provozu stávajících výkonových modulů mohou nové moduly přistavovat[7].
- Provozem prvně postaveného modulu lze financovat výstavbu dalších modulů.
- Autonomní provoz jednotlivých modulů.



■ **Obrázek 3.1** Vícemodulové uspořádání.
m1, m2, m3 - výkonové moduly

Takový koncept může být problematický kvůli nedostatku výstavbových a provozních zkušeností. Zároveň při designování projektu vzniká povinnost na tvorbu vícemodulového pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti (více v kapitole 3.2), kde se musí zohlednit vícemodulová rizika havárií. Dále je nutné počítat rizika spojená s tím, že budova není kontejnment. Každý z reaktorů má svoji nádobu kontejnmentu, z tohoto vyplývá, že modularita modulů může být podmíněna integrálním uspořádáním primárního okruhu, aby bylo dosaženo požadovaného bezpečnostního cíle.

3.2 Bezpečnost a provozní prvky

3.2.1 Ochrana do hloubky (Defence in Depth)

Princip ochrany do hloubky (DiD) je kompenzace potenciálních poruch způsobených lidským či strojním faktorem, je to koncept zaměřený na několik úrovní ochrany, včetně bariér zamezujících úniku radionuklidů do okolního prostředí. DiD zahrnuje jak ochranu proti poškození elektrárny, tak i bariér. Zároveň obsahuje opatření k ochraně veřejnosti a životního prostředí v případě prolomení těchto bariér.[17]

DiD je tedy koncept, který stanovuje obecnou strategii bezpečnostních opatření a provozních vlastností JE ke zvýšení úrovně jaderné bezpečnosti. DiD je stanovena v pěti základních úrovních:

1. **úroveň** zamezení abnormálního provozu a systémových poruch,
2. **úroveň** řízení abnormálního provozu a detekce poruch,
3. **úroveň** řízení nehod v rámci návrhového rozsahu,
4. **úroveň** řízení kritických podmínek JE, zahrnující zásah proti rozšiřování havárie a zmírnění následků těžkých havárií
5. **úroveň** a zmírnění dopadu šíření radionuklidů při vzniku jejich úniku do okolního prostředí.[18]

Klíčovou vlastností fungování těchto úrovní je jejich nezávislost. Při selhání jedné z úrovní následuje zapůsobení následující nižší úrovně. Pátá úroveň je zajištěna zásahem externích služeb a je poslední ochranou při těžkých haváriích proti zmírnění dopadu úniku radionuklidů na životní prostředí a veřejnost.[18]

3.2.2 Inherentní bezpečnost

Inherentně bezpečné zařízení je takové zařízení, které svým fyzikálním charakterem eliminuje specifická rizika spojená s jeho provozem. Inherentní bezpečnost není závislá na lidském faktoru. Inherentní rizika spojená s provozem jaderného reaktoru jsou například:

- radioaktivní štěpné produkty a jejich zbytkové teplo,
- přebytková reaktivita a její související potenciál pro výkyvy výkonu,
- vysoké tlaky, chemické reakce a uvolňování velkého množství energie v reaktoru.[19]

U PWR SMR se inherentní bezpečnost spojuje s integrálním uspořádáním primárního okruhu a záporným koeficientem reaktivity. Záporný koeficient reaktivity je fyzikální princip vzájemného působení jaderného paliva UO_2 a vody jako moderátoru při procesu jaderného štěpení. Tento typ bezpečnosti zasahuje do 2. úrovně DiD.

3.2.2.1 Záporný zpětnovazební koeficient reaktivity

Při nárůstu teploty AZ zvětšuje voda svůj objem. Při zvyšování objemu ztrácí voda svou moderační schopnost (schopnost zpomalovat rychlé neutrony) v důsledku zvětšování vzdáleností mezi molekulami vody. Pokud poklesne moderační schopnost vody, sníží se počet tepelných neutronů, které jsou schopné se podílet na řetězové štěpné reakci (útlum štěpné reakce) a v důsledku poklesne teplota AZ. V případě LOCA² (Loss of Coolant Accident) dochází k útlumu řetězové štěpné reakce následkem tvorby páry a únikem moderátoru.[2]

²Havárie, při které dochází ke ztrátě chladiva z primárního okruhu.

3.2.3 Koncepce bezpečnostních systémů

Nové generace jaderných reaktorů přináší různé přístupy k dosažení požadované úrovně jaderné bezpečnosti. Toho může být dosaženo pomocí safety-by-design konceptu a použitím pasivních bezpečnostních a aktivních bezpečnostních systémů či jejich kombinací. Pro účel této práce zde budou rozebrány pouze inovativní SMR bezpečnostní systémy.

3.2.3.1 Dosažení bezpečnosti designem (Safety-by-design)

Safety-by-design je koncept, který je uplatňovaný novými generacemi reaktorů III+ a výše. Účel tohoto konceptu je vytvořit takový design reaktoru, který svými fyzikálními vlastnostmi eliminuje určité nehody a typy nehod, či minimalizuje pravděpodobnost jejich vzniku a zmírňuje jejich následky.

Příkladem safety-by-design konceptu jsou iPWR SMR. Výše uvedených cílů dosahují integrací parogenerátoru, kompenzátoru objemu a mechanismů řídicích tyčí do reaktorové tlakové nádoby. Tím nabízí potenciál pro eliminaci LOCA (např. eliminací potrubí) a nehod způsobených řídicími tyčí a zároveň nabízí snížení následků vzniklých nehod.[20]

3.2.3.2 Aktivní a pasivní bezpečnostní systémy

Rozdíl mezi aktivními a pasivními bezpečnostními systémy lze popsat pomocí jejich závislosti na dodávce elektrické energie. Zatímco aktivní systémy využívají elektrické ovládní řídicích systémů, pasivní systémy plní své bezpečnostní funkce bez jakéhokoliv zásahu ze strany operátora či elektronické zpětné vazby. SMR designy využívají převážně pasivní bezpečnostní systémy, či kombinaci pasivních a aktivních bezpečnostních systémů (viz tabulka 2.1).

Použitím pasivních bezpečnostních systémů namísto aktivních, které vyžadují redundantní zálohování čerpadel a dodávky elektrické energie, lze snížit náklady na instalaci, údržbu a provoz těchto systémů. Pasivní bezpečnostní systémy jsou implementovány v reaktorových generacích III+ a IV také kvůli jejich potenciálu v oblasti úrovně spolehlivosti, jednoduchosti a jaderné bezpečnosti.[21]

3.2.4 Systémy havarijního chlazení AZ (Emergency Core Cooling Systems)

Systém havarijního chlazení AZ (ECCS) jsou takové systémy, které v případě LOCA dodávají do primárního (chladičho) okruhu vodu, aby bylo zajištěno dostatečné chlazení při odstavení reaktoru. Tyto systémy mohou mít zároveň sekundární účel a to tlumení řetězové štěpné reakce, aby se zamezilo produkci tepelného výkonu. Zajišťují tedy odvod zbytkového tepla a udržení podkritického stavu AZ reaktoru.

V ETE je ECCS složen ze čtyř základních podružných systémů, a to z vysokotlakého, středotlakého a nízkotlakého systému havarijního chlazení a hydroakumulátoru obsahujícího vodu s vysokou koncentrací kyseliny borité. Vysokotlaký, středotlaký a nízkotlaký systém havarijního chlazení slouží ke vstřikování chladiva za použití čerpadel v případě LOCA a jedná se tedy o aktivní bezpečnostní systém. Zapůsobení hydroakumulátoru je podmíněno otevřením zpětného ventilu v důsledku velkého poklesu tlaku v chladičím okruhu a jedná se tedy o pasivní systém působící na základě fyzikálního principu. Tyto systémy jsou pak dále doplněny například o sprchový systém ochranné obálky.[2]

Přechodem na integrální uspořádání reaktoru dochází v podstatě k eliminaci LOCA. Může však nastat únik v potrubí mezi nádobou kontejnmentu a reaktorovou nádobou. V případě VOYGR SMR je ECCS realizován pouze pomocí tří reaktorových ventilačních ventilů a dvou recirkulačních ventilů. V případě, že LOCA nastane, spustí se havarijní tyče, dojde k zavření

ventilů napájecí vody a ventilů páry. Poté se otevřou reaktorové ventilační ventily a pára z reaktorové nádoby proudí do nádoby kontejnmentu. Důsledkem je pokles tlaku v reaktorové nádobě (další snížení moderační schopnosti vody) a nárůst tlaku v nádobě kontejnmentu. Pára předává svoji energii stěnám kontejnmentu a parogenerátorů a kondenzuje. Ve spodní části kontejnmentu se začne hromadit voda, která se po otevření recirkulačních ventilů dostává opět do reaktorové nádoby, kde začne znovu přirozeně cirkulovat bez použití čerpadel a opět se vypařuje. SMR využívající přirozenou cirkulaci mají ECCS řešené obdobným způsobem i bez integrálního uspořádání a mohou být doplněny o systémy pasivního či aktivního přísunu chladicí vody.[22]

3.2.5 Systém odvádění zbytkového tepla (Decay Heat Removal System)

Systém odvádění zbytkového tepla (DHRS) je systém sloužící pro odvod zbytkového tepla vznikajícího rozpadem štěpných produktů při non-LOCA události (bez ztáty chladiva) a na odstaveném, či již odstaveném reaktoru. Systém odvádění zbytkového tepla může být jak aktivní, tak pasivní.

