



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

MALÉ MODULÁRNÍ REAKTORY V PODMÍNKÁCH EU

SMALL MODULAR REACTORS IN EU CONDITIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Jurčík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Kracík, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Jakub Jurčík**
Studijní program: Energetika
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Petr Kracík, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Malé modulární reaktory v podmínkách EU

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné době existuje řada koncepcí malých modulárních reaktorů (MMR) v různých stádiích vývoje či dokonce certifikaci. Práce bude porovnávat a popisovat mezi sebou různé koncepce MMR oproti již běžně provozovaným „velkým“ jaderným blokům.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Přehled výroby elektřiny v rámci EU a potenciál výroby v jaderných elektrárnách.
- 2) Přehled základních koncepcí provozovaných jaderných elektráren.
- 3) Přehled základních koncepcí vyvíjených MMR.
- 4) Porovnat koncepce klasických jaderných elektráren a MMR s důrazem na potenciál jejich uplatnění.

Seznam doporučené literatury:

DUBŠEK, František. Základy teorie a stavby jaderných reaktorů. Brno: VUT, 1990. ISBN 80-214-0077-3.

LIBRA, Martin; MLYNÁŘ, Jan a POULEK, Vladislav. Jaderná energie. Praha: Ilsa, 2012. ISBN 978-80-904311-6-4.

RIZNIC, Jovica. Steam generators for nuclear power plants. Woodhead publishing in energy. Duxford: Woodhead Publishing, [2017]. ISBN 978-0-08-100894-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca je zameraná na malé modulárne reaktory a ich porovnanie s aktuálnymi veľkými reaktormi v prevádzke na základe vybraných vlastností. V prvej časti je opísaná aktuálna energetická situácia EÚ a roľa jadrovej energetiky. Následne sa zaoberá popisom vybraných koncepcií veľkých reaktorov a malých modulárnych reaktorov. Zistené vlastnosti v poslednej časti porovná. Práca je zameraná na technické a ekologické aspekty jednotlivých reaktorov. Výsledky práce ukazujú významné pokroky jadrovej technológie, najmä v oblasti pasívnej bezpečnosti, primárnom chladiacom okruhu reaktoru, a flexibilitu využitia malých modulárnych reaktorov v energetickom sektore EÚ.

Kľúčové slová

Energetická situácia, jadrová energetika, jadrové reaktory, malé modulárne reaktory

ABSTRACT

This bachelor's thesis is focused on small modular reactors and their comparison with current large reactors in operation, based on selected characteristics. Current energy situation and the role of nuclear power are described in the first section. It then discusses the description of selected concepts of large reactors and small modular reactors. It compares the found characteristics in the last section. The thesis focuses on the technical and ecological aspects of each reactor. The results of the thesis show significant advances in nuclear technology, particularly in the field of passive safety, the primary reactor cooling circuit, and the flexibility of the use of small modular reactors in the EU power sector.

Key words

Energy situation, nuclear energy, nuclear reactors, small modular reactors

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

JURČÍK, Jakub. *Malé modulární reaktory v podmínkách EU* [online]. Brno, 2024 [cit. 2023-11-18]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157200>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Petr Kracík.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som *bakalársku* prácu na téma **Malé modulární reaktory v podmínkách EÚ** vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

Dátum

Jakub Jurčík

POĎAKOVANIE

Chcel by som poďakovať vedúcemu práce Ing. Petrovi Kracíkovi, PhD. za jeho cenné rady pri vypracovávaní tejto záverečnej práce a svojej rodine a priateľom, ktorí ma neustále podporovali a inšpirovali počas štúdia.

OBSAH

1	Energetická situácia v Európskej únii	11
1.1	Produkcia elektrickej energie	11
1.2	Inštalovaný výkon.....	13
2	Jadrové reaktory	15
2.1	Jadrové reaktory PWR	16
2.2	Jadrové reaktory BWR.....	24
2.3	Jadrové reaktory PHWR	29
3	Malé modulárne reaktory.....	33
3.1	Pozemné vodou chladené MMR typu PWR	34
3.2	Pozemné vodou chladené MMR typu BWR	37
4	Porovnanie MMR s veľkými reaktormi	42
4.1	Palivo a AZ.....	42
4.2	Tlaková nádoba reaktoru.....	43
4.3	Primárny okruh.....	44
4.4	Kontajment a aktívna/pasívna bezpečnosť	45
4.5	Využitie	46
	Záver	47
	Zoznam použitých zdrojov.....	48
	Zoznam použitých skratiek	51

Úvod

Svet sa momentálne nachádza v náročnej situácii v oblasti klímy a energetiky. Neustále sa zvyšujúci dopyt po elektrine a zvyšujúca sa globálna teplota donútila štáty Európskej Únie (EÚ) podniknúť razantné rozhodnutia na zníženie emisií prechodom na nízkoemisné zdroje energie. Tento ambiciózný plán nesie názov Zelená dohoda, ktorá hovorí o kompletnom prechode na nízkoemisné zdroje energie do roku 2050. Táto dohoda zahŕňa široké spektrum opatrení a inovácií, ktoré majú za cieľ zlepšiť kvalitu životného prostredia, znížiť závislosť na fosílnych palivách a zvýšiť energetickú bezpečnosť.

Jeden z aktuálnych rozšírených nízkoemisných zdrojov je jadrová energia, ktorá má v EÚ bohaté zastúpenie. Jadrová energia poskytuje stabilný a spoľahlivý zdroj elektriny s minimálnymi emisiami skleníkových plynov, avšak výstavba nových veľkých jadrových blokov je v súčasnosti drahá a časovo náročná, čo predstavuje značné výzvy pre jej ďalší rozvoj. Tento problém by v budúcnosti mohol vyriešiť nový koncept jadrových reaktorov, a to malé modulárne reaktory, ktoré svojím menším výkonom, modulárnou konštrukciou a zvýšenou bezpečnosťou predstavujú potenciálne využitie v rôznych odvetviach energetiky.

Cieľom tejto práce je v prvej časti popísať aktuálnu energetickú situáciu EÚ v oblasti výroby elektriny a potenciál jadrovej energie v dosiahnutí cieľov Zelenej dohody. V druhej časti vybrať a technicky popísať vybrané koncepcie prevádzkovaných jadrových reaktorov v EÚ. Následne v tretej časti technicky popísať konkrétne dizajnované malé modulárne reaktory a nakoniec v poslednej časti tieto koncepcie navzájom porovnať na základe vybraných charakteristík s dôrazom na potenciál využívania malých modulárnych reaktorov v EÚ a ich prínos k dosiahnutiu udržateľnej energetickej budúcnosti.

1 Energetická situácia v Európskej únii

Rok 2023 bol významným pre EÚ z pohľadu produkcie elektriny a emisií. EÚ dosiahla v roku 2023 dôležitý míľnik, keď po prvýkrát vyrobila viac elektrickej energie z vetra ako z plynu. Rekordný pokles uhlia, plynu a emisií oxidu uhličitého (ďalej CO₂) v roku 2023 spôsobil, že EÚ má čistejší elektrický mix ako kedykoľvek predtým, keďže obnoviteľné zdroje energie urobili veľký pokrok. Prechod EÚ na elektrickú energiu je v plnom prúde.[1];[2]

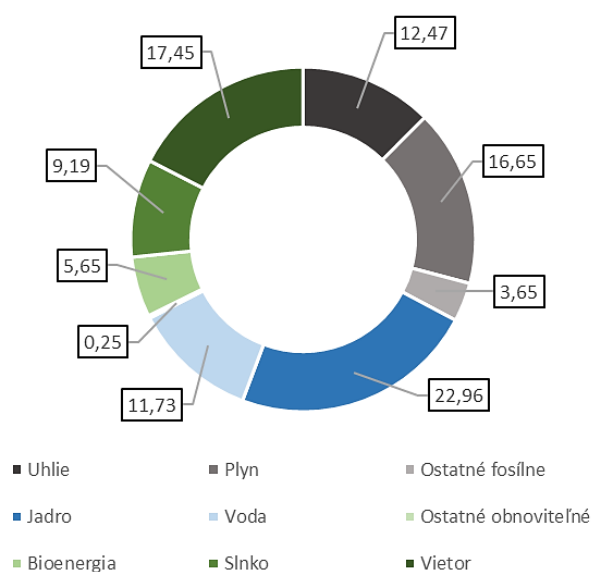
Na obmedzenie nárastu globálnej teploty na 1,5 °C musí EÚ do roku 2030 postupne ukončiť využívanie uhlia a do roku 2035 úplne dekarbonizovať svoj sektor elektrickej energie. Niektoré krajiny už vyrábajú väčšinu svojej elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov, ako napríklad Dánsko (88 %) a Portugalsko (74 %). Iné, ako napríklad Španielsko a Holandsko, plánujú v tomto desaťročí zásadnú transformáciu a v posledných rokoch zaznamenali mimoriadny nárast veternej a solárnej energie.[1]

1.1 Produkcia elektrickej energie

V roku 2023 bolo v EÚ vyrobených približne 2694,42 TWh elektrickej energie. Z tab. 1 možno pozorovať, že z čistých zdrojov energie (obnoviteľné zdroje+ jadrové zdroje) svoju produkciu v porovnaní s rokom 2022 zvýšili takmer všetky, okrem bioenergie (ročný pokles o 7,71 %) a ostatných obnoviteľných zdrojov (ročný pokles o 2,74 %). Najvýznamnejší nárast zaznamenali veterné elektrárne (50,27 TWh/ ročný nárast o 11,97 %) a vodné elektrárne (39,85 TWh/ ročný nárast o 14,43 %), ktorých produkcia v roku 2022 bola z veľkej časti ovplyvnená obrovskými suchami naprieč celou Európou a viedli k najnižšej produkcii z vodných elektrární za posledných 20 rokov. Celkový podiel produkcie z obnoviteľných zdrojov v konečnom dôsledku vzrástol až na rekordných 44,27 % a prvýkrát prekročil hranicu 40 %.[2];[3]

Fosílna palivá zaznamenali naopak výrazný pokles produkcie v porovnaní s rokom 2022. Ročný pokles produkcie z uhlia bol až 112,81 TWh (25,13 %) a plynu 86,22 TWh (16,12 %). Oba poklesy sú najväčšie v EÚ od roku 2000. Nižšia produkcia elektriny z fosílnych palív znamenala aj pokles emisií v energetickom sektore o rekordných 19 %. Celkový podiel produkcie z fosílnych palív predstavoval v roku 2023 približne 32,77 %.[2]

Zvyšných 22,96 % elektriny bolo vyrobených v jadrových elektrárnach, ktoré vyrobili o 9,32 TWh (ročný nárast o 1,53 %) viac ako v roku 2022. Výsledný elektrický mix EÚ podľa jednotlivých zdrojov a ich podiely na výrobe v roku 2023 sú zobrazené na obr. 1.

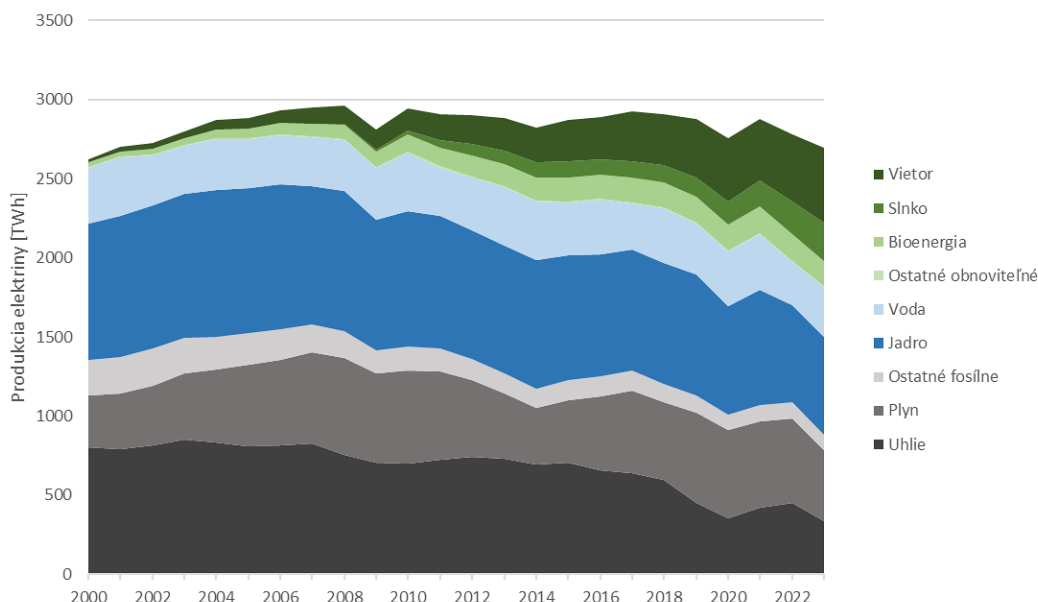


Obr. 1 Elektrický mix EÚ za rok 2023 [1]

Tab. 1: Produkcia elektrickej energie v rokoch 2022 a 2023 podľa zdrojov [1]

Zdroj	Produkcia 2022 [TWh]	Produkcia 2023 [TWh]	rozdiel [TWh]
Vietor	419,95	470,22	50,27
Slnko	210,75	247,49	36,74
Voda	276,14	315,99	39,85
Bioenergia	165,06	152,33	-12,73
Jadro	609,26	618,58	9,32
Ostatné obnoviteľné	6,93	6,74	-0,19
Čistá energia spolu	1688,09	1811,55	123,46
Uhlie	448,78	335,97	-112,81
Plyn	534,72	448,5	-86,22
Ostatné fosílné	105,66	98,4	-7,26
Fosílna energia spolu	1089,16	882,87	-206,29

Vývoj produkcie elektriny od roku 2000 je zobrazený podľa TWh na obr. 2 a podľa percentuálnych podielov na obr. 3.



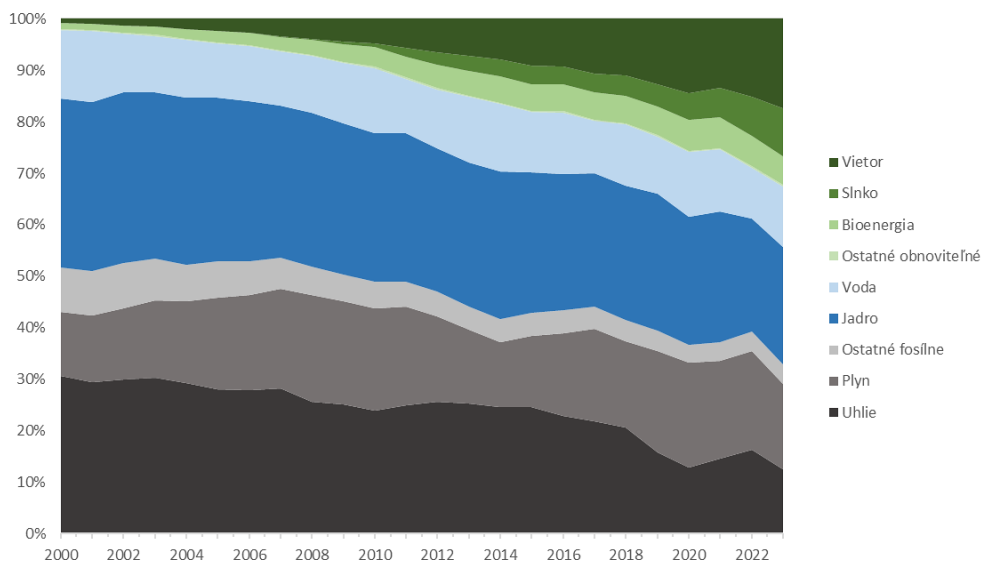
Obr. 2 Vývoj produkcie elektriny v EÚ od roku 2000. Prevzaté z [1] a upravené

Závislosť EÚ od fosílnych palív pri výrobe elektrickej energie sa od roku 2000, keď viac ako polovica (52 %) elektrickej energie v EÚ pochádzala z uhlia, plynu a iných fosílnych zdrojov, výrazne znížila. K veľkému poklesu došlo od roku 2009, keď sa začal zvyšovať podiel veternej a solárnej energie.[2]

Produkcia veternej a solárnej energie vzrástla od roku 2009 do roku 2023 päťnásobne, a to zo 139 TWh na necelých 718 TWh. Ich spoločný podiel na energetickom mixe EÚ sa v tom istom období zvýšil z 5 % na viac ako štvrtinu. K tomuto rýchlemu rastu došlo, keďže niektoré krajiny EÚ, ako napríklad Nemecko, sa začiatkom roka 2010 stali prvými krajinami, ktoré začali vo veľkom rozsahu využívať veternú a solárnu energiu.[2]

Produkcia z ďalších čistých zdrojov za posledné dve desaťročia mierne klesla. Výroba jadrovej energie klesla o 22 %, z 860 TWh v roku 2000 na približne 619 TWh v roku 2023. Veľkou časťou sa na tomto podieľalo Nemecko, ktoré z pôvodných 17 prevádzkovaných reaktorov v roku 2011 odstavilo osem, jeden v rokoch 2015, 2017, 2019 a tri v rokoch 2021

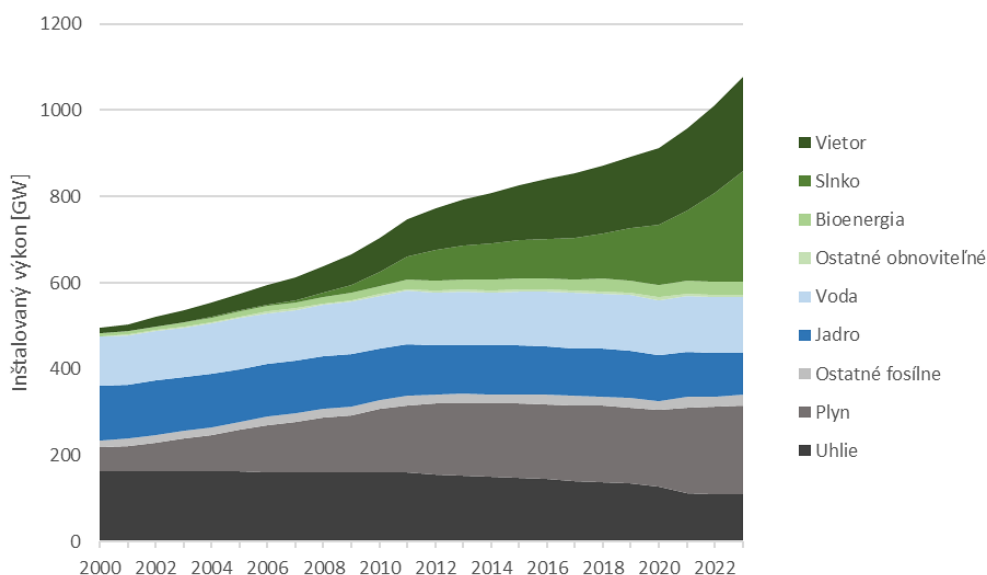
a 2023. Výroba z vodných zdrojov klesla o 21 % (z 350 TWh v roku 2000 na 316 TWh v roku 2023).[2];[4]



Obr. 3 Vývoj percentuálnych podielov zdrojov elektriny od roku 2000. Prevzaté z [1] a upravené

1.2 Inštalovaný výkon

Od roku 2000 narástol inštalovaný výkon v EÚ už na viac ako dvojnásobok, čo možno pozorovať na obr. 4. V roku 2023 činil inštalovaný výkon v EÚ hodnotu takmer 1078 GW. Najväčší podiel na inštalovanom výkone mali za rok 2023 solárne elektrárne a to až 23,8 %, čo možno pozorovať z tab. 2, ktoré navýšili kapacitu oproti roku 2022 o viac ako 50 GW. O najväčšie navýšenie sa postaralo Nemecko so 14 GW. Druhý najvyšší inštalovaný výkon majú veterné elektrárne (20,29 %), ktorým sa kapacita navýšila o 15 GW od roku 2022. Jediný významnejší pokles v inštalovanom výkone zaznamenali vodné a jadrové elektrárne o 3,61 GW (Nemecké odstavenie posledných troch reaktorov spôsobilo pokles o 4,05 GW, ale pripojenie Mochoviec k sieti túto stratu zmenšilo o 0,44 GW).[1];[4]



Obr. 4 Vývoj inštalovaného výkonu v EÚ od roku 2000. Prevzaté z [1] a upravené

Tab. 2: Porovnanie podielov inštalovaného výkonu a produkcie elektriny za rok 2023 [1]

Zdroj	Inštalovaný výkon [GW]	Podiel [%]	Produkcia [TWh]	Podiel [%]
Vietor	218,68	20,29	470,22	17,45
Slnko	256,55	23,80	247,49	9,19
Voda	129,68	12,03	315,99	11,73
Bioenergia	30,48	2,83	152,33	5,65
Jadro	96,48	8,95	618,58	22,96
Ostatné obnoviteľné	5,11	0,47	6,74	0,25
Čistá energia spolu	737,11	68,39	1811,55	67,23
Uhlie	111,08	10,31	335,97	12,47
Plyn	205,37	19,05	448,5	16,65
Ostatné fosílné	24,28	2,25	98,4	3,65
Fosílna energia spolu	340,73	31,61	882,87	32,77

V tab. 2 možno pozorovať aj fakt, že napriek relatívne nízkemu inštalovanému výkonu jadrových elektrární v porovnaní s ostatnými zdrojmi, majú najvyššiu produkciu elektriny za rok 2023. To je spôsobené koeficientom využitia inštalovaného výkonu. „Koeficient využitia inštalovaného výkonu je pomer skutočne vyrobenej elektrickej energie k množstvu elektrickej energie, ktorú by blok vyrobil pri prevádzke s inštalovaným elektrickým výkonom.“ [5] Jadrové elektrárne v tomto smere dominujú a zo všetkých zdrojov majú tento koeficient najvyšší a to viac ako 85 %. V Českej republike sa tento koeficient predpokladá s hodnotou len 30 % u veterných elektrární a 11 % u fotovoltaiických. Vysoký koeficient využitia vysokého inštalovaného výkonu predstavuje pre jadrové elektrárne najväčší potenciál na budovanie nových zdrojov na dosiahnutie cieľov Zelenej Dohody.[6] Nasledujúca kapitola popisuje bližšie jadrovú technológiu vo svete a EÚ.