Aktivní DHRS vhání ohřátou vodu do tepelných výměníků k chlazení pomocí čerpadel. U pasivních systému se využívá konvekce a vztlač pro realizaci přirozené cirkulace chladiva. Voda se v AZ reaktoru ohřívá, tím nabývá na objemu a snižuje se její hustota. V důsledku toho teplá voda stoupá do parogenerátoru, kde se ochladí, sníží svůj objem a zvýší se její hustota. Ochlazená voda poté klesá ke dnu reaktorové nádoby, kde se opět ohřívá a celý cyklus se opakuje. V parogenerátoru vzniká pára, která proudí do DHR kondenzátorů, kde kondenzuje a vrací se potrubím zpět do parogenerátoru. V DHR kondenzátorech pára předává svoji energii konečnému chladicímu systému, což může být vodní rezervoár či okolní vzduch. V designu SMR jsou používány i hybridní DHRS, kdy při nedostatečném chlazení pasivním systémem se přejde na chlazení systémem aktivním.[23]

3.2.6 Systém pasivního chlazení AZ (Passive Core Cooling System)

Některé SMR sdružují systémy havarijního chlazení AZ a systém odvádění zbytkového tepla v jeden systém pasivního chlazení AZ (PCCS). Již z názvu vyplývá, že koncept podružných systémů je pasivní. Takovýto systém plní funkce:

- havarijního odvádění zbytkového tepla,
- havarijní zajištění dodávky chladiva
- a havarijní injekci chladiva s vysokou koncentrací bóru.[24]

PCCS zajišťuje chlazení v případě projektových LOCA a non-LOCA havárií. Tento systém využívá pasivní prostředky jako je přirozená cirkulace, expanze stlačených plynů a vstřikování pomocí gravitační síly bez použití aktivních komponent.

Příkladem takového designu je SMR-160 americké firmy Holtec. PCCS je tvořen čtyřmi podružnými systémy: primárním systémem odvodu zbytkového tepla, sekundárním systémem odvodu zbytkového tepla, systémem automatické dekomprese a pasivním systémem doplňování chladicí vody.[1]

Technické porovnání vybraných projektů tlakovodních SMR s velkými PWR

4.1 Bezpečnostní parametry

V níže uvedených podkapitolách budou charakterizována technická kritéria, podle kterých budou v této práci hodnoceny vybrané SMR projekty.

4.1.1 Praviděpodobnostní hodnocení bezpečnosti

Informace v této kapitole vycházejí z dokumentu [25], vydaného SÚJB, který slouží jako doporučení pro držitele povolení k provozu jaderného zařízení, kterým stanovuje postup vedoucí ke splnění požadavků Atomového zákona.

Praviděpodobnostní hodnocení bezpečnosti (PSA) je studie, která slouží ke kvantitativnímu hodnocení parametrů JE, které se týkají jaderné bezpečnosti provozu. Studie PSA by měla popisovat aktuální stav JE a měla by být provedena pro všechna jaderná zařízení obsahující jaderný reaktor. PSA se využívá při procesech:

- předběžného posuzování budoucího projektu JE z hlediska úrovně jaderné bezpečnosti,
- aktualizace předběžného posuzování na základě nových informací vzniklých během projektování,
- udržování JE v provozu či vyřazování z provozu, jako nástroj, který sloužící k posuzování úrovně jaderné bezpečnosti stávajícího projektu, posuzování plánovaných změn systémů či jako nástroj indukující nutnost změny v systému,
- prodlužování původně plánované doby životnosti JE.[25]

PSA lze obecně rozdělit do tří úrovní:

1. úroveň - analýza pravděpodobnosti poškození paliva v aktivní zóně (AZ) reaktoru v důsledku selhání zařízení JE. Nejdůležitějším výstupem této úrovně je parametr frekvence výskytu poškození paliva v AZ (CDF),

- 2. úroveň - analyzuje důsledky poškození dalších zařízení a systémů JE v návaznosti na poškození jaderného paliva z 1. úrovně. Nejdůležitějším výstupem je parametr frekvence výskytu velkého časného úniku radioaktivní látky z kontejnmentu JE (LERF) a parametr frekvence výskytu velkého úniku (LRF),
- 3. úroveň - posuzuje vliv úniku radioaktivních látek mimo prostory JE na obyvatelstvo a životní prostředí.[26]

Třetí úroveň však nemusí být v PSA zahrnuta podle vyhlášky č. 162/2017 Sb., o požadavcích na hodnocení bezpečnosti podle atomového zákona. Proto se v této práci budeme zabývat pouze parametry CDF, LRF (LERF) podle první a druhé úrovně PSA.

4.1.2 CDF (Core Damage Frequency)

Frekvence výskytu poškození paliva v AZ reaktoru je parametr, který se uvádí jako hlavní výstup 1. úrovně PSA. CDF je tvořen systematickou analýzou a identifikací možných událostí či sekvencí událostí, které vedou k poškození paliva v AZ. Uvádí tedy pravděpodobnost s jakou nastane událost 1. úrovně PSA, při které dojde k poškození paliva v AZ, na jeden rok provozu.

IAEA stanovuje v dokumentu [17] hodnotu CDF pro stávající JE pod hranici 10^{-4} na rok, tedy pravděpodobnost, že nehoda nastane jednou za více než 10000 let. V dokumentu se také uvádí hranice pro budoucí JE 10^{-5} na rok (jednou za 100000 let provozu reaktoru). Ke snižování CDF dochází například implementací pasivních systémů, které plní bezpečnostní funkce. Působení těchto systémů není závislé na vnějším zdroji elektrické energie a dalších bezpečnostních systémech a tím je riziko jejich selhání zpravidla menší.

Po havárii JE Fukushima-Daichi v roce 2011 byl vypracován dokument [27] skupiny ČEZ, kde se udává CDF 1. bloku EDU¹ s reaktorem VVER 440/213 s hodnotou $1,08 \cdot 10^{-5}$ na rok. Ve stejném roce byl také vydán dokument [28], kde se pro temelínský reaktor VVER 1000 V320 udává hodnota CDF $2,32 \cdot 10^{-5}$ na rok.

4.1.3 LRF (Large Release Frequency)

Podle IAEA velký únik znamená únik radionuklidů z JE, který vyžaduje zavedení ochranných opatření. V legislativě ČR jsou tato opatření stanovena požadavky zákona č 263/2016 Sb., atomový zákon, § 104. Tento únik může být specifikován několika následujícími způsoby:

- absolutním množstvím nejvýznamnějších uvolněných radionuklidů (v becquerelech²),
- podíl inventáře AZ,
- jako dávka nejvíce vystavené osobě mimo JE
- a jako únik vedoucí k "neakceptovatelným následkům"³. [29]

Frekvence velkého úniku pak udává, s jakou pravděpodobností tento únik nastane na rok reaktoru v provozu. NRC (Nuclear Regulatory Commission) stanovuje hodnotu LRF na 10^{-6} na rok pro nové JE.[30]

¹Jaderná elektrárna Dukovany

²Becquerel (Bq) je jednotka popisující aktivitu záření. Aktivita 1 Bq odpovídá 1 přeměně za 1 sekundu.

³Tento pojem je pak definován v příslušných dokumentech upravujících atomovou legislativu konkrétního státu.

4.1.3.1 LERF (Large Early Release Frequency)

Podskupinou LR jsou LER (velké časné úniky). Velký časný únik je únik radionuklidů z ochranné obálky reaktoru v takovém čase od události, ve kterém nelze použít ochranná opatření k omezení ozáření osob a životního prostředí. LER je definován ve vyhlášce č. 162/2017 Sb., o požadavcích na hodnocení bezpečnosti podle atomového zákona a je vztažen k hranici 1 % počátečního množství ^{137}Cs v jaderném zařízení do 10 hodin od vyhlášení radiální havárie. Českou legislativou je tedy LERF definován, podle výše uvedeného dělení v části 4.1.3, podílem inventáře AZ. LERF je opět pravděpodobnost, se kterou tento typ úniku nastane na rok provozu reaktoru.

IAEA stanovuje v dokumentu [17] hodnotu LERF pro stávající JE na 10^{-5} na rok provozu reaktoru. Pro budoucí projekty IAEA neposkytuje hranici LERF, ale stanovuje cíl eliminace událostí vedoucích k LER.

V roce 2012 byla vydána SÚJB Národní zpráva [31], ve které se uvádí hodnota LERF reaktoru EDU přibližně $2,54 \cdot 10^{-6}$ na reaktor rok a pro ETE reaktor přibližně $6,29 \cdot 10^{-6}$ na reaktor rok.