2 Jadrové reaktory

Z energetického hľadiska je jadrový reaktor generátorom tepla, ktoré sa uvoľňuje pri riadenej, samostatne sa udržiajúcej reťazovej štiepnej alebo termojadrovej reakcii. Môžeme ich triediť podľa mnohých hľadísk. Najdôležitejším z nich je spôsob použitia. Táto kapitola je zameraná na v súčasnosti prevádzkované stacionárne energetické reaktory, ktoré slúžia pre výrobu energie vo veľkom množstve na danom mieste. Produkovaná tepelná energia je ďalej priamo využívaná alebo sa transformuje na elektrickú energiu.[7]

V súčasnej dobe je na svete v prevádzke 440 energetických reaktorov 6 základných koncepcií vypísaných v tab. 3, ktoré sa medzi sebou líšia v napr. konštrukčnom usporiadaní reaktoru, koncepčnom usporiadaní chladiacich okruhov, použitom palive, chladive a moderátore. Z celkového počtu majú najväčšie zastúpenie tlakovodné reaktory (70,68 %) s varnými reaktormi (13,63 %) a najmenšie vysokoteplotné chladené plynom (0,23 %) s rýchlymi neutrónovými reaktormi (0,45 %). V krajinách EÚ sú v prevádzke len koncepcie PWR, BWR a PHWR. Ďalšie podkapitoly budú zamerané len na tie.

Všetky koncepcie reaktorov sú z generácie II, III a III+. Zároveň je v súčasnosti vyvíjaných aj 6 nových revolučných koncepcií reaktorov z Generácie IV a to plynom chladený rýchly reaktor (GFR), olovom chladený rýchly reaktor (LFR), reaktor založený na roztavených soliach (MSR), nadkritický vodou chladený reaktor (SCWR), sodíkom chladený rýchly reaktor (SFR) a vysokoteplotný reaktor (VHTR).[8]

Tab. 3: Rozdelenie energetických reaktorov v prevádzke (Máj 2024)[9];[10]

typ reaktoru	hlavné krajiny	počet	palivo	chladiivo	moderátor
tlakovodný (PWR)	USA, Francúzsko, Japonsko, Rusko, Čína, Južná Kórea	311	obohatený UO ₂	voda	voda
varný (BWR)	USA, Japonsko, Švédsko	60	obohatený UO ₂	voda	voda
ťažkovodný (PHWR)	Kanada, India	48	prírodný UO ₂	ťažká voda	ťažká voda
ľahkovodný grafitový (LWGR)	Rusko	10	obohatený UO ₂	voda	grafit
pokročilý plynom chladený (AGR)	Veľká Británia	8	obohatený UO ₂	CO ₂	grafit
rýchly neutrónový (FNR)	Rusko	2	PuO ₂ a UO ₂	tekutý sodík	žiadny
vysokoteplotný plynom chladený (HTGR)	Čína	1	obohatený UO ₂	hélium	grafit
spolu		440			

Tab. 4 a tab. 5 zobrazujú aktuálny prehľad reaktorov v prevádzke, vo výstavbe a plánované s navrhovanými reaktormi. V Európe sa aktuálne nachádza 161 reaktorov v prevádzke, čo predstavuje takmer 37 % zo svetového počtu. Z krajín EÚ má najväčší podiel Francúzsko (56), ktoré sa zároveň v svetovom rebríčku radí na druhé miesto za USA s 94 reaktormi a pred Čínu s 55. Rusko so svojimi 31 reaktormi v Európe a 5 v Ázii má najviac reaktorov krajín mimo EÚ.[10];[11]

Výstavba reaktorov sa momentálne koná len v 2 krajinách EÚ a to vo Francúzsku a na Slovensku. Z krajín mimo EÚ buduje najviac Rusko a Turecko, ktoré stavia svoje prvé 4 reaktorové bloky.

Plánované reaktory sú tie, ktoré majú už povolenia na výstavbu spolu s finančnými prostriedkami a záväzkami, ale samotnú výstavbu ešte nezačali. Ich očakávaný čas uvedenia

do prevádzky je 15 rokov.[12] V EÚ má najviac naplánovaných reaktorov Poľsko a mimo EÚ Rusko.

Navrhované reaktory nemajú ešte povolenia na výstavbu, len špecifické programy a návrhy lokalít. Ich načasovanie je veľmi neisté.[12] Rovnako ako pri plánovaných reaktoroch majú najväčšie zastúpenie Poľsko za krajiny EÚ a Rusko za krajiny mimo EÚ.

Tab. 4: Prehľad stavu jadrovej energie krajín EÚ (Máj 2024)[12]

krajina	reaktory v prevádzke		reaktory vo výstavbe		plánované reaktory		navrhované reaktory	
	počet	MW _e netto	počet	MW _e brutto	počet	MW _e brutto	počet	MW _e brutto
Belgicko	5	3916	0	0	0	0	0	0
Bulharsko	2	2006	0	0	2	2300	0	0
Česko	6	4212	0	0	1	1200	3	3600
Fínsko	5	4369	0	0	0	0	0	0
Francúzsko	56	61370	1	1650	0	0	6	9900
Holandsko	1	482	0	0	0	0	2	2000
Maďarsko	4	1916	0	0	2	2400	0	0
Poľsko	0	0	0	0	3	3750	26	10000
Rumunsko	2	1300	0	0	2	1440	6	462
Slovensko	5	2308	1	471	0	0	1	1200
Slovinsko	1	688	0	0	0	0	1	1200
Španielsko	7	7123	0	0	0	0	0	0
Švédsko	6	6944	0	0	2	2500	0	0
Spolu	100	96634	2	2121	12	13590	45	28362

Tab. 5: Prehľad stavu jadrovej energie krajín mimo EÚ (Máj 2024) [12]

krajina	reaktory v prevádzke		reaktory vo výstavbe		plánované reaktory		navrhované reaktory	
	počet	MW _e netto	počet	MW _e brutto	počet	MW _e brutto	počet	MW _e brutto
Bielorusko	2	2200	0	0	0	0	0	0
Rusko	36	26802	4	3988	14	8930	36	37716
Spojené Kráľovstvo	9	5883	2	3440	2	3340	2	2300
Švajčiarsko	4	2973	0	0	0	0	0	0
Turecko	0	0	4	4800	0	0	8	9600
Ukrajina	15	13107	2	1900	2	2500	7	8750
Spolu	66	50965	12	14128	18	14770	53	58366

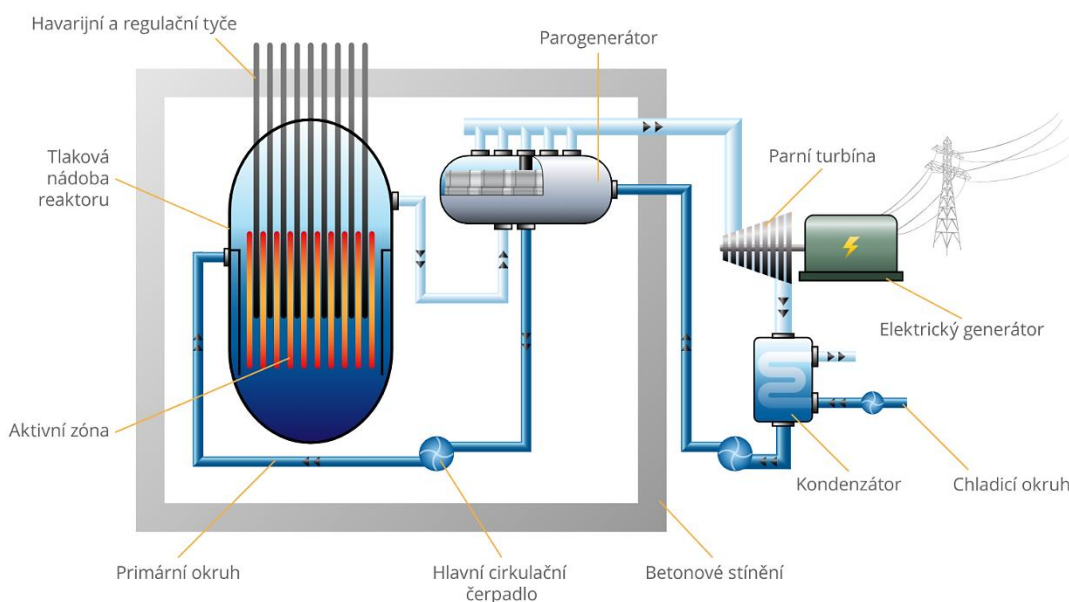
2.1 Jadrové reaktory PWR

Tlakovodný reaktor PWR (Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor) je najrozšírenejší typ reaktoru na svete. Rovnako ako pri varných reaktoroch (BWR) používa ľahkú demineralizovanú vodu ako chladiivo a moderátor, ale na rozdiel od BWR je chladiivo v PWR systéme udržiavané pod vyšším tlakom aby sa nedostalo do varu. Druhý rozdiel je, že voda v primárnom okruhu nepoháňa turbínu, ale nesie so sebou prijaté teplo z reaktoru

do parogenerátoru, kde ho odovzdáva vode v sekundárnom okruhu, ktorá potom v tomto tepelnom výmenníku vri a vzniknutá para poháňa turbínu.[13];[14] Toto usporiadanie je zobrazené na obr. 5.

Aktívna zóna (ďalej AZ) PWR je zaplnená vodou a natlakovaná na hodnotu až 150 atmosfér, umožňujúc tak vode dosiahnuť teplotu približne 325 °C bez toho, aby nastal var. Typický PWR má inštalovaný výkon 1000 MW s účinnosťou približne 33 %.[14]

PWR používa mierne obohatený urán ako palivo vo forme valčekov oxidu uraníčitého (ďalej UO_2), ktorý má ale o niečo vyššiu hodnotu obohatenia ako pri BWR. To spôsobuje väčšiu hustotu energie v AZ reaktoru. Typický PWR obsahuje 100 ton uránu. Rovnako ako pri BWR, výmena paliva prebieha pri odstavenom reaktore spravidla raz za 1 až 1 a pol roku počas ktorej sa nahradí jedna štvrtina vyhorených článkov.[13];[14] Na popis základných charakteristík sú vybrané 2 dizajny reaktorov: západný EPR a východný VVER 1000.



Obr. 5 Schéma elektrárne s PWR [13]

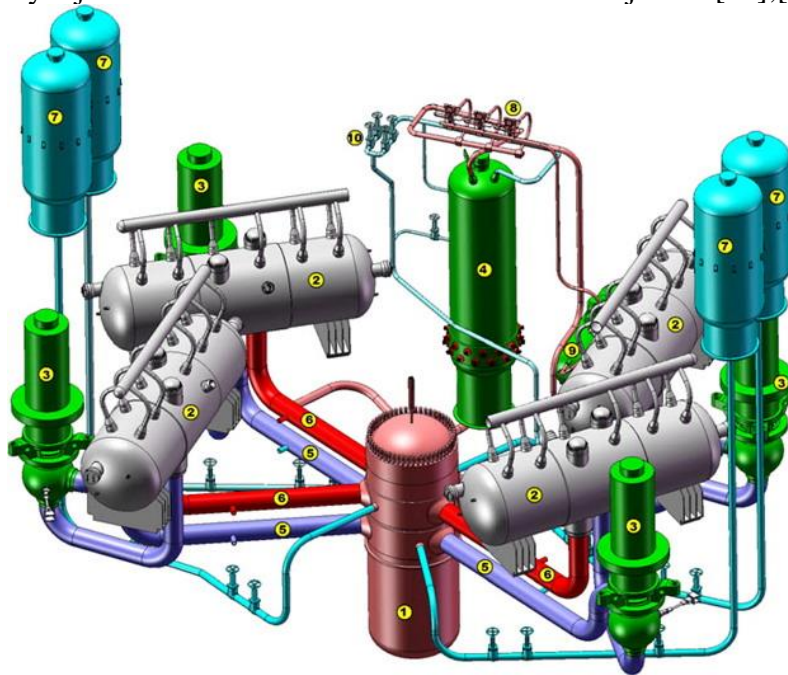
VVER sú tlakovodné reaktory chladené a moderované ľahkou vodou pochádzajúce z Ruska (Vodo-Vodanoi Energetichesky Reaktor). Princíp funkcie reaktoru je rovnaký ako pri ostatných PWR, avšak v samotnom dizajne sa výrazne líšia. Charakteristické rozdiely sú napríklad šesťuholníkový tvar palivových kaziet s trojuholníkovým usporiadaním palivových tyčí v kazete; šesťhranné umiestnenie riadiacich tyčí v AZ reaktoru; všetky veľké komponenty vrátane tlakovej nádoby reaktora sú relatívne úzke; vstupné a výstupné otvory reaktoru sa nachádzajú v rozdielnych výškach; nádoba reaktora je vyrobená z vysokopevnostnej nízkolegovanej uhlíkovej oceli odolnej voči veľkému neutrónovému toku a pohony regulačných tyčí spolu so snímačmi teploty a riadenia výkonu sú namontované v odnímateľnom hornom veku reaktoru. Prvá štandardná séria VVER má nominálnu elektrickú kapacitu 440 MW a druhá 1000 MW. Existujú dva základné typy VVER-440 reaktorov, ktoré sú založené na rozdielnych bezpečnostných filozofiách. Typ VVER-440/230 pochádza z prvej generácie dizajnu, ale VVER-440/213 už reprezentuje druhú generáciu dizajnu reaktorov so zníženým tlakovým kontajntmentom. V súčasnej dobe už nie sú v prevádzke žiadne elektrárne s VVER-440/230 mimo Rusko.[15];[16]

Paralelne s vývojom najnovších dizajnov VVER 440 bol v Gidropresse vyvinutý väčší a výkonnejší VVER reaktor. Tepelný výkon bol zvýšený na 3000 MW, počet slučiek

primárneho okruhu s priemerom 850 mm sa zmenšil zo 6 na 4, teplota chladiva na výstupe z reaktoru sa zvýšila na 320 °C, tlak primárneho okruhu sa zvýšil na 15,7 MPa a sekundárneho na 6,27 MPa. Vyvinutých bolo viacero verzií VVER 1000, ktoré sa líšili v počte a dizajne regulačných a palivových kaziet a seizmickej stabilite chladiacich systémov reaktoru. Hlavné izolačné ventily boli použité len v prvej variante V-187 a podobne aj šesťhranný plášť palivových kaziet, ktoré boli vo VVER 440 a V-187 bol v ďalších variantoch odstránený. Systém regulačných kaziet z VVER 440 tiež prešiel zmenou, ktorá sa podobá ostatným PWR dizajnom.[15]

Tlaková nádoba reaktoru navrhovaná na tlak 17,6 MPa je vyrobená z valcovitých výkovekov feritickej oceli. Nádoba má na výšku 10,9 m, vnútorný priemer 4,15 m a 19,25 cm hrúbku stien vo valcovitých častiach. V hornej časti sa nachádza 8 vstupných a výstupných dýz pre chladivo s priemerom 850 mm. Hmotnosť celého reaktoru je 320 t.[15];[17]

AZ reaktoru pozostáva zo 163 palivových súborov a 61 regulačných súborov. V každom palivovom súbore sa nachádza 312 palivových tyčí, to znamená, že celkovo ich je v AZ 50856. Aktívna dĺžka palivových tyčí je 3,53 m v studených podmienkach. Plášť palivových tyčí je vyrobený zo zliatiny zirkónia s vonkajším priemerom 9,1 mm. Palivové pelety zo spekaného UO_2 (obohatenie ^{235}U približne 1,6 - 3,6 %) majú vonkajší priemer 7,72 mm a podobne ako u paliva VVER 440, dieru v strede s priemerom 1,4 mm. Palivové tyče sú potom usporiadané v súbore v trojuholníkovom rozstupe. Každý regulačný súbor obsahuje zhuk 18 regulačných tyčí pohybujúcich sa vo vodiacich trubkách z nerezovej oceli.[15];[18]

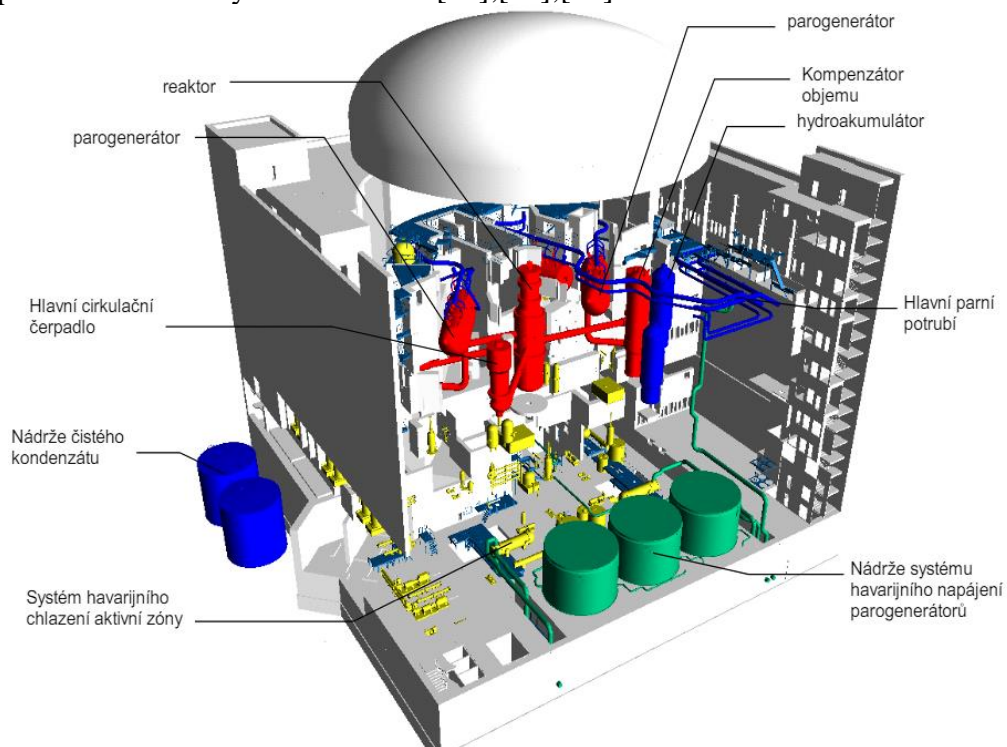


Obr. 6 Rozloženie primárneho okruhu reaktoru VVER 1000/320 [18]