4.2 Provozní parametry

4.2.1 Výkon na plochu

Každá jaderná lokalita má svoji danou stavební rozlohu, proto může být dalším rozhodujícím kritériem při volbě projektu SMR parametr tepelného či elektrického výkonu na plochu - konkrétněji bude uváděno, jak velký tepelný či netto elektrický výkon vyjádřený GWe připadá na rozlohu JE vyjádřenou v km^2 .

$$P_{t/S} = \frac{P_t}{S} \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (4.1)$$

$$P_{e/S} = \frac{P_{e\text{ netto}}}{S} \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (4.2)$$

Celková plocha elektrárny zahrnuje vlastní budovy, stroje a zařízení elektrárny, skladovací palivové a odpadní prostory, infrastrukturu vlastní spotřeby a vyvedení výkonu, dopravní infrastrukturu, kancelářské a jiné budovy. Lze očekávat, že s rostoucím počtem jaderných bloků v lokalitě bude hodnota tohoto parametru obecně narůstat, protože se podíl ostatní infrastruktury bude zmenšovat. Důsledky této úvahy budou ve výpočtech zanedbány a plocha bude počítána jako prostý podíl celkové plochy JE a počtu bloků - toto platí pouze pro stávající projekty, u "papírových" projektů je rozloha uváděna pro "standard designy", které nezohledňují podmínky lokality.

4.2.2 Účinnost

Účinnost přeměny tepelné energie na energii elektrickou η kvantifikuje proces odvodu tepelné energie z reaktoru do sekundárního okruhu, její transformaci na energii mechanickou a následně na energii elektrickou. Vyjadřuje množství disipované energie do jiných forem, než je energie elektrická. Například při $\eta = 80\%$ je disipace energie do jiných forem energie, než je energie elektrická, 20 %. Jedná se tedy o prostý poměr elektrické a tepelné energie vyjádřený v procentech. Tento vztah lze vyjádřit pomocí výkonů následujícím způsobem.

$$\eta_{brutto} = \frac{P_{e\text{ brutto}}}{P_t} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.3)$$

Takový vztah pro účinnost by platil v případě, že by byla počítána přímo na svorkách generátoru. JE potřebuje k provozu napájecích, bezpečnostních, spínacích, signalizačních a dalších systémů zdroj elektrické energie. Proto se část elektrické energie z generátoru spotřebuje přímo

v areálu JE. Tuto spotřebu nazýváme vlastní spotřeba (P_{vs}). Velikost vlastní spotřeby je primárně závislá na použitém systému napájecích čerpadel (elektrické čerpadlo či turbonapajedka). Účinnost ponižená o vlastní spotřebu vypadá následujícím způsobem.

$$\eta_{netto} = \frac{P_{e\text{ brutto}} - P_{vs}}{P_t} \cdot 100 = \frac{P_{e\text{ netto}}}{P_t} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.4)$$

Je nutné zmínit, že účinnost jaderné elektrárny je daná Rankin-Clausiovým cyklem a je tedy závislá na venkovní teplotě, jelikož je na venkovní teplotě závislá kondenzace páry v sekundárním okruhu. Čím nižší je venkovní teplota, tím vyšší je účinnost elektrárny. Důsledkem je proměnlivá účinnost s měnícím se ročním obdobím a různými jadernými lokalitami, které mají své specifické klimatické podmínky.

4.2.3 Poměr výkonu a množství paliva

Jedním ze základních bezpečnostních prvků SMR je snížené množství paliva, které je obsaženo v reaktoru - zmenšení AZ. Konfigurace AZ má vliv na průběh řetězové štěpné reakce v reaktoru. Poměr mezi tepelným výkonem a množstvím paliva udává hodnotu dosažitelného výkonu z řetězové štěpné reakce v AZ na jednotku hmotnosti jaderného paliva.

$$P_{t/m} = \frac{P_t}{m_f} \quad [\text{W kg}^{-1}] \quad (4.5)$$

Vynásobením $P_{t/m}$ účinností η dostaneme dosažitelný elektrický výkon na jednotku hmotnosti jaderného paliva $P_{de/m}$.

$$P_{e/m} = P_{t/m} \cdot \eta \quad [\text{W kg}^{-1}] \quad (4.6)$$

Množství paliva v reaktoru není výrobcí v tuto chvíli poskytnuto a bude odhadnuto z parametrů palivové sestavy a počtu výkonových modulů:

- n_4 - počet výkonových modulů,
- n_3 - počet palivových kazet na výkonový modul,
- n_2 - počet palivových prutů v palivové kazetě,
- n_1 - počet palivových tablet v palivovém prutu,
- l - aktivní délka palivového prutu,
- d - vnější průměr palivové tablety,
- v - výška palivové tablety,
- ρ - hustota palivové tablety.

Počet palivových tablet v palivovém prutu je dán vztahem

$$n_1 = \frac{l}{v} \quad [-] \quad (4.7)$$

a výsledná hodnota je zaokrouhlena dolů na celá čísla. Výsledná aproximace hmotnosti paliva je určena níže uvedeným vztahem.

$$m_f = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot l \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4 \cdot \rho \quad [\text{kg}] \quad (4.8)$$

4.2.4 Vyhoření paliva

V reaktoru probíhá štěpná řetězová reakce, při které se uvolňuje tepelná energie. Vyhoření paliva udává kolik energie se při této štěpné řetězové reakci uvolnilo v reaktoru za provozu na hmotnost jaderného paliva. Vyhoření paliva tedy záleží na tepelném výkonu reaktoru a délce palivové kampaně. Vyhoření paliva "burn-up" (BU) se zde udává v gigawatt-dnech na tunu. Čím větších hodnot tento parametr nabývá, tím menší je podíl štěpitelného uranu v jaderném palivu. Vyhoření paliva také záleží na konfiguraci AZ. V různých částech AZ dochází k různému vyhoření paliva. Tento parametr se proto dělí na

- střední vyhoření - odráží průměr získané energie z tuny jaderného paliva AZ,
- maximální vyhoření - maximální stanovená hranice, nebo nejvyšší vyhoření AZ.[32]

Střední hodnota vyhoření paliva má ekonomický význam - po vynásobení hmotností palivové vsázky dostaneme celkový výtěžek energie z jaderného paliva. Maximální hodnota vyhoření paliva je naopak parametr ovlivňující jadernou a technickou bezpečnost jaderného zařízení JE. Od určité hranice vyhoření paliva, dochází ke změně jeho struktury (tedy struktury palivových tablet).[33]

SÚJB, dle rozhodnutí SÚJB/ORFBA/18622/2019, požaduje nastavení maximálního vyhoření paliva na limit 64 GWd/t, aby byly prokazatelně zachovány jeho fyzikální parametry a v důsledku byla zajištěna jaderná bezpečnost při projektových nehodách.

Z hlediska hodnocení designů má tedy smysl posuzovat pouze parametr středního vyhoření paliva.

4.3 Hodnocení parametrů vybraných projektů SMR

V této podkapitole budou analyzovány výše zmíněné technické parametry designů tří vybraných SMR projektů a to VOYGR americké společnosti NuScale, UK SMR britské firmy Rolls-Royce a SMR-160 americké firmy Holtec International. Tyto projekty byly vybrány z důvodu jejich pokročilosti, transparentnosti, dostatku podkladových materiálů a také potenciální možnosti jejich výstavby na území ČR. Zároveň se jedná o tlakovodní reaktory, se kterými mají tuzemští technici dlouhodobé zkušenosti.

4.3.1 VOYGR SMR

Firma NuScale staví design svého reaktoru VOYGR okolo integrálního NPM (NuScale Power Module), který má elektrický výkon 77 MWe na výstupu generátoru (73,5 MWe netto) a tepelný výkon 250 MWt. Jedna SMR elektrárna může obsahovat až 12 takových NPM o celkovém brutto elektrickém výkonu 924 MWe. Nominální tlak primárního a sekundárního okruhu je 13,8 MPa a 4,3 MPa. Jako palivo využívá UO₂ peletky s maximálním obohacením do 4,95 %. Palivová kampaň je dlouhá 18 měsíců a je počítáno s provozní životností 60 let.[1]

Pokud nastane nadprojektová nehoda⁴ poskytuje design pasivních bezpečnostních systémů neomezenou dobu chlazení reaktoru bez potřeby vnějšího zdroje elektrické energie, vnějšího zdroje chladicí vody a zásahu operátora. NPM je zároveň navržen tak, aby za normálního provozu vyžival přirozenou cirkulaci chladiva - odpadáva potřeba použití hlavních cirkulačních čerpadel.

Z důvodu designu několika NPM pod jednou střechou by bylo obtížné a zavádějící počítat hodnoty pouze pro 1 NPM. Proto bude ve výpočtech kalkulováno s variantou projektu VOYGR-12. Rozloha elektrárny v provedení VOYGR-12 (12 NPM) činí 140000 m². [1]

⁴Nadprojektová nehoda je definována dokumentem SÚJB [34] následujícím způsobem. "Havarijní podmínky, při kterých dojde k porušení nebo překročení projektových kritérií projektových nehod. Nadprojektové nehody mohou, ale nemusí být spojeny s významným poškozením aktivní zóny." Při splnění hodnot parametrů projektových kritérií projektových nehod jsou zajištěny základní bezpečnostní funkce projektu a jsou zachovány fyzické bariéry.

Další nabízené varianty jsou VOYGR-6 (6 NPM) a VOYGR-4 (4 NPM). V případě různých variant je nutné podotknout, že vyšetřované parametry lineárně neodpovídají počtu modulů (kromě vyhoření paliva). Parametry pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti budou například ovlivněny každým jednotlivým NPM v budově.

4.3.2 UK SMR

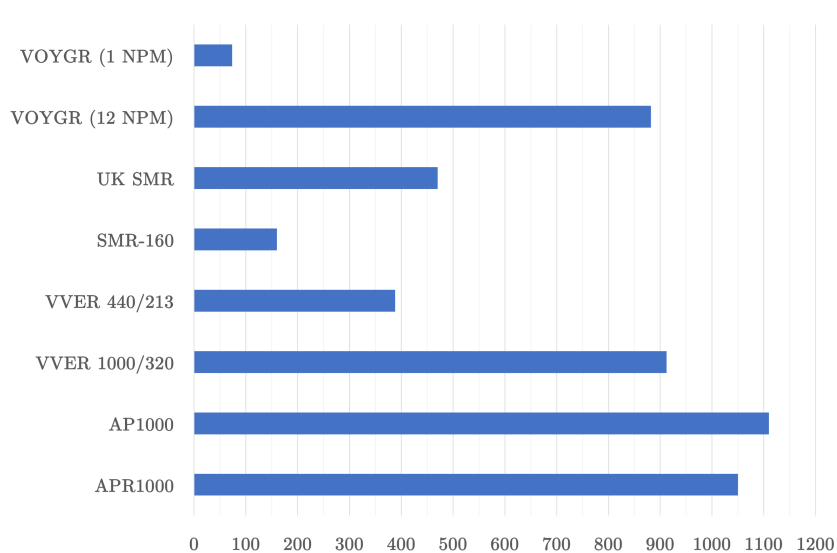
Smyčkové uspořádání UK SMR nabízí elektrický výkon 470 MWe (netto) a tepelný výkon 1358 MWt. Primární okruh využívá nucené cirkulace chladiva o nominálním tlaku 15,5 MPa, tlak sekundárního okruhu je 7,8 MPa. Palivo UO_2 má 18 měsíční kampaňovitou výměnu. Životnost je naplánovaná na 60 let. Rozloha této SMR elektrárny je odhadována na 40000 m². [1]

Velikost reaktorové nádoby je odvozena od limitu rozměrů nákladu, který lze dopravit na místo výstavby po silnici a železnici. Tyto rozměry pak stanovují maximální množství paliva v reaktoru a tím je dán tepelný výkon. Rolls-Royce SMR je spíše konzervativnější projekt, který se zaměřuje především na modularitu a rychlost výstavby, než na inovativní bezpečnostní (ty jsou zde jak pasivní tak i aktivní) a provozní prvky. Ze současné světové nabídky SMR se jedná o reaktor největšího výkonu.

4.3.3 SMR-160

Projekt SMR-160 má elektrický výkon 160 MWe (netto) a tepelný výkon 525 MWt. V primárním okruhu smyčkového uspořádání pracuje s tlakem 15,5 MPa a přirozenou cirkulací chladiva a moderátoru, na sekundárním okruhu pracuje s tlakem 3,4 MPa. Kampaňovitá výměna paliva ve formě peletek UO_2 má 24 měsíců. Plánovaná životnost tohoto SMR je 80 let. Plánovaná rozloha elektrárny SMR-160 je 28000 m². [1]

Bezpečnost provozu zajišťují pasivní bezpečnostní systémy, které jsou založeny na fyzikálních principech, jako je gravitace a přenos tepla konvekcí a vedením. Tyto systémy jsou zároveň redundantně zálohovány. Při projektové nehodě⁵ je systém nezávislý na vnějším zásahu operátora - walk-away safe. Projekt je primárně zaměřen na výrobu elektrické energie s možností využití kogenerace.



■ Obrázek 4.1 Elektrický výkon v MW (netto) 4.1

⁵Nehoda, při které nedojde k porušení základních projektových bezpečnostních funkcí.

4.3.4 Porovnání parametrů

Pro účely této kapitoly byly nashromážděny parametry stávajících velkých PWR reaktorů z ETE a EDU - lze tedy hovořit o tzv. živé PSA (live-PSA), kde se hodnoty CDF a LRF vztahují již k provozovanému systému jaderného zařízení a parametry spojené s účinností vycházejí z reálných modelů. Z důvodu porovnatelnosti PSA parametrů jsou v tabulce přidány velké reaktory AP1000 od Westinghouse Electric Company LLC (USA) a APR1000 od Korea Hydro&Nuclear Power (Jižní Korea), které jsou v současné době uvažované velké PWR při výstavbě nového jaderného bloku EDU II a jejich skutečné parametry jsou pouze odhadovány.

EPR1200 od firem Framatome, EDF Group (Francie) a Siemens (Německo) jako další projekt zvažovaný pro EDU II nebude v tomto dokumentu analyzován. EPR1200 má být zmenšená verze reaktoru EPR2 (počet reaktorových smyček se sníží ze 4 na 3), která je stále projektována a zatím neposkytuje žádná data.

Hodnoty reaktorů AP1000 a APR1000 společně s vybranými SMR nezohledňují vliv lokality na jednotlivé parametry. Budou zde tedy srovnávány z části odhadované parametry standardních projektů s již provozovanými jadernými reaktory VVER 440/213 (EDU) a VVER 1000/320 (ETE).

4.3.4.1 Hodnocení CDF

U všech SMR projektů je výrobcem stanovena hodnota CDF pod hranicí $1,00 \cdot 10^{-7}$ na rok provozu reaktoru, tedy poškození AZ jednou za více než 10 miliónů let provozu reaktoru. Tato hodnota je o dva řády nižší než cíl stanovený IAEA a dokonce o tři řády nižší než cíl stanovený NRC. Jedná se však o naprojektovanou hodnotu, která není napočítána na provozovaném reaktoru v konkrétních podmínkách jaderné lokality. Je nutné podotknout, že i při splnění pouze nejspodnější hranice $1,00 \cdot 10^{-5}$ vycházejí tyto SMR spolehlivěji z hlediska CDF než stávající bloky.

AP1000 má naprojektované CDF srovnatelné s těmi slibovanými u SMR. Vzhledem ke stáří projektu AP1000 a již postaveným reaktorům (Čína a USA) tohoto typu lze brát hodnotu CDF jako validní. I přes zlepšení hodnoty CDF o dva řády oproti stávajícím velkým blokům, AP1000 nenabízí takovou spolehlivost provozu jako uvažované SMR projekty. Opět je nutné zopakovat, že se u SMR jedná pouze o teoretické vypočítané hodnoty. APR1000 zaručuje hranici CDF stanovenou IAEA.

4.3.4.2 Hodnocení LRF

Vyhláška č. 359/2016 Sb., o podrobnostech k zajištění zvládnutí mimořádné události udává požadavky na stanovení zóny havarijního plánování. Jedním z těchto požadavků je vznik radiační havárie s frekvencí výskytu menší nebo rovnou hodnotě $1 \cdot 10^{-7}$ na rok. V případě UK SMR (LRF $1,00 \cdot 10^{-7}$ /reaktor rok) a AP1000 (LRF $1,00 \cdot 10^{-8}$ /reaktor rok) za splnění podmínky dosažení této hranice nevzniká touto vyhláškou povinnost stanovit zónu havarijního plánování.

Všechny designy předběžně splňují hranici LRF stanovenou NRC na $1,00 \cdot 10^{-6}$ na rok provozu reaktoru. Přesné hodnoty LRF pak budou ovlivněny lokalitou výstavby.

V dokumentech ETE a EDU je uvedena pouze hodnota parametru LERF, a proto není v tabulce LRF uvedena.

4.3.4.3 Hodnocení výkonu na plochu

U SMR byla celková plocha vzata z dokumentu IAEA Booklet 2022[1]. Pro stávající bloky byla celková plocha určena podle podkapitoly 4.2.1 a pomocí satelitních snímků spolu s dostupnými nástroji měření plochy integrovanými v mapách. Pro Dukovanský reaktor VVER

440/213 je počítáno s plochou 225000 m² a pro Temelínský reaktor VVER 1000/320 s plochou 615000 m². Výstavbová plocha pro budoucí blok EDU II byla odhadnuta stejným způsobem a to z plochy čínské elektrárny Sanmen, americké elektrárny Vogtle a parcely EDU II [35] na 650000 m².

Z hlediska tohoto parametru (tepelného i elektrického) vycházejí zdaleka nejpříhodněji SMR projekty. Otázkou je, jak moc se výstavbová plocha konkrétních projektů bude lišit oproti té naprojektované. I za předpokladu dvojnásobného nárůstu plochy vychází v tomto parametru SMR lépe, než velké bloky.