(1 – reaktor, 2 – parogenerátory, 3 – hlavné cirkulačné čerpadlá, 4 – kompenzátor objemu, 5 - studené vetvy, 6 – horúce vetvy, 7 – hydroakumulátory, 8 – ventil pulzného bezpečnostného zariadenia, 9 – odľahčovacia nádrž, 10 – vstrekovací systém)

Primárny okruh VVER 1000/320, zobrazený na obr. 6, sa skladá z reaktoru a 4 cirkulačných slučiek, z ktorých každá pozostáva z parogenerátoru PGV-1000M, hlavného cirkulačného čerpadla (ďalej HCC) GCN-195M a primárnych potrubí. K okruhu sú pripojené znovu hydroakumulátory a kompenzátor objemu s barbotážnou nádržou. Štandardný dizajn V 320 a nové klony VVER 1000 nemajú izolačné ventily na primárnych slučkách. Operačné podmienky sú tlak 15,7 MPa, teplota na studenej vetve 290 °C a na horúcej 320 °C. Dizajn

všetkých slučiek je podobný a zaisťuje rovnomerný hydraulický obor, tzn. aj rovnaký prietok chladiva. Celkový dizajn primárneho okruhu zabezpečuje normálnu operáciu reaktorového zariadenia aj pri vystavení zaťaženiám spôsobenými zemetrasením a jeho bezpečné odstavenie a chladenie. Tepelné rozpínanie potrubí je kompenzované presúvaním parogenerátorov a HCČ, ktoré sú na valivých podporách. Parogenerátor PGV-1000M je jednoplášťový rekuperatívny horizontálny tepelný výmenník s trubkovými zväzkami, určený na produkciu sytej pary, ktorá poháňa turbínu. Dohromady sa v každom parogenerátore nachádza 11000 horizontálnych trubiek s celkovou dĺžkou 122 km, vnútorným priemerom 13 mm a vonkajším 16 mm. HCČ GCN-195M je vertikálne odstredivé jednostupňové čerpadlo s hydrostatickou upchávkou, axiálnym prívodom vody a samostatným trojfázovým asynchrónnym motorom, ktoré zaisťuje prietok chladiva približne 21200 m³/h. Kompenzátor objemu je pripojený k neizolovateľnej časti horúcej vetvy na jednej hlavnej cirkulačnej slučke. V prípade nadmerného primárneho tlaku sa chladivo vypustí do barbotážnej nádrže cez 3 bezpečnostné ventily kontrolované pulznými ventilmi. Primárny tlak sa môže redukovať striekaním do kompenzátoru objemu a navýšiť použitím elektrických ohrievačov.[15];[16];[17]



Obr. 7 Celkový pohľad na kontajnement a systémy VVER-1000/N-320 [17]

Celý primárny okruh je uzavretý v plnotlakovom kontajnemente na obr. 7, ktorý bol postavený použitím predtlakovaného betónu. Kontajnement je valcovitá konštrukcia s vnútorným priemerom 45 m a výškou 41,7 m, uzavretá sférickým vekom a plochým dnom. Spevnená betónová stena má hrúbku 1,2 m vo valcovitej časti a 1,1 m v kupolovej časti. Zároveň sa vo vnútornej časti nachádza 8 mm hrubá nepriepustná kovová výstuž. Celkový objem kontajnementu je približne 60000 m³ a návrhový tlak 0,5 MPa. Kontajnement je vybavený 3 × 100% prebytkovým sprejovým systémom na redukciu tlaku po havárii so stratou chladiva (Loss of coolant accident; ďalej LOCA) alebo pretrhnutí ocelevej línie vnútri kontajnementu. Sprejové rozprašovače sú kruhy s tryskami na strope kupole. Sú prepojené vertikálnymi potrubiami s čerpadlami a teplenými výmenníkmi na odvod tepla z kontajnementu uloženými pod kontajnementom, ktoré si berú chladivo z kontajnementovej žumpy. Pôvodne nebol kontajnement vybavený pasívnymi autokatalytickými recombínátormi alebo filtrovanými

vetracími systémy na zmiernenie vážnych nehôd. Nachádzala sa tu len recirkulácia a ventilačný systém na výmenu vzduchu pre normálne operačné režimy. Recirkulačné systémy boli vybavené aerosólom a jódoými filtrami, ale ich kapacita bola nedostatočná na vážne nehody. Tieto slabiny boli odstránené alebo sú stále v procese vo väčšine elektrární s VVER 1000.[15];[19]

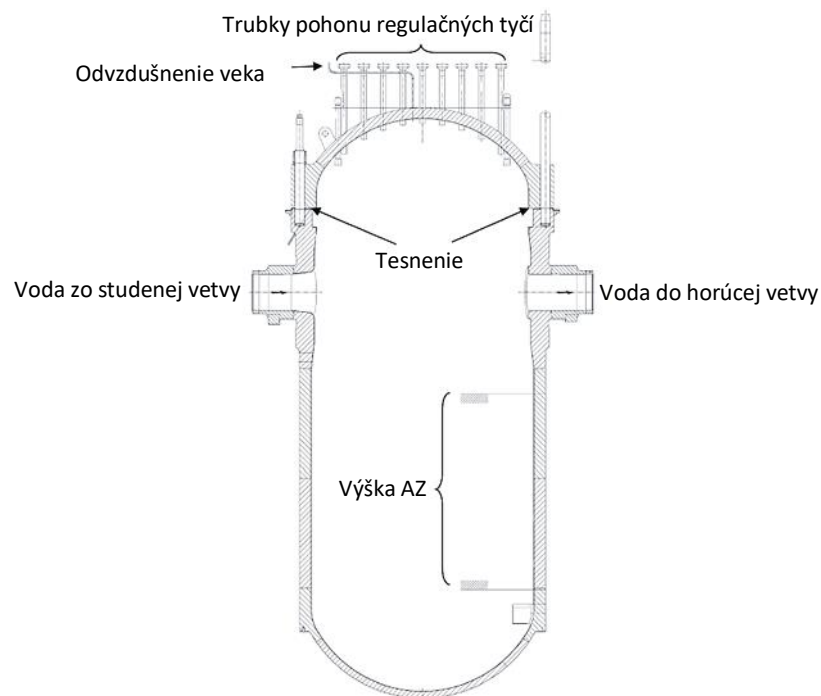
Systém havarijného chladenia (ďalej SHCH) reaktoru VVER 1000 sa skladá z troch častí. Pasívny SHCH pozostáva zo 4 hydroakumulátorov s objemom 60 m^3 obsahujúcimi 50 m^3 kyseliny boritej v koncentrácii 16 g/kg a dusíkom s tlakom $5,9 \text{ MPa}$. Každý je individuálne pripojený k reaktoru, z čoho dva do hornej a dva do spodnej časti. Pri normálnej operácii sú oddelené od reaktoru dvomi spätnými ventilmi na každom pripájacom potrubí. Navyše sa tu nachádzajú aj dva rýchlozáverné izolačné ventily na zabránenie vstreknutia dusíka do primárneho okruhu. Vysokotlaký systém chladenia AZ je troj-líniový systém pripojený na studené vetvy. Každá línia má pohotovostné nádrže chladiva vnútri a vonku kontajmentu, kontajmentovú žmpu, čerpadlo na vstrekovanie bóru, vysokotlakové čerpadlo na chladiacu kvapalinu, pripájacie potrubia a ventily. Po aktivácii je systém najskôr uvedený do prevádzky v recirkulačnom režime a v prípade potreby je automaticky prepnutý do vstrekovacieho režimu. Táto aktivácia je automatická v prípade straty primárneho alebo sekundárneho chladiva a v prípade straty napájania. Kapacita každého čerpadla v tomto systéme je $150 \text{ m}^3/\text{h}$. Podobne aj nízkotlakový systém pozostáva z troch línií. Je určený na chladenie AZ v prípade LOCA a na normálne chladenie počas odstávky operačných režimov. Kapacita každého čerpadla v tomto systéme je $750 \text{ m}^3/\text{h}$. V SHCH sa nachádzajú ešte tri nádrže s objemom 15 m^3 s vysokou koncentraciou bóru (40 g/kg chladiva), ktoré poskytujú chladivo tromi piestovými čerpadlami s prietokom $6 \text{ m}^3/\text{h}$ pracujúce v plnom rozsahu tlaku primárneho okruhu.[15]

Európsky tlakovodný reaktor (EPR) bol vyvinutý v spolupráci Francúzska a Nemecka na základe zmluvy medzi spoločnosťami Framatome, Siemens KWU a EDF-CNEN. Na začiatku spolupráce spoločne definovali požiadavky na smerovanie vývoja EPR, ako koncepcie budúcej generácie jadrových elektrární vychádzajúcej z osvedčených tlakovodných reaktorov a najnovších poznatkov. Základnými východiskami sa stali: preferovanie vývojovej koncepcie vychádzajúcej z prevádzkových skúseností; zvyšovanie bezpečnosti, zamerané najmä na zníženie pravdepodobnosti tavenia AZ reaktora a zvýšenie pevnosti kontajmentu; prísnejšie prevádzkové podmienky a limity týkajúce sa radiačnej ochrany, údržby a vplyvu ľudského faktora. Projekt EPR má charakter zdokonalenej koncepcie reaktora typu PWR, v ktorom boli implementované niektoré revolučné technické riešenia pre maximálne možné zvýšenie bezpečnosti prevádzky jadrových elektrární. Ťažisko spočíva v zabudovaní čo najväčšieho množstva bezpečnosti.[7]

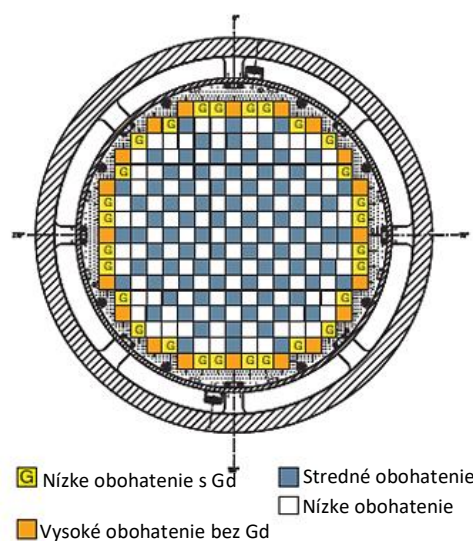
Tlaková nádoba reaktoru, zobrazená na obr. 8, je hlavná komponentou chladiaceho systému. Tvar je valcový, so zváraným polguľovým dnom a odnímateľným prírubovým polguľovým horným vekom s tesnením. Jej výška je približne 13 m , vnútorný priemer $4,87 \text{ m}$ a hrúbka stien je 25 cm . Materiál nádoby je nízkolegovaná oceľ. Celý vnútorný povrch je pokrytý plášťom z nerezovej oceli na zabezpečenie odolnosti proti korózii. Návrhový tlak a teplota pre nádobu sú $17,6 \text{ MPa}$ a 351°C . Nádoba má štyri vstupné dýzy a štyri výstupné dýzy umiestnené v horizontálnej rovine tesne pod prírubou reaktorovej nádoby, ale nad hornou časťou AZ. Celková hmotnosť je 520 t .[20];[21]

AZ reaktoru s výkonom 4500 MW_t pozostáva zo sústavy 241 palivových súborov. Každý palivový súbor s aktívnou dĺžkou $4,20 \text{ m}$ pozostáva z 265 palivových tyčí v usporiadaní 17×17 a 24 vodiacich prvkov mechanicky spojených do štvorcového usporiadania. Vodiace prvky sa používajú ako miesta pre regulačné tyče s obsahom karbidu bóru a v prípade potreby pre pevné alebo pohyblivé prístroje v AZ a zostavy neutrónových zdrojov. Palivové tyče s priemerom $1,06 \text{ cm}$ sú v konštrukcii palivového súboru mechanicky upevnené v axiálnom a radiálnom

smere pomocou ôsmich priebežných mriežok a dvoch koncových dištančných mriežok. Tyče sú vyrobené zo zliatiny M5TM a obsahujú keramické pelety UO₂, ktorých počiatkové obohatenie je menšie alebo rovné 5,0 % ²³⁵U, alebo pelety so zmesou uránovo-plutóniového oxidu, ktorý je energeticky ekvivalentný. Zároveň môžu tyče obsahovať aj spáliteľný absorbér – gadolínium. Gadolínium vo forme Gd₂O₃ zmiešané s UO₂ sa používa ako integrovaný spáliteľný absorbér. Koncentrácie sa pohybujú v rozmedzí 2 % až 8 % hmotnosti. Počet tyčí s obsahom gadolína v jednom palivovom súbore sa pohybuje od 8 do 28 v závislosti od schémy nakladania s palivom. Obohatený UO₂ sa používa ako nosný materiál pre Gd₂O₃, aby sa po spotrebovaní gadolína znížili koeficienty radiálnej špičky výkonu a aby sa ľahšie splnili predpísané požiadavky na dĺžku cyklu.[20];[21];[22] Obr. 9 zobrazuje typické počiatkové rozloženie palivových tyčí v AZ.

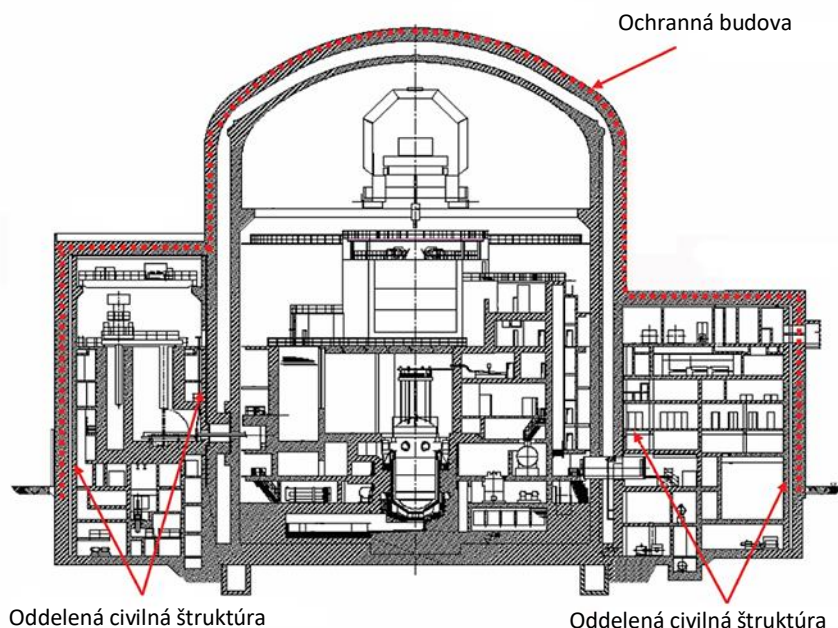


Obr. 8 Tlaková nádoba reaktoru EPR. Prevzaté z [21] a upravené



Obr. 9 Typické počiatkové rozloženie palivových tyčí v AZ. Prevzaté z [22] a upravené

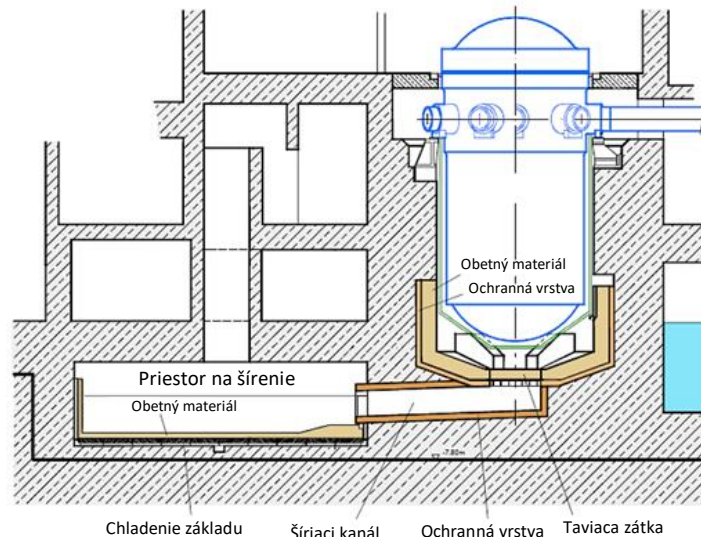
Zostava chladiaceho systému má konvenčný dizajn so štyrmi slučkami. Chladivo reaktora prúdi potrubím horúcej vetvy do vertikálnych parogenerátorov a vracia sa do AZ potrubím studenej vetvy cez HČČ. Jednou slučkou prúdi približne 28330 m³/h chladiva s teplotou na studenej vetve 295,9 °C, na horúcej 327,2 °C a prevádzkovým tlakom s hodnotou 15,5 MPa. Kompenzátor objemu je pripojený k jednej zo 4 slučiek. Jeho hlavná rola je automatické udržiavanie tlaku v špecifickom rozsahu pri normálnej prevádzke. Tlaková nádoba, kompenzátor objemu a parogenerátory majú relatívne veľký pomer objemu k výkonu AZ, čo predstavuje ďalšiu výhodu z hľadiska prevádzky a bezpečnosti. V prípade tlakovej nádoby je objem medzi výškou dýz a vrcholom AZ väčší, aby sa zlepšilo zmiernenie havárií s malou stratou chladiva (SBLOCA) predĺžením obdobia do začiatku odkrývania aktívnej zóny alebo minimalizovaním prípadnej hĺbky odkrývania aktívnej zóny. Tento zvýšený objem by bol prínosný aj v podmienkach odstávky v prípade straty funkcie systému odvodu zbytkového tepla. Väčšie objemy vodnej a parnej fázy v kompenzátore objemu zmierňujú reakciu zariadenia na normálne a abnormálne prevádzkové prechodné stavy, čo umožňuje predĺžiť čas na zvládnutie havarijných situácií a predĺžiť životnosť zariadenia. Väčší objem na sekundárnej strane parogenerátora vedie k zvýšeniu zásoby sekundárnej vody a objemu pary, čo ponúka niekoľko výhod, napr. plynulé prechodné stavy pri normálnej prevádzke, čo vedie k zníženiu možnosti neplánovanej odstávky reaktora; pri riadení scenárov prasknutia trubiek parogenerátora veľký objem pary, v súlade s nastavenou hodnotou bezpečnostných ventilov parogenerátorov nad bezpečnostným vstrekovacím tlakom, zabraňuje úniku kvapaliny mimo kontajnmnt; vzhľadom na zvýšenú hmotnosť vody na sekundárnej strane by v prípade predpokladanej úplnej straty prívodu napájacej vody do parogenerátora bol čas vysychania najmenej 30 minút, čo je dostatočný čas na obnovenie prívodu napájacej vody alebo na rozhodnutie o iných protiopatreniach.[21];[22]



Obr. 10 Kontajnmnt reaktoru EPR. Prevzaté z [21] a upravené

Budova reaktoru na obr. 10 pozostáva z vonkajšej železobetónovej ochrannej budovy valcového tvaru s vnútorným priemerom 53 m, hrúbkou steny 1,3 m do výšky bezpečnostných budov a 1,8 m nad výškou bezpečnostných budov a vnútornej kontajnmntovej budovy valcového tvaru z dodatočne predpätého betónu s výškou 57,5 m, vnútorným priemerom 46,78 m, hrúbkou steny 1,3 m, oceľovým obložením s hrúbkou 6 mm a z prstencového priestoru medzi týmito dvoma budovami. Ochranná budova slúži na ochranu kontajnmntovej budovy

pred vonkajšími hrozbami. V kontajnementovej budove sa nachádza zostava chladiaceho systému a časti súvisiacich konštrukcií, systémov a komponentov. V prípade LOCA alebo ťažkej havárie slúži kontajnementová budova na zadržanie všetkého rádioaktívneho materiálu a na odolanie maximálnemu tlaku 4,3 bar a teplote 170°C. Voľný objem kontajnementu je približne 80000 m³, z ktorých je 1316 povolených na zaplavenie, čo predstavuje dostatočnú ochranu bezpečnostných komponentov pred zaplavením po poruche potrubia.[21]