■ **Tabulka 4.1** Technické parametry vybraných reaktorů 1

Reaktor	CDF [/rok]	LRF [/rok]	$P_{t/S}$ [GWt/km ²]	$P_{e/S}$ [GWe/km ²]
VOYGR-12 ⁶	$\leq 1,00 \cdot 10^{-7}$	$\leq 1,00 \cdot 10^{-6}$	21,43	6,30
UK SMR ⁷	$\leq 1,00 \cdot 10^{-7}$	$\leq 1,00 \cdot 10^{-7}$	33,95	11,75
SMR-160 ⁸	$\leq 1,00 \cdot 10^{-7}$	$\leq 1,00 \cdot 10^{-6}$	18,75	5,71
VVER 440/213 ⁹	$1,08 \cdot 10^{-5}$	-	6,11	1,72
VVER 1000/320 ¹⁰	$2,32 \cdot 10^{-5}$	-	4,88	1,48
AP1000 ¹¹	$2,41 \cdot 10^{-7}$	$1,95 \cdot 10^{-8}$	5,23	1,71
APR1000 ¹²	$1,00 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$	4,33	1,54

4.3.4.4 Hodnocení účinnosti

Nejvyšší účinnosti ze SMR dosahuje UK SMR a nejnižší naopak VOYGR SMR. Rodíl mezi těmito dvěma designy činí přibližně 5 %.

Nízká účinnost VOYGR může být například důsledkem jeho nízkého výkonu, který úzce souvisí s rozměry vodních a parních potrubí. Zmenšením potrubí se zvyšuje poměr mezi plochou potrubí a objemem potrubí. Důsledkem se zvyšuje vliv třecích sil uvnitř potrubí na proudící médium a tím se snižuje účinnost. [46]

Nejlepší účinnosti dosahuje velký reaktor APR1000 35,52 %. Dukovanský reaktor VVER 440/213 dosahuje horší účinnosti o více než 6 % oproti UK SMR, který je ve stejné výkonové hladině. Nové projekty velkých reaktorů lepších účinností než SMR, pokud opomineme UK SMR, který je výkonnostní výjimkou z řad SMR viz tabulka 2.1.

4.3.4.5 Hodnocení poměru výkonu a množství paliva

Pro zjednodušení byla u všech reaktorů při výpočtu paliva uvažována pouze varianta palivové vsázky UO₂ - některé z projektů počítají až z 30 % zastoupení paliva MOX v palivové vsázce.

U SMR a velkých reaktorů uvažovaných při výstavbě EDU II byla hmotnost paliva aproximována podle podkapitoly 4.2.3. U stávajících velkých bloků VVER 440/213 a VVER 1000/320 je tato hodnota poskytována provozovatelem ČEZ.

Pro výpočty byla použita hustota palivové tablety UO₂ $\rho = 10,97 \text{ g/cm}^{-3}$. Vzhledem k přibližně stejnému stupni obohacení paliva bylo přijaté zjednodušení konstantní hustoty palivových tablet pro všechny reaktory.

⁶Hodnoty jsou čerpány z dokumentů [36], [1] a jsou vztaženy k 12 modulové variantě VOYGR-12.

⁷Hodnoty jsou čerpány z dokumentů [37] a [1]

⁸Hodnoty jsou čerpány z dokumentu [1] a hmotnost paliva byla odhadnuta na základě rozměrů AZ reaktoru.

⁹Hodnoty jsou čerpány z dokumentů [38] a [39]

¹⁰Hodnoty jsou čerpány z dokumentů [40] a [41]

¹¹Hodnoty jsou čerpány z dokumentů [42] a [43].

¹²Hodnoty jsou čerpány z dokumentů [44] a [45].

¹³Pro jeden NPM je hmotnost palivové vsázky 11,05 tun.

■ **Tabulka 4.2** Hmotnost palivové vsázky UO_2 vybraných projektů

Reaktor	m_f [t]
VOYGR-12	132,54 ¹³
UK SMR	50,64
SMR-160	26,03
VVER 440/213	42,00
VVER 1000/320	86,00
AP1000	87,62
APR1000	91,87

Z hlediska poměru výkonu a hmotnosti palivové vsázky dosahují nejméně příznivých výsledků reaktory s menšími výkony a to VOYGR a SMR-160. Nejpriznivěji vychází velký reaktor AP1000 s instalovaným tepelným výkonem 38,80 MWt na tunu palivové vsázky.

Z pohledu tepelného výkonu na tunu paliva vycházejí lépe všechny velké bloky. Pokud však srovnáme elektrické výkony na tunu palivové vsázky reaktorů UK SMR a stávajících VVER, tak dostaneme srovnatelné výsledky díky vysoké účinnosti UK SMR.

4.3.4.6 Hodnocení středního vyhoření paliva

Palivová kampaň je u uvedených reaktorů v rozsahu 18-24 měsíců. Z tabulky 4.3 vychází projektová hodnota středního vyhoření paliva UK SMR jako nejvyšší. Firma Rolls-Royce uvádí rozsah tohoto parametru v rozmezí 55-60 GWd/t, a tím dosahuje tento parametr vyšších hodnot než u velkých bloků. Z tabulky lze vypořadovat náznak korelace tohoto parametru s parametrem účinnosti.

U VOYGR SMR a SMR-160 je tento parametr srovnatelný se stávajícími velkými bloky v EDU a ETE. Ostatní designy cílí na dosažení nebo překročení hranice 50 GWd/t.

■ **Tabulka 4.3** Technické parametry vybraných reaktorů 2¹⁴

Reaktor	η [%]	$P_{t/m}$ [MWt/t]	$P_{e/m}$ [MWe/t]	BU [GWd/t]
VOYGR-12	29,40	22,65	6,66	45
UK SMR	34,61	26,82	9,28	55
SMR-160	30,48	20,17	6,15	45
VVER 440/213	28,22	32,74	9,24	42
VVER 1000/320	30,40	32,61	9,91	44,5
AP1000	32,65	38,80	12,67	50
APR1000	35,52	30,64	10,89	54,1

4.3.4.7 Technická konkurenceschopnost vybraných SMR

Na základě výsledků kvantitativního porovnání vybraných provozních a bezpečnostních parametrů lze konstatovat, že tyto SMR designy jsou z pohledu těchto parametrů technicky konkurenceschopné vůči již postaveným blokům v Dukovanech a Temelíně, ale také vůči uvažovaným blokům při výstavbě nového jaderného zdroje v lokalitě Dukovany.

Nejzajímavější poznatek vyplývá z hodnocení LRF, kde podle vyhlášky č. 359/2016 Sb. nevzniká u dvou designů povinnost na stanovení zóny havarijního plánování. To je zejména důležité při výběru lokalit pro výstavbu nového jaderného zdroje, které jsou v současné době klasifikovány jako nejaderné lokality. Zvýšená úroveň jaderné bezpečnosti umožňuje výstavbu SMR poblíž

¹⁴Zdroje dat jsou stejné jako v tabulce 4.1.

měst a nabízí se tedy možnost využití současných rozvodů centralizovaného zásobování teplem a umístění SMR blíže ke spotřebě energie.

Tlakovodní SMR z pohledu ekonomiky ČR

5.1 Produkty tlakovodních SMR

SMR mohou poskytnout více forem výstupní energie. Možnost kombinace těchto výstupů zajišťuje SMR flexibilitu, která může být důležitá při zvažování výstavby SMR pro shodu se specifiky dané výstavbové lokality. Například při nahrazování kogeneračních zdrojů, tedy zdrojů s kombinovanou výrobou elektrické energie a tepla, nahrazování uhelných elektráren a tepláren či při pouhé výstavbě nových jedno nebo víceúčelových zdrojů. Jejich víceúčelovost přispívá k jejich konkurenceschopnosti na trhu.

5.1.1 Elektrická energie

SMR je jako jaderný zdroj schopný stabilní dodávky elektrické energie. Stejně jako u velkých bloků je ekonomicky vhodné provozovat SMR s velkou dobou využití maxima, tedy poměrem elektrické energie za sledované období (zpravidla 1 rok) ku maximálnímu zatížení.

$$\tau_{max} = \frac{\int_0^T p(t) dt}{P_{max}} \quad [s] \quad (5.1)$$

Vzhledem ke stabilitě dodávky a vysokým fixním nákladům na výrobu elektrické energie se JE používají pro pokrytí základního zatížení denního diagramu zatížení a lze předpokládat, že u SMR tomu nebude jinak.

5.1.2 Tepelná energie

Teplo jako produkt SMR je lukrativní pro dva sektory a to dodávku tepla domácnostem a průmyslu. Při využívání tepelné energie nedochází k disipaci energie, která je spojená s transformací na jiné formy energie, avšak na rozdíl od elektrické energie je problém s jejím přenosem. Přeprava tepelné energie vyžaduje postavení teplovodů, ve kterých dochází ke ztrátám teplonosného média a mají vysoké nároky na údržbu. To znemožňuje přepravu tepla na větší vzdálenosti. Výstavba teplovodů je zároveň investičně velice náročná.[47]

Vzhledem k výkonu a velikosti SMR se zdají být ideálním zdrojem čisté energie ve formě tepla, při nahrazování stávajících výroben tepelné energie, kde jsou již teplovody postaveny. Při

současné kogeneraci tepelné a elektrické energie se přebytečné odběrové teplo může využít při výrobě elektrické energie, což přispívá k flexibilitě tohoto zdroje.