Obr. 11 Systém zadržiavania taveniny AZ. Prevzaté z [21] a upravené

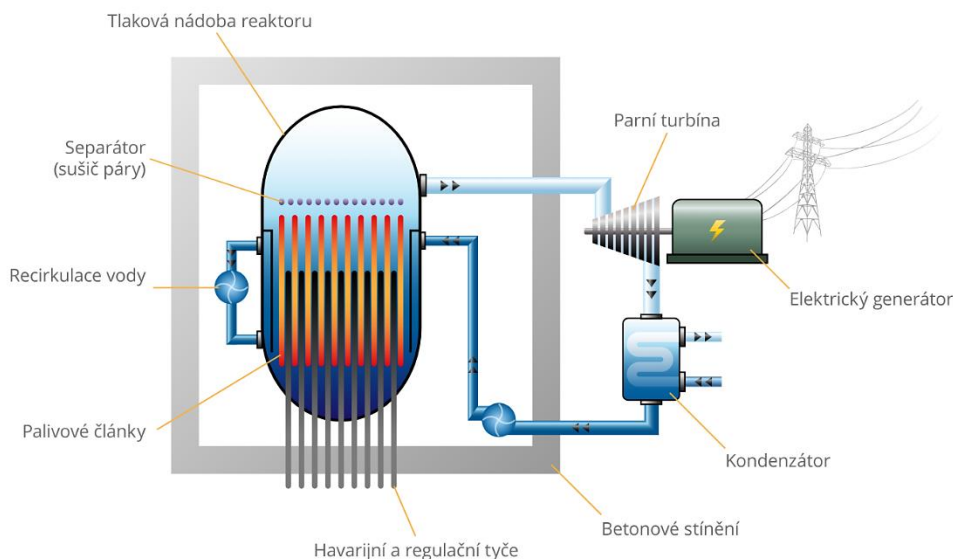
Dôležité bezpečnostné systémy (bezpečnostné vstrekovanie, núdzová napájacia voda, hlavné odľahčovanie pary, chladiaci reťazec, núdzové elektrické napájanie) sú zoštvornásobené, každý so štyrmi líniami zdieľanými medzi štyrmi samostatnými divíziami. Uprednostňuje sa jednoduchý a jasný prístup k návrhu systému, čím sa uľahčuje pochopenie reakcie zariadenia zo strany obsluhy a minimalizujú sa zmeny konfigurácie. Konfigurácia štyroch línii ponúka možnosť predĺženej údržby častí alebo dokonca celých systémov, čo je užitočné pri preventívnej údržbe a opravách počas bežnej prevádzky. Bezpečnostný vstrekovací systém, ktorý by sa aktivoval v prípade LOCA, je navrhnutý tak, aby vstrekoval vodu do AZ a ochladzoval ju. V prvej fáze by sa voda vstrekovala do AZ cez studené vetvy slučiek chladiaceho systému reaktora. Z dlhodobiejšieho hľadiska by sa voda vstrekovala súčasne cez studené a horúce vetvy. Rezerva vody určená na napájanie bezpečnostného vstrekovacieho systému sa nachádza na vnútornej strane a na dne kontajnementu reaktora a vstrekovacie čerpadlá berú vodu len z tejto rezervy. Bezpečnostný vstrekovací systém EPR je vo svojej nízkotlakovej časti vybavený výmenníkmi tepla, aby bol schopný sám zabezpečiť chladenie AZ. EPR je ďalej vybavený špeciálnym systémom pre ťažké havárie na chladenie vnútra kontajnementu reaktora, ktorý by sa aktivoval len v prípade havárie vedúcej k roztaveniu AZ. Odvod zbytkového tepla zabezpečujú štyri línie nízkotlakovej časti bezpečnostného vstrekovacieho systému, ktoré sú potom nakonfigurované na odvod zbytkového tepla v uzavretej slučke (nasávanie cez horúce vetvy, vypúšťanie cez studené vetvy). EPR je vybavený aj špeciálnym systémom na zadržiavanie roztavených zvyškov AZ až do jej celkovej kapacity, vnútorných častí a spodnej časti hlavy tlakovej nádoby. Funkčným princípom systému na zadržiavanie roztavenej AZ je rozptýlenie roztavených zvyškov na veľkú plochu a ich následná stabilizácia pomocou vodného ochladzovania. Reaktorová jama je navrhnutá tak, aby zachytávala korium v prípade výtoky z nádoby a prenášala ho do oblasti rozptylu a chladenia kororia. Povrch reaktorovej jamy je chránený "obetným" betónom, ktorý je podložený ochrannou vrstvou pozostávajúcou zo žiaruvzdorného materiálu zirkónového typu. Rozprestretím

sa zvyšuje pomer povrchu k objemu taveniny, aby sa podporilo rýchle a účinné chladenie a obmedzilo sa ďalšie uvoľňovanie rádionuklidov do ochranej atmosféry. Hlavné komponenty systému zadržiavania taveniny aktívnej zóny sú znázornené na obr. 11. Tieto prvky zabezpečujú pasívnu transformáciu roztavenej aktívnej zóny na ochladenú pevnú konfiguráciu bez zásahu obsluhy.[20];[21];[22]

2.2 Jadrové reaktory BWR

Varný jadrový reaktor BWR (Boiling Water Reactor) je druhý najrozšírenejší typ reaktoru na svete. Používa ľahkú demineralizovanú vodu ako chladivo a aj moderátor. Táto voda sa ohrieva do varu v AZ reaktore pri tlaku až 75 atmosfér, ktorý zvyšuje teplotu varu k hodnote približne 285 °C a para generovaná v tomto reaktore ide po zbavení vlhkosti priamo na turbínu. Po skondenzovaní sa vracia voda späť do reaktoru. Keďže je para priamo vystavená AZ reaktoru, nastáva tu malá rádioaktívna kontaminácia na turbínach, ktorá je ale krátkodobá a turbíny môžu byť normálne sprístupnené čoskoro po odstávke.[13];[14]

Toto usporiadanie, zobrazené na obr. 12, predstavuje pravdepodobne najjednoduchšiu možnosť pre jadrový reaktor, pretože tu nie sú potrebné parogenerátory. Tlak a teplota pary sú nižšie v porovnaní s modernými uhoľnými elektrárnami a parná turbína je obecnne veľmi veľká. BWR majú kapacitu do 1400 MW a ich účinnosť je okolo 33 %.[14]



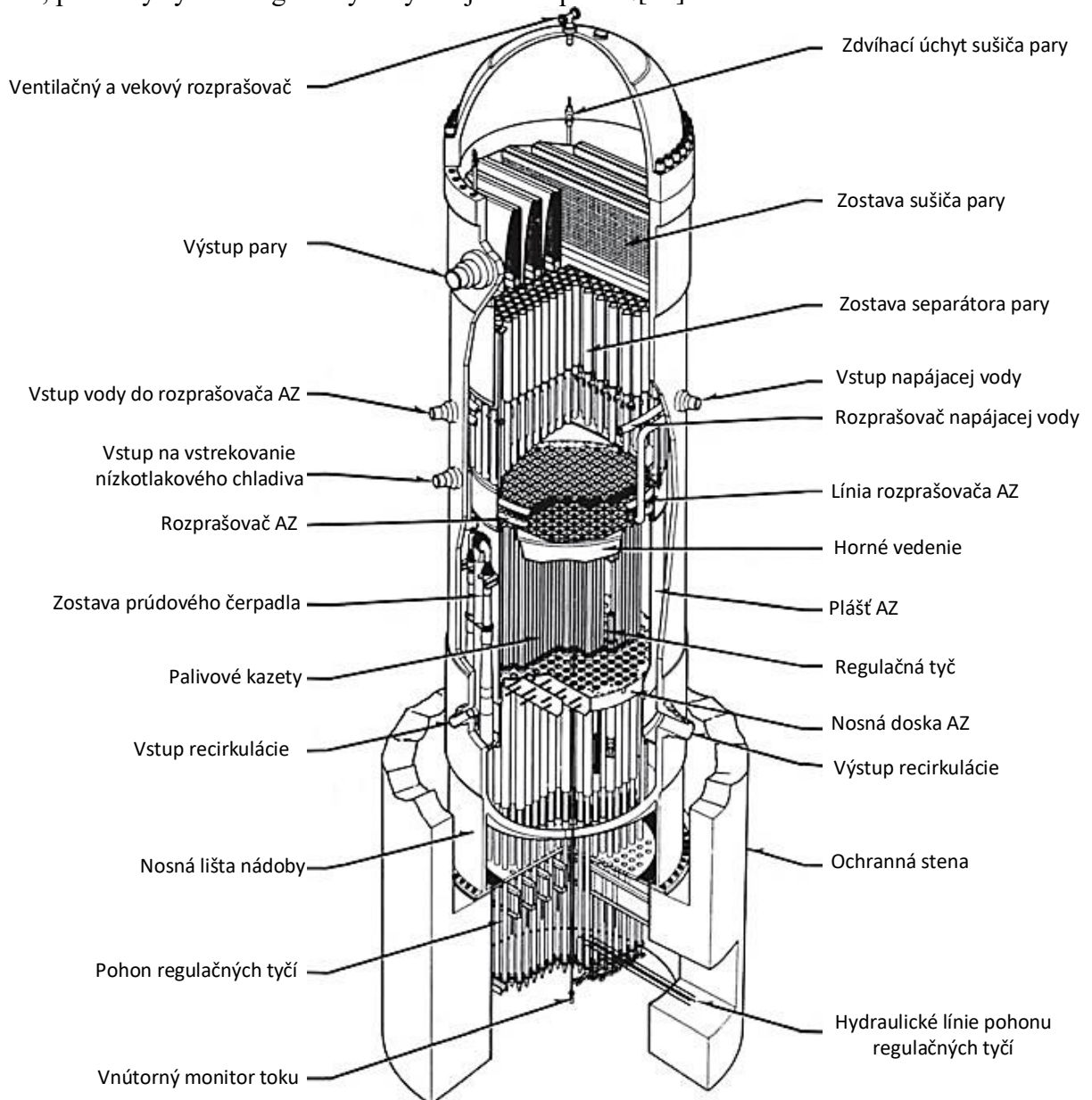
Obr. 12 Schéma elektrárne s BWR [13]

BWR používa mierne obohatený urán ako palivo vo forme valčekov UO_2 v palivových tyčiach zo zliatiny zirkónia. V AZ sa môže nachádzať až 140 ton tohto paliva v 75000 palivových tyčiach. Výmena paliva prebieha pri odstavenom reaktore spravidla raz za 1 až 1 a pol roku. Vyhorené palivo je potom udržiavané v kontrolovanom skladnom bazéne v elektrárni predtým než bude prevezené na prepracovanie alebo do konečného skladu.[14]

Firma General Electric vstúpila do vývoja BWR s konštrukciou prototypového reaktoru v roku 1957 a potom začala aj s dizajnom a konštrukciou komerčných BWR elektrární. V súčasnej dobe je od tejto firmy v prevádzke 6 reaktorov od BWR/1 po BWR/6. Ďalšie reaktory ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) a ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor) momentálne v prevádzke nie sú. Hlavné rozdiely medzi jednotlivými dizajnmi sú vlastnosti kontajntentu, prirodzená/nútená cirkulácia, prúdové čerpadlá vnútri tlakovej

nádoby s prietokom zaisteným externými čerpadlami/integrálne mechanické čerpadlá.[23] Na popis základných charakteristík je vybraný dizajn BWR/6.

Reaktorová zostava BWR/6, zobrazená na obr. 13, pozostáva zo zariadení a prístrojových vybavení nevyhnutných na produkciu, udržanie a kontrolu parného výkonu. Základné komponenty sú: reaktorová nádoba a jej vnútorné časti, systém recirkulácie vody, hlavné parné línie, pohonný systém regulačných tyčí a jadrové palivo.[24]

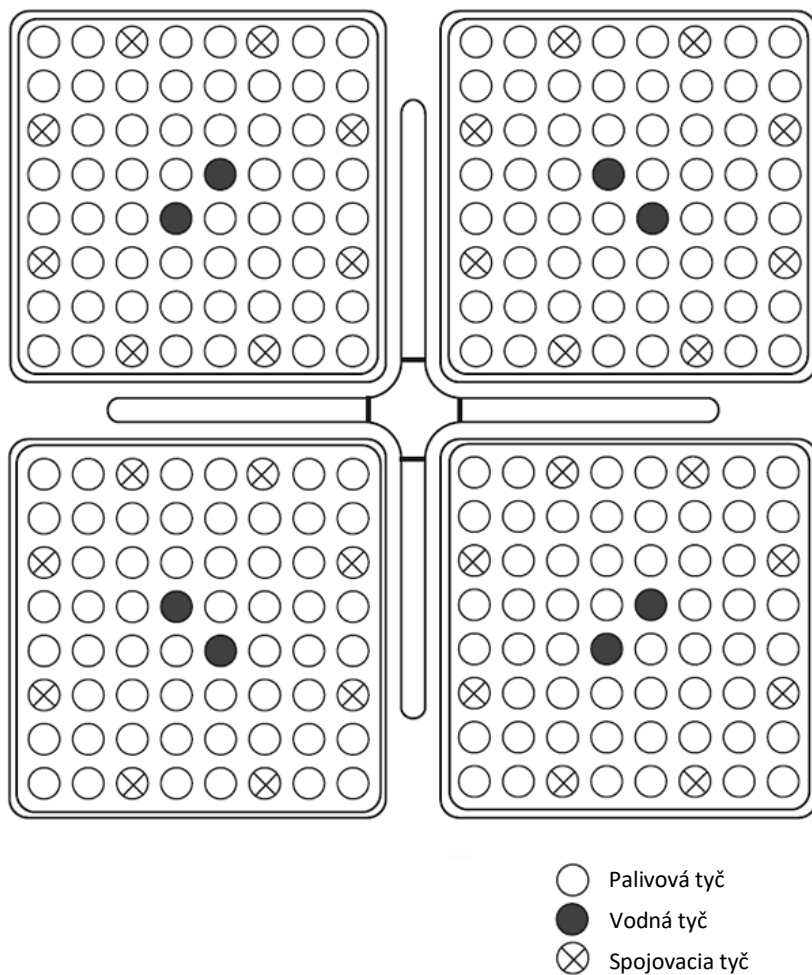


Obr. 13 Jadrový reaktor BWR/6. Prevzaté z [23] a upravené

Tlaková nádoba reaktoru je nádoba s jedným odnímateľným vekom. Je vyrobená z vysoko odolnej nízkoaliovanovej uhlíkovej oceli na vnútornej strane a v oblasti otvorov s vrstvou nerezovej oceli na zaistenie nutnej odolnosti voči korózii. Veľa vlastností bolo začlenených v dizajne nádoby a potrubí na zjednodušenie procesu výmeny paliva, napríklad výstupné parné potrubia sú privarené k nádobe, to znamená že eliminujú potrebu rozoberania prírubových spojov. Ďalšia dizajnová vlastnosť je tesnenie medzi nádobou a suchou časťou kontajneru (drywell), ktorá umožňuje zatopenie priestoru nad nádobou. Výška tlakovej

nádoby je 21 m s vnútorným priemerom 5,5 m. Zároveň je nádoba navrhnutá s hrúbkou steny približne 15 cm a vnútornou 5 mm hrubou výstelkou z nerezovej oceli.[24];[25]

AZ typického BWR/6 s výkonom 1220 MW_e pozostáva zo 750 palivových kaziet. Každá kazeta obsahuje 64 tyčí, ktoré sú rozložené a podopreté štvorcovou mriežkou 8×8 a nosnými doskami. Obidve nosné dosky sú vyrobené z nerezovej oceli. V palivovej kazete sa nachádzajú 3 typy tyčí: palivové, vodné a spojovacie. Spojovacie tyče sú pevne priskrutkované k hornej a dolnej doske a slúžia na udržanie palivovej kazety pohromade. Vodné tyče sú duté s malými dierami v spodnej a hornej časti, ktoré umožňujú prúdenie vody cez tyč, čím sa zavádza moderátor do kazety. Jedna z nich je mechanicky pripevnená ku každej zo 7 rovnomerne rozložených dištančných mriežok a tým upevňuje axiálnu pozíciu každej z nich. Palivové tyče obsahujú pelety s obohatením ²³⁵U na 1,7 – 2,0 %. Výška tyčí je približne 3,8 m a priemer vonkajšieho plášťa 1,2 cm. Typický BWR/6 obsahuje približne 60000-70000 palivových tyčí s hmotnosťou paliva 160 ton. AZ ďalej obsahuje regulačné tyče, tvorené 72 trúbkami naplnenými práškom karbidu bóru, ktoré vstupujú do AZ zospodu. Tieto tyče z bórovej oceli na obr. 14 majú tvar krížu a sú umiestnené medzi palivovými kazetami.[23];[24]



Obr. 14 Usporiadanie palivových kaziet a regulačnej tyče [23]

Plášť AZ je valcová konštrukcia z nerezovej oceli, ktorá obklopuje AZ a vytvára bariéru na oddelenie vzostupného prúdenia cez AZ od zostupného prúdenia v prstenci. Príruba v hornej časti plášťa sa spája s prírubou na hornom vedení, ktorá sa zase spája s prírubou na zostave odlučovača pary, čím sa vytvorí vypúšťací priestor AZ. Výtlačné difúzory prúdového čerpadla prenikajú do obvodovej priečky podpory plášťa pod výškou AZ, aby sa chladivo dostalo do vstupného priestoru. Obvodová priečka podpory plášťa je privarená k stene nádoby

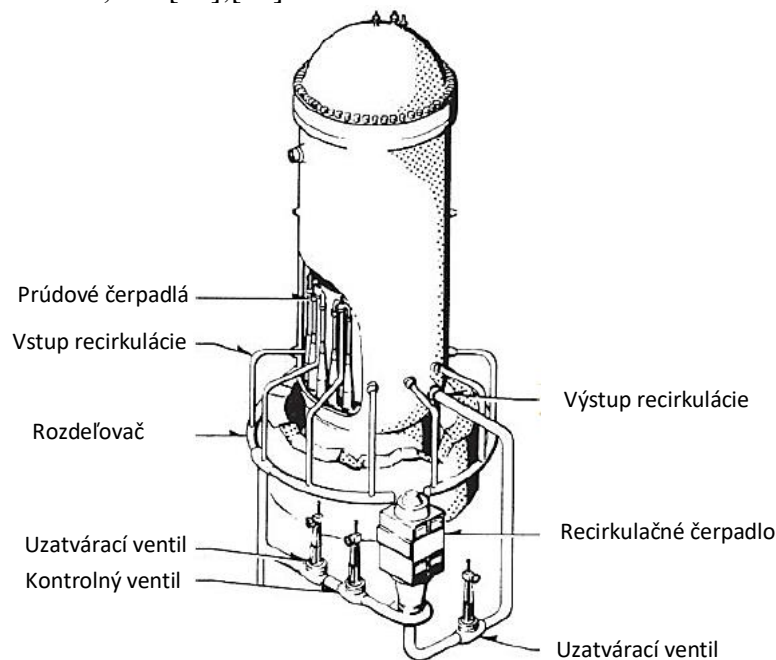
na zabránenie obtekaniu výstupného toku z prúdového čerpadla cez AZ a vytvorenie komory okolo AZ, ktorá sa môže znovu zaplavovať v prípade LOCA. Podpora plášťa nesie hmotnosť plášťa, separátorov pary, systému prúdových čerpadiel a seizmické a tlakové zaťaženie v normálnych a poruchových prevádzkových podmienkach. Dva kruhové rozprašovače, jeden na nízkotlakové rozprašovanie AZ a druhý na vysokotlakové rozprašovanie AZ, sú namontované vo vnútri plášťa v priestore medzi hornou časťou AZ a základňou separátorov pary. Kruhové rozprašovače AZ sú vybavené rozprašovacími dýzami na vstrekovanie chladiacej vody. Rozprašovacie krúžky a trysky AZ nezasahujú do inštalácie alebo odstraňovania paliva z AZ. Dýza na vstrekovanie roztoku neutrónového absorbéra je namontovaná pod AZ v oblasti recirkulačného vstupného priestoru.[24]

Zostava separátora pary pozostáva z klenutej základne, na ktorej je privarená sústava stojatých rúrok s trojstupňovým odlučovačom pary, ktorý je umiestnený na vrchu každej rúrky. Zostava separátora pary leží na hornej prírubе plášťa a tvorí kryt vypúšťacieho priestoru AZ. Je priskrutkovaná k prírubе pomocou dlhej upínacej skrutky, ktorá uľahčuje demontáž a vysunutie nad odlučovače. Počas inštalácie sa základňa separátora zarovná na prírubе krytu AZ s vodiacimi tyčami a nakoniec sa umiestni pomocou polohovacích kolíkov. Cieľom konštrukcie s dlhými skrutkami je zabezpečiť priamy prístup k skrutkám počas operácií doplňovania paliva s minimálnou hĺbkou manipulácie s podvodným náradím počas odstraňovania a inštalácie kaziet, vďaka čomu nie je potrebné zapájať závit pri vytváraní hlavy plášťa. Trojskrutka sa zasunie do horného vedenia a jej matica sa utiahne len na nominálny krútiaci moment. Konečné zaťaženie sa stanovuje prostredníctvom diferenciálnej rozťažnosti skrutky a kompresného puzdra. Pevné axiálne separátory pary nemajú žiadne pohyblivé časti a sú vyrobené z nerezovej ocele. V každom separátore zmes pary a vody stúpajúca cez stojatú rúru naráža na lopatky, ktoré zmes roztočia a vytvoria vír, v ktorom odstredivé sily oddelia vodu od pary v každom z troch stupňov. Para potom opúšťa separátor v hornej časti a prechádza do mokrého parného priestoru pod sušičom. Oddelená voda vystupuje zo spodného konca každého stupňa separátora a vstupuje do bazéna, ktorý obklopuje stojaté rúry, aby sa pripojila k prúdeniu v prstencovom priestore.[24]

Zostava sušiča pary je namontovaná v reaktorovej nádobe nad zostavou odlučovača pary a tvorí hornú časť a boky priestoru pre vlhkú paru. Zvislé vodiace lišty na vnútornej strane nádoby zabezpečujú zarovnanie zostavy sušiča počas inštalácie. Podložky vyčnievajúce zo steny nádoby smerom dovnútra podpierajú zostavu sušiča a počas prevádzky ju v polohe drží hlava nádoby. Para zo separátorov prúdi smerom nahor a von cez sušiacie lopatky. Tieto lopatky sú pripevnené k hornej a dolnej nosnej časti, ktoré tvoria pevnú integrálnu jednotku. Vlhkosť sa odstraňuje a odvádza systémom žľabov a odtokov do bazéna obklopujúceho separátory a potom do recirkulačného prstenca.[24]

Systém recirkulácie vody na obr. 15 má za účel cirkulovať potrebné chladiivo cez AZ. Pozostáva z dvoch slučiek nachádzajúcich sa mimo reaktorovú nádobu, z ktorých každá obsahuje čerpadlo, regulačný ventil prietoku a dva uzatváracie ventily. V recirkulačnom systéme sa ďalej používajú vysokovýkonné prúdové čerpadlá umiestnené v nádobe reaktora. Tie zabezpečujú nepretržitú vnútornú cirkuláciu väčšej časti prietoku chladiiva AZ. Recirkulačné čerpadlá nasávajú prúdenie smerom nadol v prstenci medzi plášťom AZ a stenou nádoby. Približne jedna tretina prietoku aktívnej zóny sa odoberá z nádoby cez dve recirkulačné dýzy. Potom sa čerpá pod vyšším tlakom, rozvádza cez rozdeľovač, ku ktorému je pripojených niekoľko stúpacích potrubí, a vracia do vstupných dýz nádoby. Toto prúdenie sa z dýzy prúdového čerpadla vypúšťa do počiatočného stupňa hrdla prúdového čerpadla, kde v dôsledku procesu výmeny hybnosti nasáva okolitá voda v dolnej časti nádoby do hrdla prúdového čerpadla, kde sa tieto dva prúdy zmiešajú a následne spomalia v difúzore, aby sa nakoniec

vypustili do spodného priestoru AZ. Dohromady sa v tomto systéme nachádza 20 prúdových čerpadiel s dĺžkou približne 5,8 m.[23];[24]

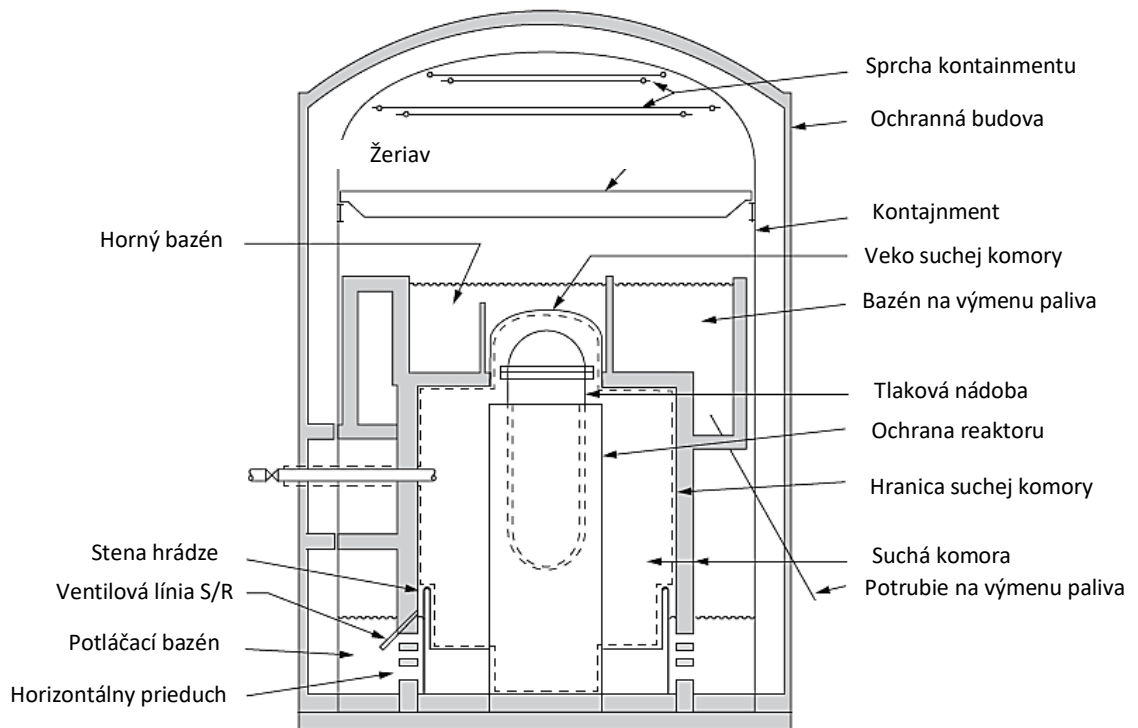


Obr. 15 Systém recirkulácie vody. Prevzaté z [24] a upravené

BWR/6 využívajú koncepciu kontajnementu Mark III. Mark III, zobrazený na obr. 16, je viacbáriový kontajnement s funkciou potlačenia tlaku. Primárny kontajnement pozostáva z viacerých hlavných komponent. Suchá komora (drywell) je valcová železobetónová konštrukcia s odnímateľnou oceľovou hlavou obklopujúca nádobu reaktora. Je navrhnutá s priemerom 22,25 m, výškou 27 m a na vnútorný tlak 2 bar, vonkajší tlak 1,4 bar a vnútornú teplotu 165 °C. Hlavná funkcia suchej komory je zadržiavanie pary uvoľnenej pri LOCA a jej nasmerovanie do potláčacieho bazénu cez hrádzovú stenu a horizontálne prieduchy. Potláčací bazén obsahuje veľký objem vody, ktorá slúži ako chladič a zdroj vody pre SHCH. Samotný kontajnement je voľne stojaca valcová oceľová tlaková nádoba, ktorá obklopuje suchú komoru s potláčacím bazénom a tvorí primárnu tesnú bariéru na obmedzenie úniku štiepnych produktov počas LOCA. Konštrukcia kontajnementu neumožňuje únik väčší ako 0,1 % objemu kontajnementu za 24 hodín pri tlaku približne 1 bar. Niektoré z predpokladaných LOCA havárií si môžu vyžadovať zaplavenie kontajnementu, aby sa z reaktora odstránilo palivo a vykonali opravy. Hoci sa predpokladá, že pri väčšine havárií sa odstraňovanie paliva z reaktora uskutoční bežnými postupmi a zariadeniami, v rámci nepredvídaných udalostí možno kontajnement zaplaviť na úroveň 1,8 m a 0,25 m nad vrch aktívnej časti paliva v AZ.[26]

Pri prasknutí recirkulačného potrubia sa nádoba reaktora zaplaví do výšky dýz prúdového čerpadla, prebytočný prietok sa vypustí cez trhlinu recirkulačného potrubia do suchej komory. Tento prietok vody odnáša teplo z rozpadu AZ z nádoby cez prasknuté recirkulačné potrubie vo forme horúcej vody, ktorá prúdi do potlačujúceho bazéna. V prípade prasknutia hlavného parného potrubia je počiatočné zníženie tlaku v nádobe reaktora veľmi rýchle a vedie k maximálnemu diferenčnému tlaku v suchej komore. Počas prvej sekundy vyfukovania bude vyfukovaný tok pozostávať z nasýtenej pary. Táto para vstupuje do suchej komory v prehriatom stave s teplotou približne 165 °C. Tvorba dutín vo vode v reaktorovej nádobe spôsobí rýchle zvýšenie hladiny vody. Pri poklese tlaku v reaktore sa začne prúdenie SHCH. Nakoniec sa prietok SHCH vyleje do suchej komory. Rozliata voda skondenzuje paru v suchej komore, a tým zníži tlak. Hneď ako tlak v suchej komore klesne pod tlak v kontajnemente, otvoria

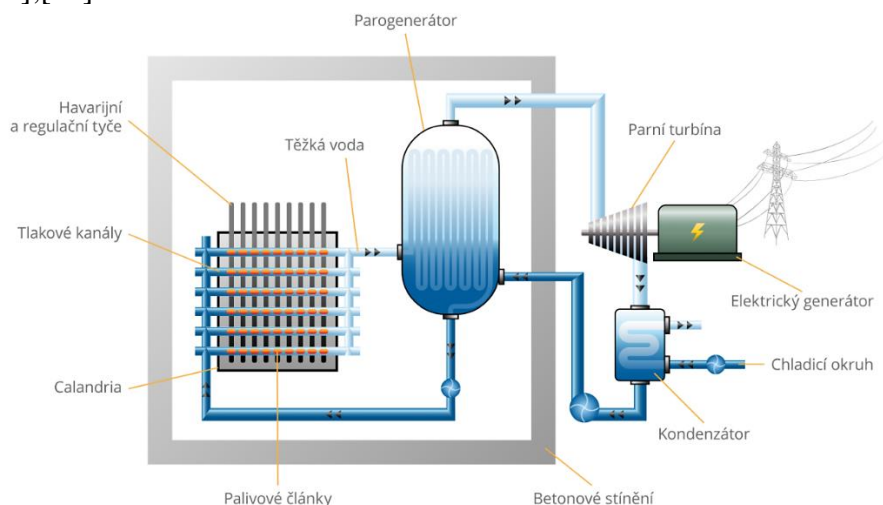
sa vákuové prerušovače suchej komory a nekondenzovateľné plyny z kontajmentu budú prúdiť späť do suchej komory.[26]



Obr. 16 Kontajment Mark III. Prevzaté z [23] a upravené

2.3 Jadrové reaktory PHWR

Ťažkovodný reaktor PHWR CANDU (skratka z anglického CANadian Deuterium Uranium) bol vyvinutý v Kanade so strategickým cieľom umožniť využívanie jadrovej energie bez potreby dovozu obohateného uránu. Obohacovanie uránu je drahý a technicky náročný proces, preto je tento typ reaktoru populárny aj v ďalších svetových krajinách, ktoré majú prírodné zásoby uránu a môžu ho využiť na generovanie energie. V súčasnej dobe pracuje na svete asi 35 týchto reaktorov a to v Kanade, Indii, Pakistane, Argentíne, Kórei a Rumunsku.[13];[14]

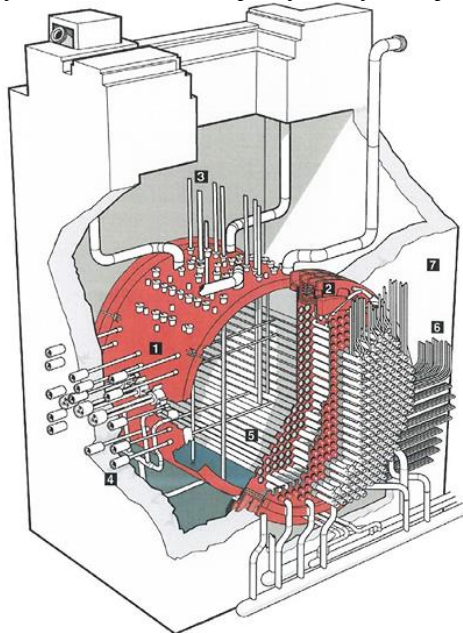


Obr. 17 Schéma elektrárne s CANDU [13]

CANDU reaktor využíva ako moderátor a chladivo ťažkú vodu. V tomto type vody sú dva normálne vodíky nahradené ich izotopickou formou, ktorá sa nazýva deutérium. Ťažká voda je oveľa drahšia ako ľahká voda, ale má výhodu, že absorbuje menej neutrónov. Táto vlastnosť má za následok možnosť udržania jadrovej reakcie bez potreby obohacovania uránového paliva. CANDU reaktor má ešte ďalšiu výhodu spojenú s palivom a tou je výmena paliva bez nutnosti odstávky reaktoru. V skutočnosti je toto nevyhnutné s prírodným uránovým palivom na udržanie elektrárne v prevádzke a žiadne dlhé odstávky reaktoru na výmenu paliva predstavujú lepší prevádzkový výkon.[14]

Palivo CANDU je naložené vo forme peletiek UO_2 v tyčiach zo zliatiny zirkónia, ktoré sú vložené horizontálne do tlakových trubiek vstupujúcich do AZ, ktoré sú zobrazené na obr. 17, na rozdiel od vertikálneho uloženia súborov v PWR a BWR. Výmena paliva sa deje vtlačaním nového súboru do tlakovej trubice, ktorá prechádza tlakovou nádobou s moderátorom (tzv. Calandria) a zároveň vytlačaním starej tyče na druhom konci.[14]

Ťažká voda v CANDU reaktore je udržiavaná pod tlakom približne 100 atmosfér a dosahuje teploty až 290 °C. Teplo je potom odovzdané v parogenerátore ľahkej vode sekundárneho okruhu a vzniknutá para poháňa turbínu, rovnako ako u PWR. Účinnosť je tiež podobná.[16] Na popis základných charakteristík je vybraný dizajn CANDU 6.



Obr. 18 Usporiadanie zostavy reaktoru CANDU 6 [27]

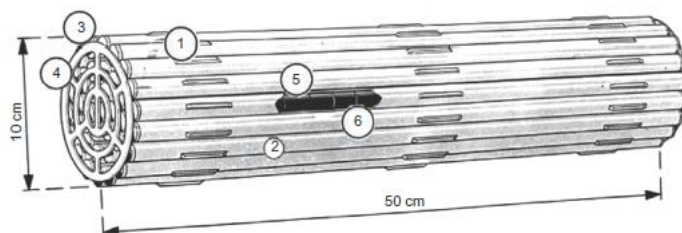
(1 – calandria, 2 – koncové tienenie calandrie, 3 – odstávkové a regulačné tyče, 4 – vstrekovanie jedu, 5 – zostava palivových trubíc, 6 – trubky napájajúcej vody, 7 – klenba)

Usporiadanie zostavy reaktoru CANDU 6 je zobrazené na obr. 18. Celá zostava je podopretá v betónovej klenbe pomocou koncových podper tienenia. Každá koncová podpera je vybavená integrovaným osadzovacím krúžkom na priame zabudovanie do koncových stien klenby calandrie. Táto klenba je šesťboká železobetónová konštrukcia podopretá na železobetónových nosných základových stenách. Vnútorý povrch klenby je pokrytý uhlíkovou oceľou, aby sa zabezpečilo nepriepustné tesnenie na zadržanie demineralizovanej ľahkej vody z chladiaceho systému tienenia. Klenba aj voda v klenbe zabezpečujú tienenie pri prevádzkovej odstávke pre najbližšie okolie. Ľahká voda zabezpečuje aj chladenie zostavy calandrie a betónu klenby.[28]

Calandria alebo reaktorová nádoba je navrhnutá ako valec na horizontálnej ose, ktorý sa skladá z prstenca a dvoch plochých podstavcov spojených 380 rúrkami zo zliatiny zirkónia.