5.1.3 Vodík

Obecné požadavky na nový a inovativní energetický systém jsou dostupnost, ekonomický přínos, transportovatelnost a skladovatelnost, schopnost transformace energie do jiných forem a v neposlední řadě šetrnost k životnímu prostředí. Vodík jako alternativní nosič energie splňuje většinu z výše uvedených parametrů. Nejenže vodík lze skladovat, a tím akumulovat energii, ale zároveň ho lze využít v různých průmyslových odvětvích.[48]

V rámci barevného spektra vodíku se vodík vyrobený pomocí elektrolýzy, napájené energií z jaderné elektrárny, definuje jako růžový vodík. Tento typ vodíku není v současné době strategiemi EU výrazněji podporovaný, ale emise skleníkových plynů, spojené s jeho výrobou, jsou srovnatelné s emisemi zeleného vodíku (vyrobený pomocí OZE).[49]

Důsledkem provozních teplot páry PWR SMR je pro tyto typy reaktorů vhodná nízkoteplotní elektrolýza, která je omezená horní hranicí 150°C kvůli problémům s korozí (vysokoteplotní elektrolýza pracuje s teplotami 800-1000°C).[48]

Produkce vodíku může být atraktivní v momentě, kdy je na trhu malá poptávka po elektrické energii, či nadbytek v důsledku produkce elektrické energie intermitentními zdroji. Místo toho, aby se tyto intermitentní zdroje odstavovaly, či se snižoval výkon SMR, pouze se vyrobená energie akumuluje ve formě vodíku.

5.1.4 Podpůrné služby

Provozovatel přenosové soustavy ČR ČEPS k zajištění systémových služeb (SyS), neboli služeb zajišťujících provoz elektrizační soustavy, spolu s jejím synchronním propojením se sousedními elektrizačními soustavami, používá nástroj zvaný podpůrné služby (PpS). Poskytovatelem PpS může být takový účastník trhu s elektřinou, který splňuje podmínky stanovené v Kodexu Přenosové soustavy (PS) a má k dispozici vyhovující energetické zařízení.

Dle bodu 2.1 části II Kodexu PS se PpS dělí na:

- služby výkonové rovnováhy (SVR):
 - proces automatické regulace frekvence (FCP),
 - automaticky ovládaný proces obnovy frekvence a výkonové rovnováhy (aFRP),
 - ručně ovládaný proces obnovy frekvence a výkonové rovnováhy (mFRP),
 - proces náhrady záloh (RRP),
- a ostatní podpůrné služby:
 - sekundární regulace U/Q (SRUQ),
 - ostrovní provoz (OP),
 - start ze tmy (BS).

Poskytováním podpůrných služeb mohou SMR přispět ke stabilitě přenosové soustavy a jejímu ekonomickému provozu. Oproti velkým blokům nabízí například SMR-160 službu BS[1].

BS je v Kodexu PS definována jako schopnost bloku bez pomoci vnějšího zdroje napětí najet na jmenovité otáčky, dosáhnout jmenovitého napětí, připojení k síti a jejího napájení v ostrovním režimu. Tato služba je velice důležitá v případě, že dojde k částečnému či úplnému rozpadu sítě (blackout).

Oproti velkým blokům nabízí SMR stejné, či širší spektrum PpS doplněné například o výše zmíněný BS.

5.2 Zákon č. 367/2021 Sb.

K dekarbonizaci energetiky ČR chce stát přispět zákonem č. 367/2021 Sb., o opatřeních k přechodu České republiky k nízkouhlíkové energetice a o změně zákona č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie, ve znění pozdějších předpisů.

Účelem tohoto zákona je podle § 1 odst. 2

- v zájmu ochrany klimatu přispět k dekarbonizaci výroby elektřiny
- a zajistit energetickou bezpečnost České republiky prostřednictvím výroby elektřiny v nízkouhlíkových výrobnách na území České republiky a zvýšit podíl elektřiny z nízkouhlíkových výroben na hrubé konečné spotřebě energie v České republice při současném zohlednění zájmu zákazníků na minimalizaci dopadů opatření na ceny energií pro zákazníky v České republice.

Nízkouhlíkovou výrobnou (NUV) je výrobná elektrické energie připojená do elektrizační soustavy ČR po roce 2030, která disponuje jaderným reaktorem o minimálním výkonu 100 MWe.

Na základě tohoto zákona vzniká smlouva o výkupu, která je uzavřena mezi Českou republikou zastoupenou Ministerstvem průmyslu a obchodu (MPO) a oprávněným investorem¹ NUV. Účelem této smlouvy je podle § 3 odst. 2, písm. a) zajištění podpory příjmů oprávněného investora nízkouhlíkové výrobnou během provozní fáze nízkouhlíkové výrobnou s cílem dosáhnout návratnosti investic vynaložených tímto investorem.

Oprávněný investor má zároveň možnost zažádat o návratnou finanční výpomoc poskytnutou ze státního rozpočtu na výstavbu NUV s minimální úrokovou sazbou 2 %.

Tento zákon tedy podporuje přechod k nízkouhlíkové energetice pomocí podpory investic do jaderných zařízení, kterými mohou být i SMR. Přechodem na nízkouhlíkovou energetiku pomocí jaderných zařízení může energetika přispět k cílům stanoveným v Green Dealu mezi lety 2030 až 2050. Zákon však nezohledňuje víceúčelové SMR s kogenerací tepelné a elektrické energie a SMR zaměřené čistě na výrobu tepla, kde by u konkrétního projektu mohl instalovaný elektrický výkon klesnout pod 100 MW, a tím by zanikl nárok na finanční podporu tímto zákonem. Pro zvýšení potenciálu uplatnění SMR v energetice ČR by bylo vhodné aby tento zákon prošel úpravou a řešil také neelektrické aplikace SMR.

5.3 Plánované SMR projekty v ČR

Na 7. zasedání Uhelné komise v roce 2020 bylo schváleno doporučení vládě ČR na rok 2038 jako realistický rok útlumu využívání uhlí k výrobě elektrické a tepelné energie v ČR. Zároveň také doporučuje nahrazení výroby elektrické a tepelné energie z uhlí elektrárnami jadernými.[50]

Z hlediska výstavby SMR jsou atraktivní současné jaderné lokality (Temelín a Dukovany) a zároveň lokality, kde v současné době stojí uhelné elektrárny, tedy například Ledvice, Pruněřov, Poříčí, Dětmárovice a Tušimice. Jaderné lokality jsou lukrativní z pohledu vhodných vlastností pro umístění jaderného zdroje a již zajištěné legislativy (transformace nejaderné lokality na lokalitu jadernou může trvat 3-5 let[51]). První pilotní projekt SMR by měl začít dodávat elektrickou energii do sítě v roce 2032 a to v Temelíně, tedy ještě před spuštěním nového velkého jaderného bloku. Lokality s uhelnými elektrárnami disponují vyvedením výkonu a při jejich nahrazování SMR, kvůli přechodu na nízkouhlíkovou energetiku, lze tuto část elektrárny využít, čímž klesnou investiční výdaje. Skupina ČEZ označila lokality Dětmárovice a Tušimice jako dvě z přednostních lokalit při výstavbě 2. a 3. SMR.

¹Podle zákona č. 367/2021 Sb. je oprávněný investor osoba, která je držitelem státní autorizace na výstavbu výrobnou elektřiny v jaderném zařízení. Ministerstvo průmyslu a obchodu uvádí v Národním akčním plánu rozvoje jaderné energetiky v České republice preferovaného investora do jaderných zařízení společnost ČEZ a. s.

5.4 Ekonomické příležitosti

Podle dokumentu Národní akční plán rozvoje jaderné energetiky v České republice[52] (NAP JE) vydaném v roce 2015 má jaderný průmysl podíl přibližně 2 % na HDP a zaměstnává přibližně 15 tisíc osob. MPO zároveň odhaduje přibližně dvojnásobný nárůst podílu HDP oproti současnému stavu a nárůst zaměstnanosti při dalším rozvoji jaderné energetiky v souladu se Státní energetickou koncepcí (SEK). V roce 2021 měla Aliance českých technologických dodavatelů pro energetické zdroje obrát 64 miliard korun (Alianci ve stejném roce činí 13 společností o celkovém počtu 11820 zaměstnanců)[53]. Na území ČR působí řada dalších společností dodávajících služby pro jadernou energetiku, které však nejsou členy Aliance.

Budování SMR je z pohledu průmyslu důležité v oblasti udržování a budování výrobních kapacit a "know-how". Důležitá bude současně podpora inženýrských kapacit a motivace k zaměstnanosti v jaderném sektoru, včetně vzdělávání.

Participace českého průmyslu by mohla být významná v oblasti dodávek spojených s konvenčním ostrovem elektrárny, tedy v oblasti dodávek turbín, s nimi spojených systémů a generátorů, vedlejších technologických systémů a stavebních částí. V oblasti jaderného ostrova pak lze nabývat potřebné zkušenosti a know-how spojené s renovacemi a modernizací.[54]

5.4.1 Zdrojová přiměřenost elektrizační soustavy

V roce 2022 vydala společnost ČEPS dokument Hodnocení zdrojové přiměřenosti elektrizační soustavy ČR do roku 2040[55]. V tomto dokumentu jsou analyzovány čtyři scénáře, které analyzují zdrojovou přiměřenost elektrizační soustavy ČR do roku 2040 a to:

- respondentní,
- konzervativní,
- progresivní
- a dekarbonizační.

SMR mohou být velkým přínosem v rámci progresivního a dekarbonizačního scénáře. Progresivní scénář počítá s odklonem od uhlí do roku 2033 a dekarbonizační do roku 2030. Tyto scénáře reflektují vývoj spojený s dekarbonizací energetického průmyslu, ale zároveň i dalších průmyslových odvětví, které budou v důsledku dekarbonizačních cílů nastavených EU postupně elektrifikovány. Postupná elektrifikace průmyslových odvětví podporuje trend rostoucí roční spotřeby elektrické energie. V rámci progresivního scénáře z těchto předpokladů vyplývá, že v roce 2040 by mohlo být až 359 hodin nepokrytého zatížení² a 798 GWh nedodané energie. V případě dekarbonizačního scénáře to je 1085 hodin nepokrytého zatížení a 2676 GWh nedodané energie v roce 2040. Tyto hodnoty ukazují nedostatečnou zdrojovou základnu vzhledem k těmto scénářům. Oba scénáře přitom počítají jenom s výstavbou velkého bloku v Dukovanech, nikoliv výstavbou SMR. Je nutné také podotknout, že v roce 2021 se uhelné elektrárny podílely na výrobě tepla v celkovém podílu 46,6 %. Při odstavování těchto elektráren se ČR v dlouhodobém horizontu neobejde bez výstavby nových jaderných zdrojů, jak z pohledu tepelné tak elektrické energie.[55]

²Podle normy spolehlivosti ČR je limit nepokrytí zatížení 15 h/rok.[55]

Závěr

Tlakovodní SMR přináší oproti předchozím generacím reaktorů zvýšenou úroveň jaderné bezpečnosti, která přispívá k jejich potenciálnímu využití v energetice České republiky. Tlakovodní SMR mohou být lukrativní jak z pohledu dlouholetých zkušeností tuzemských techniků s tlakovodní technologií, tak z pohledu získání "know-how" při výstavbě a provozu reaktorů tohoto typu. SMR jsou v kontextu dnešní doby technicky konkurenceschopné a přinášejí inovace jako je například modularita, či pasivní koncept bezpečnostních systémů.

Hlavní potenciál SMR je v doplnění energetického mixu České republiky dodávkami stabilní energie, kterou lze přesunout blízko k místu spotřeby, a přispět tak k ekonomickému provozu elektrizační soustavy ČR. Důležité je vyzdvihnout víceúčelovost SMR z hlediska nabízených produktů. Tlakovodní SMR mohou dodávat do sítě stabilní elektrickou energii a zároveň dodávat energii ve formě tepla, či vodíku do měst či průmyslových odvětví a poskytovat podpůrné služby provozovateli přenosové soustavy.

SMR mohou zároveň hrát důležitou roli při přechodu energetiky ČR na bez-emisní energetiku podle cílů stanovených v rámci Green Dealu a z dlouhodobého hlediska mohou být řešením dekarbonizačního scénáře, který klade na elektrizační soustavu velký nátlak vzhledem k postupující elektrifikaci různých průmyslových odvětví.

Za předpokladu, že proběhne navržená úprava zákona č. 367/2021 Sb., o opatřeních k přechodu České republiky k nízkouhlíkové energetice, bude výstavba SMR podporována nejen ve formě elektrických výroben, ale i ve formě tepláren a vytopen, které mohou být postaveny v rámci vyřazování stávajících uhelných elektráren z provozu.

Práci je možné rozšířit analýzou ekonomických parametrů tlakovodních SMR a podrobnou analýzou dodavatelského řetězce České republiky. Přínosné může být také zpětné hodnocení provozních a bezpečnostních parametrů již v budoucnu postavených tlakovodních SMR na území České republiky a porovnání s naprojektovanými parametry.

Bibliografie

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments (2022). 2022. Dostupné také z: <https://aris.iaea.org/sites/Publications.html>.
2. J. BEČVÁŘ, kolektiv. *Jaderné elektrárny*. Praha: SNTL, 1977.
3. NUCLEAR ENERGY AGENCY. High-temperature Gas-cooled Reactors and Industrial Heat Applications. 2022. Dostupné také z: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_70442/high-temperature-gas-cooled-reactors-and-industrial-heat-applications.
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Liquid Metal Cooled Reactors: Experience in Design and Operation*. Vienna, 2008. TECDOC Series, č. 1569. ISBN 978-92-0-107907-7. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/publications/7609/liquid-metal-cooled-reactors-experience-in-design-and-operation>.
5. BERKELEY, UC. *Mk1 Pb-FHR Technology*. 2012. Dostupné také z: <https://fhr.nuc.berkeley.edu/pb-fhr-technology/>. [Online; accessed 10-April-2023].
6. SERP, Jérôme; ALLIBERT, Michel; BENEŠ, Ondřej; DELPECH, Sylvie; FEYNBERG, Olga; GHETTA, Véronique; HEUER, Daniel; HOLCOMB, David; IGNATIEV, Victor; KLOOSTERMAN, J. Leen; LUZZI, Lelio; E. MERLE-LUCOTTE; J. UHLÍŘ; YOSHIOKA, Ritsuo; ZHIMIN, Dai. The molten salt reactor (MSR) in generation IV: Overview and perspectives. *Progress in Nuclear Energy*. 2014, roč. 77, s. 308–319. ISSN 0149-1970. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.02.014>.
7. PEDRAZA, J.M. *Small Modular Reactors for Electricity Generation: An Economic and Technologically Sound Alternative*. Springer International Publishing, 2017. ISBN 9783319522-159. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=31YLMQAACAAJ>.
8. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Efficient Water Management in Water Cooled Reactors*. Vienna, 2012. Nuclear Energy Series, č. NP-T-2.6. ISBN 978-92-0-132610-2. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/publications/8883/efficient-water-management-in-water-cooled-reactors>.
9. WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *VVER — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2023. Dostupné také z: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=VVER&oldid=1131793912>. [Online; accessed 7-January-2023].
10. AHN, Kwanghyun; LEE, Kang-Heon; LEE, Jae-Seon; WON, Chanhee; YOON, Jonghun. Analytic springback prediction in cylindrical tube bending for helical tube steam generator. *Nuclear Engineering and Technology*. 2020, roč. 52. Dostupné z DOI: 10.1016/j.net.2020.02.004.

11. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Light Water Reactor Fuel Enrichment beyond the Five Per Cent Limit: Perspectives and Challenges*. Vienna, 2020. TECDOC Series, č. 1918. ISBN 978-92-0-110920-0. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/publications/14697/light-water-reactor-fuel-enrichment-beyond-the-five-per-cent-limit-perspectives-and-challenges>.
12. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Light Water Reactor Fuel Enrichment beyond the Five Per Cent Limit: Perspectives and Challenges*. Vienna, 2020. TECDOC Series, č. 1918. ISBN 978-92-0-110920-0. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/publications/14697/light-water-reactor-fuel-enrichment-beyond-the-five-per-cent-limit-perspectives-and-challenges>.
13. ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR pro rok 2021*. 2022. Dostupné také z: <https://www.eru.cz/rocní-zpráva-o-provozu-elektrizacni-soustavy-cr-pro-rok-2021>.
14. MIGNACCA, Benito; LOCATELLI, Giorgio; ALAASSAR, Mahmoud; INVERNIZZI, Diletta Colette. *We Never Built Small Modular Reactors (SMRs), but What Do We Know About Modularization in Construction?* Sv. Volume 1. 2018. International Conference on Nuclear Engineering. Dostupné z DOI: 10.1115/ICONE26-81604. V001T13A012.
15. LLOYD, Clara A.; ROULSTONE, Tony; LYONS, Robbie E. Transport, constructability, and economic advantages of SMR modularization. *Progress in Nuclear Energy*. 2021, roč. 134, s. 103672. ISSN 0149-1970. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103672>.
16. NUSCALE POWER LLC. *Voygr SMR plants: Nuscale Power*. 2022. Dostupné také z: <https://www.nuscalepower.com/en/products/voygr-smr-plants>. [Online; accessed 20-January-2023].
17. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants 75-INSAG-3 Rev. 1*. Vienna, 1999. INSAG Series, č. 12. ISBN 92-0-102699-4. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/publications/5811/basic-safety-principles-for-nuclear-power-plants-75-insag-3-rev-1>.
18. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Defence in Depth in Nuclear Safety*. Vienna, 1996. INSAG Series, č. 10. ISBN 92-0-102596-3. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/publications/4716/defence-in-depth-in-nuclear-safety>.
19. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Safety Related Terms for Advanced Nuclear Plants (Report of a Technical Committee Meeting, Vaesteras, Sweden, 30 May - 2 June 1988)*. Vienna, 1991. TECDOC Series, č. 626. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/publications/882/safety-related-terms-for-advanced-nuclear-plants-report-of-a-technical-committee-meeting-vaesteras-sweden-30-may-2-june-1988>.
20. ZELIANG, Chireuding; MI, Yi; TOKUHIRO, Akira; LU, Lixuan; REZVOI, Aleksey. Integral PWR-Type Small Modular Reactor Developmental Status, Design Characteristics and Passive Features: A Review. *Energies*. 2020, roč. 13, s. 2898. Dostupné z DOI: 10.3390/en13112898.
21. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants*. Vienna, 2009. TECDOC Series, č. 1624. ISBN 978-92-0-111309-2. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/publications/8192/passive-safety-systems-and-natural-circulation-in-water-cooled-nuclear-power-plants>.