V tejto nádobe je umiestnený ťažkovodný moderátor. Voľnú hladinu obklopuje inertná héliová atmosféra spolu so štyrmi potrubiami vybavenými súpravami trhacích diskov, ktoré zabraňujú vzniku pretlaku v moderátore. Axiálna biologická ochrana sa dosahuje použitím zmesi malých oceľových guľôčok a vody, ktoré sú umiestnené vo vnútri nádoby na oboch koncoch. Tlaková trubica je umiestnená vo vnútri kalandrovej trubice, v strede s jedným alebo viacerými obuškami a "tepelne izolovaná" vrstvou plynu (CO_2). Na konci každého kanála sa nachádza uzáver biologickej ochrany určený na zníženie priameho žiarenia vychádzajúceho z paliva, aby sa umožnil prístup do zaväzacieho priestoru počas odstavenia reaktora, a tiež tesniaci uzáver, ktorý sa dá odstrániť počas prevádzky reaktora, aby sa umožnil prístup dovnútra kanála počas výmeny paliva.[27]

Palivový súbor na obr. 19 sa skladá z 37 tyčí obsahujúcich prírodný oxid uránový vo forme peliet obalených plášťom zo zliatiny zirkónia a zostavených medzi dvoma mriežkami s koncami privarenými k zátkam tyčí. Podložky pripájané na plášť zabezpečujú, aby medzi tyčami boli medzery, a zabezpečujú oporu článku na tlakovej rúrke. Každý kanál obsahuje 12 zväzkov a reaktor CANDU 6 ich celkovo obsahuje 4560. Tento palivový súbor je krátky (50 cm), čo uľahčuje jeho výrobu a manipuláciu. Nie je umožnený žiadny expanzný objem pre štiepne plyny; tie zostávajú zachytené vo vnútri oxidových pórov a nabraté na koncoch peliet. Na vnútornom povrchu plášťa je nanosená tenká vrstva grafitu s cieľom znížiť interakciu medzi peletami a plášťom.[27]

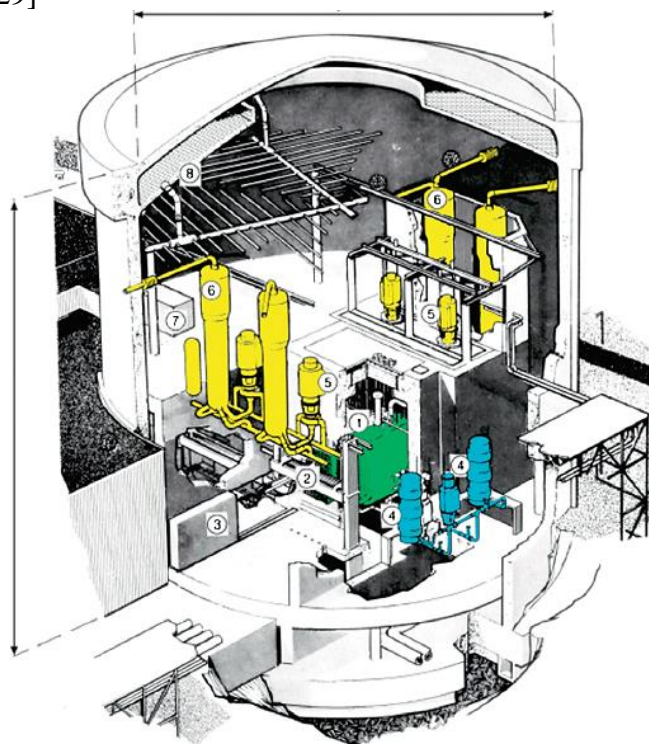


Obr. 19 Palivový súbor reaktora CANDU 6 [27]

(1 – podložka ložiska, 2 – palivový plášť, 3 – koncová medzera, 4 – koncová nosná doska, 5 – palivové pelety, 6 – vnútorná grafitová medzivrstva)

Primárny okruh, alebo aj inak nazývaný hlavný systém výmeny tepla (HSVT), je systém používaný v reaktore CANDU 6 na odvod tepla produkovaného AZ a stabilizáciu prevádzkového tlaku reaktora. V tomto systéme cirkuluje ťažká voda ako chladivo cez palivové kanály reaktora a odvádza štiepne teplo do parogenerátorov, kde toto teplo odovzdáva ľahkej vode v sekundárnom okruhu. Ochladená ťažká voda sa potom vracia do palivového kanálu cez cirkulačné čerpadlá. Hlavný systém pozostáva z 380 palivových kanálov, 4 parogenerátorov, 4 cirkulačných čerpadiel, 4 vstupných a 4 výstupných rozvodov reaktora, regulátora napätia, a potrebných potrubí, prístrojov atď. HSVT má dve slučky, z ktorých každá zahŕňa polovicu hlavného zariadenia v systéme a 190 komponentov palivového kanála. Pri prevádzke reaktora reguluje tlak v primárnom okruhu regulátor. Prívodný a vypúšťací okruh môže upravovať zásoby chladiva, keď sa počas zahrievania alebo ochladzovania reaktora mení špecifický objem chladiva. Pri nízkom výkone reaktora a počas odstavenia je kompenzátor objemu izolovaný od HSVT. Moderátor v calandrii je súčasťou uzavretého moderátorového okruhu, ktorý zahŕňa aj výmenník tepla a moderátorové čerpadlo. Výmenník tepla sa používa na odvod tepla z moderátora, ktoré pochádza predovšetkým z gama žiarenia vyžarovaného počas prevádzky. Tlak v calandrii je blízky atmosférickému tlaku a sú v nej štyri odľahčovacie potrubia, každé ukončené pretrhovacím kotúčom, ktorý sa má pretrhnúť, ak tlak v moderátore stúpne nad predpísanú hranicu.[15]

Samostatný kontajner CANDU 6, zobrazený na obr. 20, pozostáva z valcovej budovy z predpätého, dodatočne napnutého betónu s betónovou kupolou. Betón poskytuje pevnosť a tienenie; budova je obložená epoxidovým náterom na zlepšenie tesnosti. Pod vonkajšou kupolou sa nachádza vnútorná kupola s otvorom v korune. Dvojitá kupola spolu s obvodovou stenou tvorí kontajner, ktorý na vyvýšenej úrovni poskytuje zásobu vody na sprchovanie a núdzové chladenie aktívnej zóny. Pri zvýšení tlaku alebo úniku rádioaktivity do kontajneru by systém izolácie kontajneru uzavrel všetky priechody otvorené do vonkajšej atmosféry, najmä ventilačný systém kontajneru. Ide o podsystém bezpečnostného systému kontajneru. Dostatočne veľký nárast tlaku (napr. v dôsledku LOCA alebo prerušenia parného potrubia) by spustil systém sprchovania pomocou ventilov v sprchovacích hlavách. Účelom sprchovacieho postreku je potlačiť krátkodobé zvýšenie tlaku spôsobené haváriou, preto je prietok veľmi vysoký. Sprchovanie sa zapína, keď pretlak stúpne na > 14 kPa, a vypína, keď klesne na < 7 kPa, čo vedie k cyklickej prevádzke pre malé LOCA. Prevádzka redundantných sprchovacích ventilov udržiava tlak po LOCA pod projektovým tlakom v ochrannom obale.[29]



Obr. 20 Kontajner reaktoru CANDU 6 [27]

(1 - calandria, 2 - stroj na nakladanie paliva, 3 - zosilnené dvere stroja na palivo,
4 - chladiaci systém moderátora, 5 - primárne čerpadlo, 6 - parogenerátor,
7 - primárny kompenzátor objemu, 8 - nádrž na rozprašovacíu vodu.)

LOCA zodpovedá v prípade CANDU primárne prasknutiu studeného kolektora, najväčšieho potrubia primárneho systému. Po zistení havárie dochádza k automatickej izolácii všetkých spojov medzi dvoma primárnymi slučkami. Havarijné vstrekovanie vody pochádza z nádrže umiestnenej pod kupolou kontajneru. Táto ľahká voda sa v prvej fáze vstrekuje do všetkých kolektorov, pričom druhá fáza pozostáva z izolácie porušeného kolektora. Systémy sú veľmi podobné systémom PWR: vysokotlakové vstrekovanie začínajúce z akumulátorov kalibrovaných na 5 MPa, strednotlakové vstrekovanie z nádrže umiestnenej v kontajneru, vstrekovanie pod nízkym tlakom recirkuláciou vody získanej z vrtu v kontajneru.[27]

3 Malé modulárne reaktory

Malé modulárne reaktory (ďalej MMR) sú definované ako jadrové reaktory o výkone od 10 do 300 MW_e, ktoré sú konštruované pomocou modulárnej technológie s cieľom využiť sériovú výrobu jednotlivých modulov. Tento koncept vychádza zo snahy razantného zníženia investičných nákladov na základe zmenšenia veľkosti reaktorov, prenesenie podstatnej časti výroby reaktorov do výrobných závodov a sériovej výroby reaktorových komponent. Továrnska výroba tiež poskytuje záruku vysokej kvality a spoľahlivosti zariadení a tým zníženie prevádzkových nákladov. Dôležitým rysom MMR bude pasívna bezpečnosť, ktorá by mala prakticky vylúčiť jadrové havárie. MMR sú často založené na nových pasívne bezpečných konceptoch reaktorov IV. generácie a tie, ktoré vychádzajú z prostého zmenšenia stávajúcich veľkých reaktorov, majú prepracované a zdokonalené systémy pasívnej ochrany. Dizajn reaktorov by mal zaistiť aj čo najdlhšiu prevádzku bez nutnosti výmeny paliva s ohľadom na limit maximálneho obohatenia paliva 20 % ²³⁵U.[30]

MMR sú plánované na špecifické energetické a elektrické trhy, kde by veľké reaktory neboli realizovateľné. Kľúčovými hnacími silami vývoja SMR je naplnenie potreby flexibilnej výroby energie pre širší okruh používateľov a aplikácií, nahradenie starnúcich fosílnych blokov, zvýšenie bezpečnosti a lepšia ekonomická dostupnosť. MMR by mohli poskytovať kombinovanú výrobu elektriny a tepla pre obytné oblasti, výrobu vodíka, odsolovanie pre oblasti s malou elektrickou sieťou, vzdialené oblasti a oblasti bez elektrickej siete a umožniť hybridné jadrovo-obnoviteľné energetické systémy. Medzi ďalšie zaujímavé využitie patrí integrácia vysokoteplotných reaktorov do priemyselných podnikov ako zdroj vysokopotenciálneho tepla.[30];[31]



Obr. 21 Projekty MMR hodnotené NEA [32]

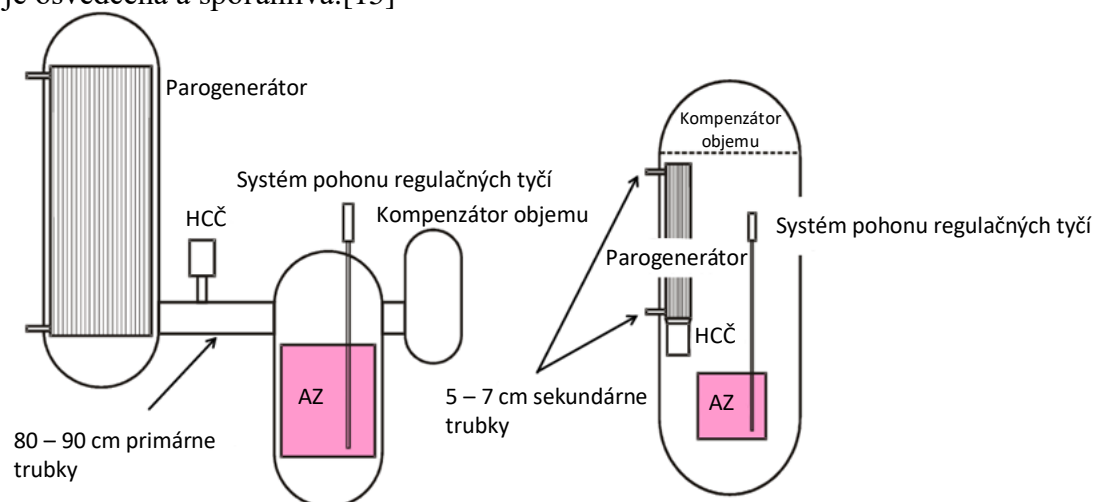
V súčasnosti je v 18 štátoch viac ako 80 dizajnov MMR, ktoré sú v rôznych fázach vývoja a nasadenia. Tieto dizajny sa líšia svojimi cieľovými aplikáciami, konštrukčnými vlastnosťami, bezpečnostnými systémami, očakávanými prevádzkovými výkonmi, prístrojmi a riadiacimi systémami, elektrickými systémami a usporiadaním elektrárne. Otázky palivového cyklu a nakladania s odpadom sú kľúčové pre MMR a najmä pre nové krajiny. Súhrnný materiál NEA (Jadrovej energetickej agentúry OECD) zachytáva pokroky hlavných projektov MMR, zobrazených na obr. 21, v 6 kľúčových oblastiach: licencovanie, umiestnenie, financovanie, dodávateľský reťazec, spolupráca a palivo. V každej oblasti NEA definuje objektívne kritériá na posúdenie významného pokroku smerom k prvému nasadeniu a komerčnej realizácii. Kritériá pokroku sa uplatňujú na základe overiteľných verejných zdrojov. Väčšina MMR je

vo fáze koncepčného návrhu a len niektoré boli schválené alebo sú v procese schvaľovania príslušnými regulačnými orgánmi. Iba niekoľko MMR bolo doteraz v záverečnej fáze výstavby a počiatočnej prevádzkovej fáze. K tým patrí plávajúci energetický MMR Akademik Lomonosov KLT4S, ktorý vyvinula Ruská federácia so začiatkom komerčnej prevádzky v máji 2020 s dvoma blokmi. Okrem toho nedávno začal komerčnú prevádzku aj vysokoteplotný plynom chladený HTR-PM vyvinutý Čínou. CAREM25 v Argentíne je vo výstavbe a očakáva sa, že prvú kritickosť dosiahne v roku 2026. Výstavba ACP100 v Číne sa začala v júli 2021 a jej komerčná prevádzka by sa mala začať koncom roka 2026. Výstavba BREST-OD-300 v Ruskej federácii sa začala v júni 2021 a jej ukončenie sa plánuje v roku 2026.[15];[31];[32]

Správa IAEA z roku 2022 vymedzila šesť základných kategórií alebo typov koncepcií MMR. Sú to pozemné vodou chladené MMR, námorné vodou chladené MMR, vysokoteplotné plynom chladené MMR, MMR s rýchlymi neutrónmi, MMR chladenými tekutými soľami a mikroreaktory (podkategória MMR s výkonom do 10 MW_e). Vo väčšine prípadov sú vodou chladené MMR integrálneho typu PWR (iPWR) a očakáva sa, že budú demonštrovať podobnú technológiu ako existujúca flotila reaktorov. MMR typu BWR sa bude ľahšie konštruovať a bude mať vyššiu tepelnú účinnosť, ale budú náročné na schválenie systému a licencovanie. Námorné vodou chladené MMR budú zvyčajne typu PWR, aby sa predišlo problémom pri prevádzke počas ponorenia v dôsledku kolísania frakcie prázdnoty a reaktivity. Plynom chladené MMR sú vynikajúcimi kandidátmi na priemyselné procesné tepelné aplikácie a nie len na výrobu elektrickej energie. Reaktory MMR s rýchlymi neutrónmi sú dominované reaktormi chladenými tekutými kovmi na základe kompaktnosti a vyššieho prenosu tepla chladiacim médiom. Ich nasadenie bude náročné vzhľadom na technologickú pripravenosť a dostupnosť v priemysle. MMR s roztavenými soľami môžu byť dobrým kandidátom na inovatívny dizajn, ale materiály reaktora a správanie paliva a chladiča budú pravdepodobne predstavovať výzvy.[15] Ďalšie podkapitoly sú zamerané na MMR typu PWR, BWR.

3.1 Pozemné vodou chladené MMR typu PWR

Rovnako ako u veľkých reaktorov, aj pri MMR má najväčšie zastúpenie koncepcia PWR. Keďže technológia reaktorov chladených vodou je v súčasnej flotile reaktorov dobre vyvinutá, táto technológia je osvedčená a spoľahlivá.[15]

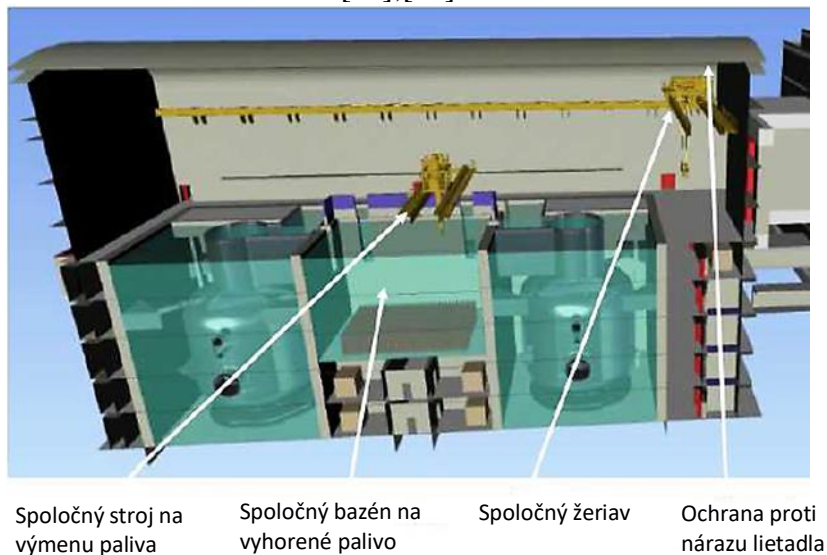


Obr. 22 Porovnanie slučkového PWR (vľavo) a integrálneho PWR (vpravo) zobrazujúce elimináciu veľkých potrubí primárneho chladiča. Prevzaté z [33] a upravené

Ako bolo spomínané v predchádzajúcej kapitole, jeden z dizajnov MMR typu PWR je integrálny PWR. To znamená, že komponenty primárneho okruhu sú umiestnené v jednej nádobe. Ide o kritický prvok zjednodušenia konštrukcie, ktorý má zásadný význam

pre zlepšenie bezpečnosti, ako aj pre potenciál ekonomickej konkurencieschopnosti. Je to tiež základná vlastnosť, ktorá udržiava relatívne malý výkon reaktora z dôvodu obmedzeného objemu v nádobe. Integrálna konštrukcia eliminuje scenár havárie s vážnymi následkami, ktorý predstavuje havária so stratou chladenia pri pretrhnutí veľkého potrubia, a výrazne znižuje počet a veľkosť prienikov cez tlakovú nádobu reaktora. V iPWR je maximálna veľkosť potrubia prechádzajúceho cez reaktorovú nádobu s priemerom 5 - 7 cm, čo je potrebné pre vstup napájajúcej vody a výstup pary z vnútorného parogenerátora. To je v protiklade s priemerom potrubia 80 - 90 cm vo veľkom PWR, ktoré spája nádobu reaktora s vonkajšími parogenerátormi.[33] Porovnanie týchto dvoch systémov je zobrazené na obr. 22.

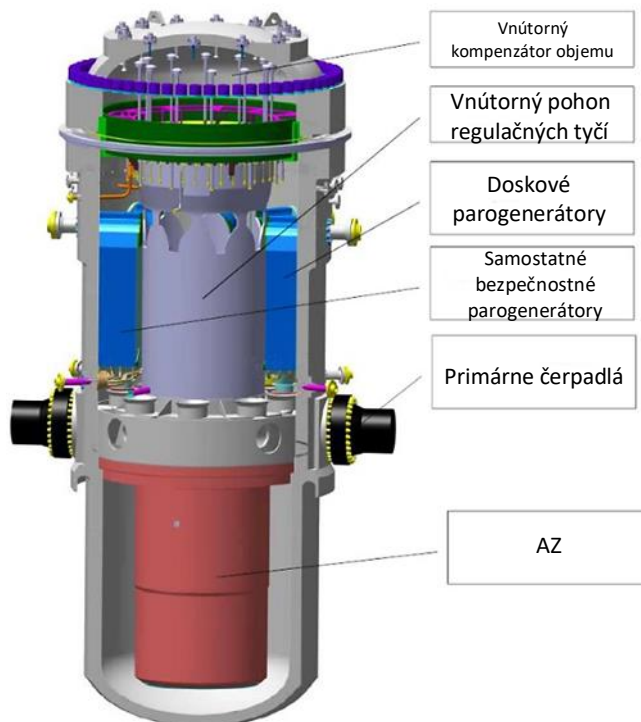
Na popis základných charakteristík MMR typu PWR bol vybraný dizajn reaktoru NUWARD SMR. NUWARD SMR je jadrová elektrárňa pozostávajúca z dvoch nezávislých malých reaktorov GEN III+ v jednej budove, čo možno pozorovať na obr. 23, s celkovým tepelným výkonom 1080 MW_t ($2 \times 540 \text{ MW}_t$) a elektrickým výkonom 340 MW_e ($2 \times 170 \text{ MW}_e$). Spoločnosť EDF začala s vývojom v roku 2017 s príspevom veľkých európskych spoločností: Francúzska spoločnosť TechnicAtome, Naval Group, Framatome, CEA a Tractebel Engineering. Konceptný návrh (conceptual design) bol dokončený začiatkom roka 2023, po ktorom sa začala fáza základného návrhu (basic design). Od roku 2026 sa má vypracovať podrobný návrh (detail design) a majú sa začať práce na prvotnom licencovaní, aby sa v roku 2030 začala výstavba jeho prvého bloku vo Francúzsku (FOAK). Tento osvedčený a na skúsenostiach založený prístup k vývoju projektu by sa mohol ukázať ako realistickejší, a teda dôveryhodnejší než marketingové oznámenia niektorých konkurenčných, najmä amerických a britských poskytovateľov technológie MMR. Naopak, strategickou ambíciou spoločnosti NUWARD SMR je vyvinúť riešenie vyrobené v Európe, európskymi spoločnosťami a založené na európskej technológii. V rámci možných využití NUWARD SMR kladie spoločnosť EDF dôraz nie len na výrobu elektriny, ale aj na kogeneračnú výrobu elektriny a tepla, ako aj možnosť výroby dekarbonizovaného vodíka.[34];[35]



Obr. 23 Konfigurácia dvoch reaktorov NUWARD v jednej budove jadrovej elektrárne.
Prevzaté z [31] a upravené

Tlaková nádoba reaktora má priemer 5 m, výšku 15 m a hmotnosť 310 ton. Spolu s rozmiestnením vnútorných zariadení sú navrhnuté tak, aby uľahčovali lepšiu výrobu priamo vo výrobnom závode. Špecifické konštrukčné úsilie sa vynaložilo na zníženie počtu potrubí pripojených k tlakovej nádobe s cieľom obmedziť maximálnu veľkosť LOCA na priemer 30 mm. Keďže veľkosériová výroba je kľúčovým faktorom celého projektu NUWARD, veľkosť

tlakovej nádoby reaktora bola zvolená podobne ako priemerná nádoba reaktora PWR s výkonom 900 MW_e. Táto voľba umožnila získať veľký výber vhodných dodávateľov, čím sa znížilo riziko obstarávania takejto nádoby. Okrem toho použitie vnútorného mechanizmu pohonu regulačných tyčí a elektrických priechodov pre prístroje a ohrievače kompenzátoru objemu podstatne zjednodušuje výrobu veka nádoby. Počas dlhodobých odstávok sa všetky vnútorné komponenty v nádobe ľahko vyberú z nádoby a nahradia sa obnovenými (vybranými v súbore spoločných náhradných komponentov). Demontované komponenty sa následne kontrolujú, opravujú a udržiavajú mimo kritickej doby odstávky. Tento proces znižuje riziká oneskorenia počas odstávok v prospech prevádzkyschopnosti reaktora.[31];[36] Zjednodušený prierez tlakovou nádobou je zobrazený na obr. 24.