22. SKOLIK, Katarzyna; ALLISON, Chris; HOHORST, Judith; MALICKI, Mateusz; PEREZ-FERRAGUT, Marina; PIENKOWSKI, Ludwik; TRIVEDI, Anuj. Analysis of loss of coolant accident without ECCS and DHRS in an integral pressurized water reactor using RELAP/SCDAPSIM. *Progress in Nuclear Energy*. 2021, roč. 134, s. 103648. ISSN 0149-1970. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103648>.
23. YADIGAROGLU, G.; BERKOVICH, V.; BIANCHI, A.; CHEN, B.; MESETH, J.; VECCHIARELLI, J.; VIDARD, M. *Advances in technologies for decay heat removal (IAEA-TECDOC-1117)*. 1999. Dostupné také z: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:31007033.
24. MOROZOV, Andrey; SOSHKINA, Alexandra. *Passive Core Cooling Systems for Next Generation NPPs: Characteristics and State of the Art*. Institute for Physics a Power Engineering by A.I. Leypunsky, 2008.
25. STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Pravděpodobnostní Hodnocení Bezpečnosti BN-JB-2.5(Rev. 1.0)*. 2018. Dostupné také z: <https://www.sujb.cz/dokumenty-a-publikace/navody-a-doporuceni>.
26. AGENCY, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY. *Probabilistic Safety Assessment*. Vienna, 1992. INSAG Series, č. 6. ISBN 92-0-102492-4. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/publications/3789/probabilistic-safety-assessment>.
27. ČEZ. *Zátěžové testy JE - ČEZ, a. s., Ocenění bezpečnosti a bezpečnostních rezerv JE Dukovany*. 2011. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/dukovany/zaverecna-zprava-zt-edu.pdf>.
28. ČEZ. *Zátěžové testy JE - ČEZ, a. s., Ocenění bezpečnosti a bezpečnostních rezerv JE Temelín*. 2011. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/temelin/zaverecna-zprava-zt-ete.pdf>.
29. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants*. Vienna, 2010. Specific Safety Guides, č. SSG-4. ISBN 978-92-0-102210-3. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/publications/8236/development-and-application-of-level-2-probabilistic-safety-assessment-for-nuclear-power-plants>.
30. U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Risk Metrics for Operating New Reactors, ML090910608*. 2009. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ML0909/>.
31. STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Národní zpráva - „Zátěžové zkoušky“ JE Dukovany a JE Temelín*. 2011. Dostupné také z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/aktualne/NarZprCZ.pdf>.
32. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Technical and Economic Limits to Fuel Burnup Extension*. Vienna, 2002. TECDOC Series, č. 1299. ISBN 92-0-112802-9. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/publications/6264/technical-and-economic-limits-to-fuel-burnup-extension>.
33. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *High Burnup Fuel: Implications and Operational Experience*. Vienna, 2016. TECDOC Series (CD-ROM), č. 1798. ISBN 978-92-0-155316-4. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/publications/10959/high-burnup-fuel-implications-and-operational-experience>.
34. STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Výběr a hodnocení projektových a nadprojektových událostí pro JE - Bezpečnostní návod JB-1.7*. 2010. Dostupné také z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/G2-EF-final_udalosti_a_rizika_PUBLIKACE.pdf.
35. ČEZ. *Územní řízení*. 2023. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobnizdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/nove-jaderne-zdroje/nove-dukovany/uzemni-rizeni>. [Online; accessed 23-May-2023].

36. U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Probabilistic Risk Assessment And Severe Accident Evaluation, ML20205L410*. 2020. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ML2020/>.
37. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Status Report – UK SMR (Rolls-Royce and Partners)*. 2019. Dostupné také z: https://aris.iaea.org/PDF/UK-SMR_2020.pdf.
38. STÁTNI ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *National Report under the Joint Convention on Safety in Spent Fuel Management and Safety in Radioactive Waste Management 2003 version 1.1*. 2003. Dostupné také z: <https://www.sujb.cz/en/reports>.
39. STÁTNI ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Národní zpráva České republiky - 2001, příloha č.1*. 2003. Dostupné také z: <https://www.sujb.cz/en/reports>.
40. SVĚT ENERGIE. *Jaderná elektrárna Temelín - Jaderné Elektrárny ČEZ - Energetika Zblízka - Svět energie.cz*. 2020. Dostupné také z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderne-elektrarny-cez/jaderna-elektrarna-temelin>.
41. ERNST, Daniel; MILISDOERFER, Lukas. *10 years of experience with Westinghouse fuel at NPP Temelin*. 2010. Dostupné také z: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:42016135.
42. U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *2.19 - Probabilistic Risk Assessment, AP1000 Design Control Document*. 2011. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1117/ML11171A500.html>.
43. U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *4.2 - Reactor, AP1000 Design Control Document*. 2011. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1117/ML11171A500.html>.
44. LEE, Hwan-Soo; CHOI, Yu Sun; BAE, Seong Man; YOO, Keun-Bae. *APR1000 Core Design with 30% MOX Fuel Loading*. 2011. Dostupné také z: https://www.kns.org/files/pre_paper/6/396%EC%9D%B4%ED%99%98%EC%88%98.pdf.
45. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Status Report 103 – Advanced Power Reactor (APR1000)*. 2011. Dostupné také z: <https://aris.iaea.org/PDF/APR1000.pdf>.
46. BEJAN, A.; LORENTE, S.; YILBAS, B.S.; SAHIN, A.Z. The effect of size on efficiency: Power plants and vascular designs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011, roč. 54, č. 7, s. 1475–1481. ISSN 0017-9310. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.11.045>.
47. CSIK, Bela J.; KUPITZ, Juergen. Nuclear power applications: Supplying heat for homes and industries. *IAEA Bulletin*. 1997, roč. 39-2.
48. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Hydrogen Production Using Nuclear Energy*. Vienna, 2013. Nuclear Energy Series, č. NP-T-4.2. ISBN 978-92-0-135110-4. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/publications/8855/hydrogen-production-using-nuclear-energy>.
49. ARCOS, Jose M. Marin; SANTOS, Diogo M. F. The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production. *Gases*. 2023, roč. 3, č. 1, s. 25–46. Dostupné z DOI: 10.3390/gases3010002.
50. MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU, odbor 41400. *Průběžné výstupy a doporučení Uhelné komise*. 2021. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/uhelna-komise/uhelna-komise--248771/>.

51. KRÍŽ, Ladislav. *ČEZ po předběžném posouzení vytipoval další dvě preferované lokality pro malé modulární reaktory, vedle pilotního Temelína by mohly vzniknout v Dětmovicích a Tušimicích*. 2023. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/cez-po-predbeznem-posouzeni-vytipoval-dalsi-dve-preferovane-lokality-pro-male-modularni-reaktory-vedle-pilotniho-temelina-by-mohly-vzniknout-v-detmarovicich-a-t-173388>.
52. MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU, odbor 32400. *Národní akční plán rozvoje jaderné energetiky v České republice*. 2015. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/elektroenergetika/jaderna-energetika/narodni-akcni-plan-rozvoje-jaderne-energeticky-v-ceske-republice--166679/>.
53. CZECH POWER INDUSTRY ALLIANCE. *Údaje za rok 2021*. 2022. Dostupné také z: <https://www.cpia.cz/>. [Online; accessed 23-May-2023].
54. MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU, odbor 91000. *Možnosti zapojení průmyslu ČR v připravovaných projektech nového jaderného zdroje v ČR a dalších zemích*. 2021. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/jaderna-energetika-a-nove-jaderne-zdroje/zapojeni-ceskeho-prumyslu/moznosti-zapojeni-prumyslu-cr-v-pripravovanych-projektech-noveho-jaderneho-zdroje-v-cr-a-dalsich-zemich--231986/>.
55. ČESKÁ ELEKTROENERGETICKÁ PŘENOSOVÁ SOUSTAVA. *Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040*. 2022. Dostupné také z: <https://www.ceps.cz/cs/zdrojova-primerenost>.