Obr. 24 Prierez tlakovou nádobou reaktoru NUWARD™. Prevzaté z [36]a upravené

Referenčná AZ je založená na osvedčených palivových súboroch s tyčami s UO₂ (obohatenie < 5 % ²³⁵U) a ich usporiadaní 17×17 v každom súbore, používaných v prevádzkovej flotile reaktorov PWR, so skrátenou výškou. Vzhľadom na konštrukciu bez bóru sa používajú rôzne obohatenia ²³⁵U a spáliteľné absorbéry. Celkovo sa týchto súborov nachádza v AZ 76. Interval výmeny paliva je 24 mesiacov pre polovicu AZ.[31]

Chladiaci systém reaktora NUWARD využíva inovatívnu technológiu ôsmich kompaktných doskových parogenerátorov. Šesť zabezpečuje paru na pohon turbín, zatiaľ čo dva nezávislé zabezpečujú funkciu bezpečnostného chladenia v prípade nehody alebo havárie. Tie sú priamo spojené s reaktorom, čím sa eliminuje potreba externých primárnych slučiek. Vďaka tomu je konštrukcia vysoko účinná s vysokým pomerom tepelného výkonu na objem. Celková veľkosť chladiaceho systému reaktora sa tak vzhľadom na tepelný výkon reaktora výrazne znižuje. Primárny chladiaci prietok je vnútorný, nútený 6 uzavretými čerpadlami, ktoré sú horizontálne namontované na tlakovej nádobe a umiestnené pod parogenerátormi v studenej vetve, aby sa dosiahli účinné hydraulické podmienky. Hydraulické komponenty sú pripojené k spodnej časti nádoby a sú navrhnuté na optimálnu homogenizáciu prietoku a teploty chladiacej kvapaliny reaktora pred vstupom do aktívnej zóny. Teploty chladiča na horúcej a studenej vetve sú 280 °C a 307 °C s operačným tlakom 15 MPa. Veľký objem chladiacej vody

reaktora a velký objem kompenzátoru objemu poskytují rezervy pro prevádzkové prechodné javy, ako aj pre bežnú každodennú prevádzku reaktora. Vďaka použitiu konštrukcie bez bóru sa počas celého výrobného cyklu nevyžaduje žiadne riadenie primárnej vody. Okrem toho primárny pomocný systém reaktora integruje veľkú nízkotlakovú nádrž na vodu, v ktorej sa uchováva expanzná voda. Tieto kombinované vlastnosti drasticky znižujú objem primárnych odpadových vôd.[31];[35];[36]

Z hľadiska jadrovej bezpečnosti špecifický dizajn NUWARD™ zahŕňa riadenie všetkých situácií projektového základného stavu prostredníctvom pasívnych systémov bez potreby akéhokoľvek externého elektrického napájania a je sebestačný na vnútorný konečný chladič (vodnú stenu) počas obdobia odkladu dlhšieho ako 3 dni. Ako tretiu ochrannú bariéru využíva oceľový kontajment na obr. 25, ktorý je ponorený vo vode. Typická veľkosť kontajmentu je 15 m na priemer a 16 m na výšku. Konštrukčný tlak je približne 1,0 MPa, ale musí byť menší ako táto hodnota. Minimalizovaná veľkosť prerušenia LOCA a účinný systém pasívneho odvodu tepla vedú k obmedzenému vrcholovému tlaku vo vnútri oceľového kontajmentu, ktorý je pasívne ochladzovaný okolitou vodou. Voda v nádrži funguje aj ako bariéra proti úniku rádioaktívnych látok. V kombinácii s pasívnym systémom primárneho odvodu tepla toto riešenie tiež umožňuje, aby korium zostalo vnútri reaktorovej nádoby v prípade roztavenia AZ. Medzi ďalšie bezpečnostné systémy patria nízkotlakové zásobníky vody na použitie v prípade LOCA, vysokotlakový systém vstrekovania bórovej vody pre prípad náhlych zmien reaktivity, pasívne absorbéry vodíka alebo systém plynného dusíka na zníženie pravdepodobnosti vznietenia vodíka aj v prípade havárie.[31];[35];[36]



Obr. 25 Oceľový kontajment reaktoru NUWARD™ [36]

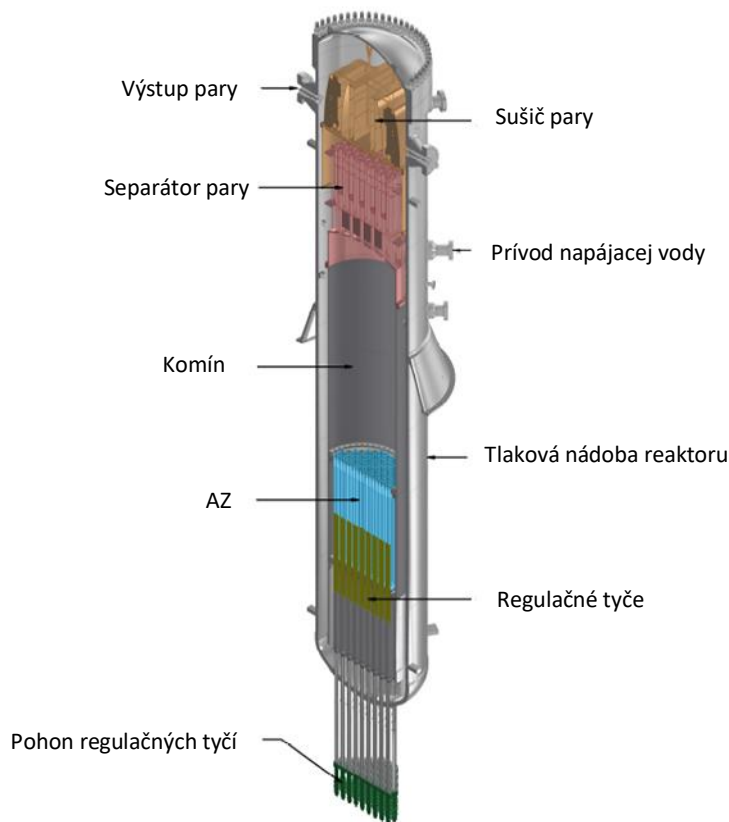
3.2 Pozemné vodou chladené MMR typu BWR

Pozemné vodou chladené MMR typu BWR sú druhý typ vodou chladeného MMR, ktorý funguje na rovnakom princípe ako veľké BWR s menšími úpravami v primárnom okruhu. Na popis základných charakteristík bol vybraný dizajn reaktoru BWRX-300.

BWRX-300 spoločnosti GE Hitachi Nuclear Energy je MMR s chladený vodou s prirodzenou cirkuláciou s výkonom 300 MWe, ktorý využíva jednoduché bezpečnostné systémy riadené prirodzenými javmi. Je to desiatu generácia BWR a predstavuje najjednoduchšiu, ale zároveň najinovatívnejšiu konštrukciu BWR. BWRX-300 je evolúciou reaktora ESBWR s výkonom 1520 MWe. Využíva dobre definovaný, spoľahlivý proces riadený postupmi na usmernenie nákladovo efektívnych návrhových rozhodnutí. Projekt BWRX-300 je možné nasaďiť v blízkej budúcnosti, pričom hlavný blok plánuje uviesť do komerčnej prevádzky v roku 2028. Využíva stratégiu zachovania chladiacej kvapaliny na zmiernenie

LOCA, čo vedie k výraznému zjednodušeniu konštrukcií a systémov so zvýšenou bezpečnosťou. Je navrhnutý tak, aby poskytoval čistú a flexibilnú výrobu energie, ktorá je cenovo konkurencieschopná s elektrárnami na zemný plyn. Cieľové aplikácie zahŕňajú výrobu elektrickej energie pri základnom zaťažení, výrobu elektrickej energie po zaťažení v rozsahu od 50 do 100 % výkonu a diaľkové vykurovanie.[31];[37]

Zostava tlakovej nádoby reaktora BWRX-300, znázornená na obr. 26, pozostáva z tlakovej nádoby, odnímateľného veka a jeho príslušenstva, podpier a izolácie, a vnútorných komponent reaktora uzavretých nádobou. Medzi hlavné vnútorné komponenty patria: AZ (palivo, kanály, regulačné tyče a prístroje), nosné a vyrovnávacie konštrukcie AZ (plášť, podpera plášťa, horné vedenie, nosná doska AZ, vodiaca rúrka regulačných tyčí, kryty pohonu regulačných tyčí a kryté držiaky paliva), komín, komínová hlava a zostava odlučovača pary, zostava sušiča pary, rozprašovače napájajúcej vody, vodiace rúrky v aktívnej zóne.[37]

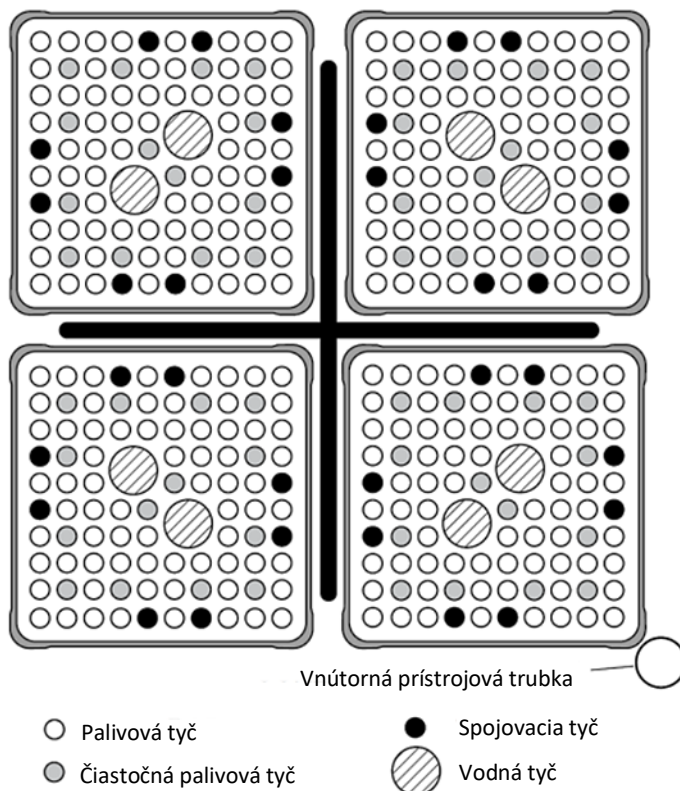


Obr. 26 Tlaková nádoba reaktoru BWRX-300 a jej vnútorné časti. Prevzaté z [31] a upravené

Reaktorová nádoba je vertikálna valcová tlaková nádoba pozostávajúca zo zvarovaných prstencov a valcovaného plechu s odnímateľným horným vekom, prírubami, tesneniami a skrutkami. Súčasťou nádoby sú aj priechody, dýzy a podpera plášťa. Hmotnosť nádoby je 485 t, vnútorný priemer 4 m, hrúbka steny s opláštením približne 136 mm a výška 27 m od vnútornej strany spodného čela (nulová výška) po vnútornú stranu horného veka. Spodná časť aktívnej palivovej zóny je vo výške 5,2 m od nulovej výšky a AZ je vysoká 3,8 m. Relatívne vysoká nádoba umožňuje prirodzeným cirkulačným hnacím silám vytvárať hojný prietok chladiacej kvapaliny v AZ.[37];[38]

Dizajn AZ reaktoru BWRX-300 pozostáva z 240 palivových zväzkov. Súčasný dizajn paliva BWRX-300 je založený na produktovej rade GNF2, pretože poskytuje nízky hydraulický odpor, ktorý je žiaduci pre prirodzenú cirkuláciu. Konštrukcia GNF2 obsahuje sústavu 10×10 78 palivových tyčí plnej dĺžky, 14 tyčí čiastočnej dĺžky, ktoré pokrývajú približne dve tretiny

AZ, a dve veľké centrálné vodné tyče. Hustota výkonu AZ BWRX-300 je nižšia, aby sa zachovala väčšia tepelná hydraulická stabilita. Súbor palivového zväzku drží pohromade osem spojovacích tyčí umiestnených po obvode palivového zväzku (usporiadanie tyčí v zväzkoch a orientácia zväzkov spolu s regulačnou tyčou sú zobrazené na obr. 27). Každá spojovacia tyč má závitovú spodnú koncovú zátku, ktorá sa zaskrutkuje do spodnej spojovacej dosky, a závitovú hornú koncovú zátku, ktorá prechádza cez otvor v hornej spojovacej doske a je upevnená maticou. Pod maticou spojovacej tyče je podložka s poistným výstupkom, ktorá zabraňuje otáčaniu spojovacej tyče a matice. Tyče s čiastočnou dĺžkou majú aj spodné koncové zátky, ktoré sú navlečené do spodnej spojovacej dosky, aby sa zabránilo pohybu tyčí počas prepravy alebo manipulácie so zväzkom orientovaným horizontálne.[37]



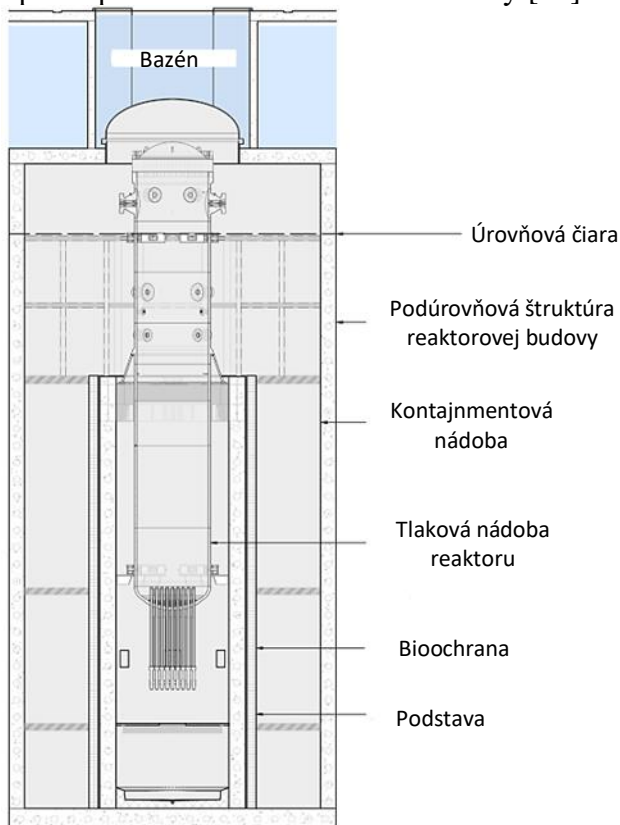
Obr. 27 Usporiadanie palivových kaziet a regulačnej tyče. Prevzaté z [37] a upravené

Plášť a komín tvoria valcovú zostavu z nehrdzavejúcej ocele, ktorá poskytuje prepážku na oddelenie vzostupného toku chladiacej kvapaliny cez AZ od zostupného recirkulačného toku. Objem uzavretý touto zostavou je charakterizovaný tromi oblasťami. Plášť poskytuje vodorovnú oporu pre aktívnu zónu. Horné vedenie sa nachádza v hornej časti AZ reaktora. Poskytuje bočnú oporu pre palivové súbory, jadrové prístroje, spúšťacie zdroje a regulačné tyče. Horné vedenie je medzi plášťom a komínovým valcom a tieto tri časti sú navzájom priskrutkované. Komín je dlhý valec pripevnený k hornému vedeniu, ktorý podopiera zostavu odlučovača pary. Navyše poskytuje dodatočnú výšku spádového potrubia pre hnaciu výšku potrebnú na udržanie prirodzeného cirkulačného toku. Komín tvorí prstenec oddeľujúci podchladený recirkulačný prúd smerom nadol od vzostupného prúdu zmesi pary a vody vystupujúceho z AZ. Komínový valec je v spodnej a hornej časti vybavený prírubami na pripevnenie k hornému vedeniu a komínovej hlave.[38]

Hlava komína a zostava odlučovačov pary tvoria hornú časť priestoru na odvod zmesi z aktívnej zóny. Vypúšťací priestor poskytuje zmiešavaciu komoru na homogenizáciu zmesi pary a vody pred jej vstupom do odlučovačov pary. Jednotlivé axiálne prietokové odlučovače pary z nehrdzavejúcej ocele sú podopreté a pripevnené k hornej časti stojanových rúrok, ktoré

sú privarené k hlave komína. V každom separátore zmes pary a vody stúpajúca cez stojanovú rúru prechádza cez lopatky, ktoré oddeľujú vodu od pary. Oddelená voda prúdi zo spodnej časti odlučovača pary do spádovej oblasti.[38]

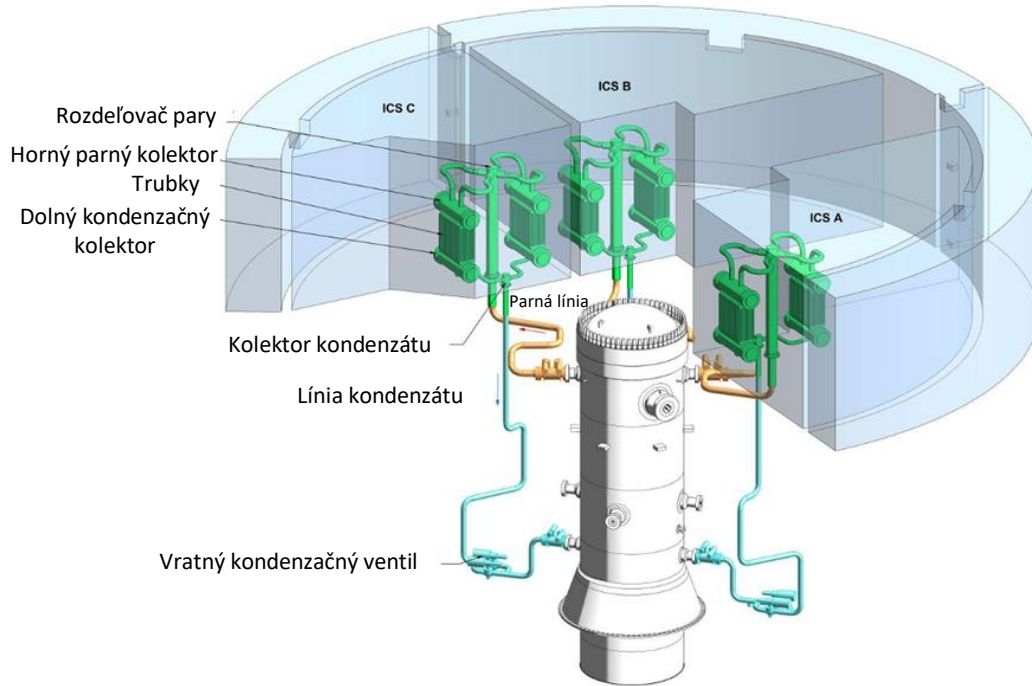
Zostava sušiča pary dokončí úlohu odstránenia vlhkosti z pary pred jej výstupom z reaktora. Sušič pary je podopretý sústavou štyroch držiakov rovnomerne rozmiestnených okolo vnútornej steny plášťa nádoby. Podporný prstenec sušiča spočíva na týchto držiakoch. Ďalšie podperné držiaky sú namontované vo vnútri veka nádoby na obmedzenie vertikálneho pohybu sušiča pri seizmickom alebo dynamickom zaťažení. Obsah vlhkosti je nižší ako 0,1 % pri 100 % výkone reaktora, keď para opúšťa reaktor na ceste do turbíny.[38]



Obr. 28 Kontajment reaktoru BWRX-300. Prevzaté z [38] a upravené

Primárny ochranný systém BWRX-300 uzatvára reaktorovú nádobu s niektorými jeho súvisiacimi systémami a komponentami, poskytuje radiačné tienenie a slúži ako hranica pre rádioaktívnu kontamináciu. Minimalizácia potenciálnych LOCA a použitie suchého kontajnementu eliminuje potrebu potláčacieho bazéna. BWRX-300 využíva tradičný kontajnementový systém, zobrazený na obr. 28, na konečné zadržanie rádioaktívnych materiálov pre rôzne postulované udalosti. Kontajnement BWRX-300 je vertikálny valec s priemerom približne 17,5 metra a výškou 38 metrov. Pozostáva z kompozitnej kontajnementovej nádoby z oceľových dosiek, základovej dosky a hornej dosky a z oceľovej uzatváracieho čela kontajnementu. Konštrukcia kontajnementu je úplne uzavretá v hlboko zapustenej reaktorovej budove a zahŕňa poklopy pre personál/prístroje, priechody kontajnementu a ďalšie bezpečnostné komponenty. Konštrukcia primárneho kontajnementu využíva počas väčšiny prevádzkových režimov atmosféru kontajnementu s inertným dusíkom. Inertná atmosféra zabezpečuje zriedenie vodíka a kyslíka v plynách, ktoré sa môžu uvoľniť v stave po havárii rádiolytickým rozkladom vody a uvoľneného vodíka z reakcie vody a palivového plášťa (zirkónia) počas stavu ťažkej havárie. Toto zriedenie poskytuje ochranu pred vznietením vodíka alebo výbuchom. Konštrukcia s inertnou atmosférou má ďalšiu výhodu v minimalizácii dlhodobej korózie

a degradácie kontajmentovej nádoby a obsiahnutých komponentov obmedzením vystavenia kyslíku počas prevádzkovej životnosti elektrárne.[38]



Obr. 29 Systém izolačného kondenzátora. Prevzaté z [38] a upravené

Pre BWRX-300 existujú dva pasívne chladiace systémy. Prvým je systém izolačného kondenzátora (isolation condenser system/ ICS), ktorý odvádza teplo z rozpadu po akejkoľvek izolácii reaktora počas výkonovej prevádzky. Odvádzanie rozpadového tepla obmedzuje ďalšie zvyšovanie tlaku pary a udržiava nízky tlak v reaktorovej nádobe. ICS na obr. 29 sa skladá z troch nezávislých línií, z ktorých každá obsahuje výmenník tepla, ktorý je ponorený vo vyhradenom bazéne s vodou a je spojený s RPV potrubím na prívod pary a spätným potrubím kondenzátu. Komplex bazénov ICS predstavuje konečný chladič na ochranu AZ reaktora, keď nie je k dispozícii hlavný kondenzátor a reaktorová nádoba sa izoluje. Každý ICS má kapacitu približne 33 MW. Keď je ICS v prevádzke, odoberá teplo z pary, ktoré sa odovzdáva výmenníkom tepla vode v bazéne. Ohriata/ vyparujúca voda v bazéne sa vypúšťa do atmosféry. Výmenníky tepla sú umiestnené vo výške nad zdrojom pary, čo spôsobuje prirodzenú cirkuláciu, ktorá je poháňaná pasívne gravitačnou silou. Pasívny chladiaci systém kontajmentu (passive containment cooling system/ PCCS) je pasívny systém, ktorý odvádza teplo z rozpadu a udržiava kontajment v rámci jeho tlakových limitov pre projektové havárie. Pozostáva z troch nízkotlakových, úplne nezávislých výmenníkov tepla zavesených v kontajmentovej nádobe. Teplo v nádobe sa odovzdáva do bazéna reaktora, nachádzajúcim sa nad horným čelom, ktorý je počas normálnej prevádzky naplnený vodou. Bazén reaktora sa vypúšťa do atmosféry. Prevádzka PCCS si nevyžaduje žiadne snímacie, riadiace, logické ani energeticky ovládané zariadenia. Kondenzátory PCCS sú uzavretou slučkou, ktorá je neoddeliteľnou súčasťou tlakovej hranice kontajmentu. Keďže medzi kondenzátormi PCCS a suchou komorou nie sú žiadne izolačné ventily, sú vždy v pohotovostnom režime.[37];[38]

4 Porovnanie MMR s veľkými reaktormi

Táto kapitola je zameraná na porovnanie veľkých reaktorov s MMR na základe vybraných charakteristík jednotlivých koncepcií (dizajnov) popísaných vrátane citácií v kapitolách 2 a 3 s výnimkou kapitoly 4.5. Porovnávané budú vždy len koncepcie rovnakého typu, s výnimkou PHWR. V tomto prípade momentálne neexistujú podrobnejšie informácie o koncepcii PHWR MMR a preto bude z porovnávania vynechaná. Vybrané časti sú: palivo a AZ, tlaková nádoba reaktoru, primárny okruh, kontajment a aktívna/pasívna bezpečnosť, a využitie reaktorov v EÚ.

4.1 Palivo a AZ

Ako prvá vybraná porovnávacía časť je zvolené palivo a AZ. Z tab. 6 možno pozorovať, že NUWARD s menším výkonom využíva menej palivových súborov vo svojej AZ a teda aj potreba uránu na prevádzku tohto reaktoru bude menšia. NUWARD je reaktor PWR západnej koncepcie, preto majú palivové súbory rovnaký tvar ako u EPR a zároveň aj rozloženie tyčí v tejto štvorcovej mreži je rovnaké. Ďalší zaujímavý spoločný parameter je použitie spáliteľných absorbérov na reguláciu výkonu na rozdiel od VVER 1000. Bližšie informácie o výške a priemere palivových tyčí a počte regulačných tyčí však momentálne nie sú dostupné.

Tab. 6 Porovnanie charakteristík AZ reaktorov VVER 1000 a EPR s NUWARD

charakteristika	rozmer	VVER 1000	EPR	NUWARD
počet palivových kaziet/súborov	-	163	241	76
tvar palivových kaziet/súborov	-	šesťuholník	štvorec	štvorec
počet palivových tyčí v kazete/súbore	-	312	265	(17 x 17)
priemer palivovej tyče	mm	9,1	10,6	-
výška palivovej tyče	m	3,53	4,2	-
palivo	-	UO ₂	UO ₂ MOX	UO ₂
obohatenie ²³⁵ U	%	1,6 - 3,6	< 5	< 5
počet regulačných kaziet/súborov	-	61	89	-
spáliteľný absorbér	-	nie	áno	áno

Varné reaktory BWR/6 a BWRX-300 s charakteristikami v tab. 7 majú rovnaký tvar a výšku palivových kaziet, avšak sa výrazne líšia v ich počte a samotnom vnútornom usporiadaní. BWR/6 má v jednej kazete len palivové tyče plnej dĺžky, no BWRX-300 má aj druhé tyče s čiastočnou dĺžkou, to znamená, že celkový počet palivových tyčí sa v jednej kazete líši. Typ regulačných tyčí je u oboch reaktorov rovnaký, no pri BWRX-300 momentálne nie sú bližšie informácie o ich počte.

Tab. 7 Porovnanie charakteristík AZ reaktorov BWR/6 s BWRX-300

charakteristika	rozmer	BWR/6	BWRX-300
počet palivových kaziet/súborov	-	750	240
tvar palivových kaziet/súborov	-	štvorec	štvorec
počet palivových tyčí v kazete/súbore	-	54	78 plných 14 čiastočných
priemer palivovej tyče	mm	12	-
výška palivovej tyče	m	3,8	3,8
palivo	-	UO ₂	UO ₂
obohatenie ²³⁵ U	%	1,7 - 2	-
počet regulačných tyčí	-	72	-
tvar regulačných tyčí	-	kríž	kríž

4.2 Tlaková nádoba reaktoru

Druhá vybraná porovnávacía časť je tlaková nádoba reaktoru. Z tab. 8 je možno pozorovať zaujímavý fakt, a to že napriek nižšiemu výkonu reaktoru NUWARD je jeho tlaková nádoba väčšia na výšku aj na priemer v porovnaní s tlakovými nádobami reaktorov VVER 1000 a EPR a samotná hmotnosť je s VVER 1000 takmer rovnaká. Tento fakt je daný samotným usporiadaním primárneho chladiaceho okruhu reaktoru. Integrovaný dizajn predstavuje nutnosť väčších rozmerov tlakovej nádoby, aby sa do jej objemu zmestili všetky primárne komponenty.

Tab. 8 Porovnanie charakteristík tlakovej nádoby reaktorov VVER 1000 a EPR s NUWARD

charakteristika	rozmer	VVER 1000	EPR	NUWARD
výška tlakovej nádoby	m	10,9	13	15
priemer tlakovej nádoby	m	4,15	4,87	5
hrúbka stien	mm	192,5	250	-
hmotnosť tlakovej nádoby	t	320	520	310
návrhový tlak	MPa	17,6	17,6	-

Tlaková nádoba reaktoru BWRX-300 je v porovnaní s BWR/6 oveľa vyššia na základe údajov v tab. 9 a je to rovnako ako u reaktoru NUWARD spôsobené samotným dizajnom primárneho okruhu. Nutnosť komínu na udržanie prirodzenej cirkulácie chladiča spôsobuje zvýšenie tlakovej nádoby reaktoru.

Tab. 9 Porovnanie charakteristík tlakovej nádoby BWR/6 s BWRX-300

charakteristika	rozmer	BWR/6	BWRX-300
výška tlakovej nádoby	<i>m</i>	21	27
priemer tlakovej nádoby	<i>m</i>	5,5	4
hrúbka stien	<i>mm</i>	150	136
hmotnosť tlakovej nádoby	<i>t</i>	-	485

4.3 Primárny okruh

Tretia porovnávacía časť je zameraná na primárny chladiaci okruh reaktorov s parametrami v tab. 10. Ako bolo spomínané v predchádzajúcej kapitole, reaktor NUWARD využíva integrálny typ chladiaceho okruhu v porovnaní s klasickým slučkovým dizajnom používaným v reaktoroch VVER 1000 a EPR. Zároveň tento dizajn využíva nový typ vertikálneho doskového parogenerátoru oproti doteraz používaným trubkovým. Bližšie informácie o cirkulačných čerpadlách a potrebnom prietoku v jednej vetve zatiaľ nie sú známe, no je možné odhadnúť na základe výrazne nižšieho tepelného výkonu reaktoru NUWARD, že potrebný prietok bude oveľa menší a teda aj menšie potrebné príkony cirkulačných čerpadiel. Ďalší významný rozdiel je v umiestnení kompenzátoru objemu, ktorý sa nachádza v hornej časti tlakovej nádoby reaktoru NUWARD v porovnaní s pripojením na jednej vetve chladiacej slučky pri VVER 1000 a EPR.

Tab. 10 Porovnanie charakteristík primárneho okruhu VVER 1000 a EPR s NUWARD

charakteristika	rozmer	VVER 1000	EPR	NUWARD
typ primárneho okruhu	-	slučkový	slučkový	integrálny
tepelný výkon	MW_t	3000	4500	540
prietok chladiva (jedna vetva)	m^3/h	21200	28330	-
teplota chladiva na vstupe do AZ	$^{\circ}C$	290	295,9	280
teplota chladiva na výstupe z AZ	$^{\circ}C$	320	327,2	307
tlak na primárnej strane	MPa	15,7	15,5	15
počet parogenerátorov	-	4	4	6
typ parogenerátorov	-	horizontálne trubkové	vertikálne trubkové	vertikálne doskové

Reaktor BWRX-300 sa s reaktorom BWR/6 významne líši len v použití komínu na výstupe pary z AZ, ktorý poskytuje dodatočnú výšku spádového potrubia pre hnaciu výšku potrebnú na udržanie prirodzeného cirkulačného toku. Znamená to teda, že BWRX-300 nepoužíva prúdové cirkulačné a prúdové čerpadlá ako reaktor BWR/6. Samotná technológia odlučovania a sušenia pary na výstupe z tlakovej nádoby je však rovnaká.

4.4 Kontajnement a aktivna/pasívna bezpečnosť

Štvrtá porovnávacía časť je zameraná na kontajnement s parametrami v tab. 11 a bezpečnostné prvky. Kontajnement reaktoru NUWARD je v porovnaní s VVER 1000 a EPR výrazne odlišný). Je oceľový a s parametrami navrhnutými tak, aby dokázal uschovať všetky prídavné komponenty primárneho okruhu a minimalizoval svoj objem vzhľadom k faktu, že celý kontajnement je ponorený pod vodu. Kontajnementy VVER 1000 a EPR sú navrhované ako ochranná budova a preto sú z železobetónu s výrazne väčšími rozmermi.

Základný rozdiel v bezpečnostných systémoch je ten, že pri reaktore NUWARD sú všetky bezpečnostné prvky pri LOCA pasívne. Nie je tu potreba žiadnej prídavnej elektriny na pohon čerpadiel vstrekovacích systémov ako pri VVER 1000 a EPR. Vodná nádrž, v ktorej je reaktor NUWARD ponorený slúži pri havárii na pasívny odvod tepla z celého kontajnementu a aj z AZ pomocou dvoch bezpečnostných parogenerátorov. V prípade vážnej havárie sa tu však nenachádza zachytávač koria, ktorý je v EPR.

Tab. 11 Porovnanie charakteristík kontajnementu reaktoru VVER 1000 a EPR s NUWARD

charakteristika	rozmer	VVER 1000	EPR	NUWARD
materiál kontajnementu	-	predtlakovaný železobetón	železobetón	oceľ
priemer kontajnementu	m	45	46,78	15
výška kontajnementu	m	41,7	57,5	16
návrhový tlak kontajnementu	MPa	0,5	0,43	1

Tab. 12 Porovnanie charakteristík kontajnementu reaktoru BWR/6 s BWRX-300

charakteristika	rozmer	BWR/6	BWRX-300
priemer kontajnementu	m	22,25	17,5
výška kontajnementu	m	27	38
návrhový tlak	MPa	0,2	-
návrhová teplota kontajnementu	°C	165	-

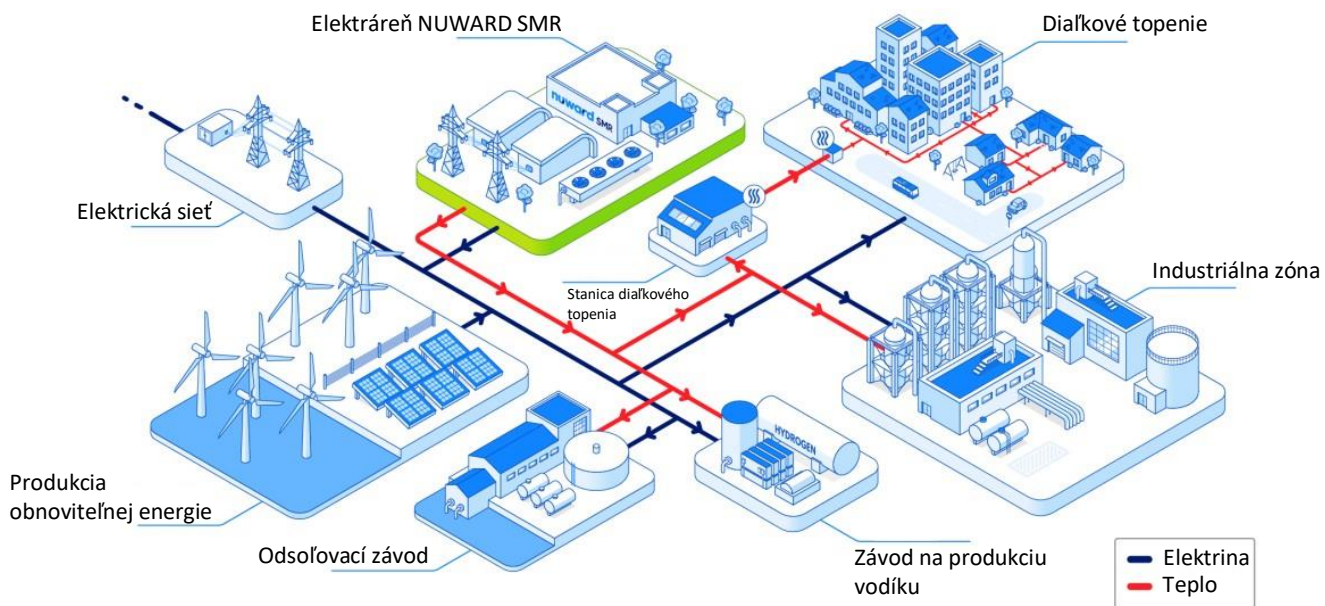
Vysoká tlaková nádoba reaktoru BWRX-300 spôsobuje aj vyšší kontajnement v porovnaní s hlavnou komponentou kontajnementu (drywell) BWR/6 s parametrami v tab. 12. Zároveň sa dizajn kontajnementu líši v podstatnej vlastnosti a to tej, že tu nie je potreba potláčacej komory, ktorá pri BWR/6 slúži aj ako nádrž pre vstrekovacie systémy pri LOCA.

Rovnako ako pri PWR má reaktor BWRX-300 všetky bezpečnostné systémy pasívne, ktoré s využitím tepelných výmenníkov umiestnených v bazénoch nad tlakovou nádobou a po obvode kontajnementu dokážu pasívne uchladiť AZ pri havárii.

4.5 Využitie

Veľké reaktory aktuálne slúžia ako primárny zdroj elektrickej energie pre štáty, s možnosťou dodávky tepla do sústavy centrálného zásobovania teplom (VVER 1000 v JE Temelín). Naproti tomu MMR celiia svoje možnosti využitia aj v iných odvetviach.

Jeden z najväčších cieľov je nahradenie výroby elektriny a tepla z uhoľných elektrární. V tomto smere zobralo najväčšiu iniciatívu do vlastných rúk Poľsko, kde spoločnosť Ciech uvažuje o jadrovej technológii ako náhradu využívania uhlia vo svojich chemických závodoch, ktoré produkujú uhličitan sodný využívaný pri výrobe skla a tehál. Táto spoločnosť využíva zariadenia s vysokou spotrebou elektriny.[39]



Obr. 30 Potenciál využitia elektriny a tepla vyrábaného v elektrárni NUWARD SMR. Prevzaté z [40] a upravené

NUWARD SMR celiia okrem týchto cieľov aj na ďalšie, ktoré sú zobrazené na obr. 30. z ktorých bude ďalej popisovaný potenciál odsolovania vody a produkciu vodíku vo Francúzsku. Odsolovanie morskej vody predstavuje výzvu na udržanie vodných rezerv do roku 2050, kedy by si prispôsobenie sa častejším suchám vo Francúzsku mohlo vyžadovať kapacity na odsolovanie morskej vody. Odsolovanie môže prispieť k odolnosti počas nedostatku voda prispieť tak k zabezpečeniu dodávok pitnej vody. 10 % energie vyrobenej v zariadení NUWARD SMR vo forme tepla dodaného do destilačného zariadenia by pokrylo ročnú spotrebu pitnej vody približne 180 000 obyvateľov.[41]

V roku 2020 bolo 95 % vodíku spotrebovaného vo Francúzsku vyrobeného z fosílnych zdrojov. Predpokladá sa, že do roku 2050 sa dopyt zvýši o 50 %, čo si vyžiada zavedenie nových dekarbonizovaných výrobných kapacít vodíku. V roku 2020 sa výroba vodíka podieľala na 11,5 Mt CO₂ vo Francúzsku, čo predstavuje približne 3 % národných emisií. Keď budú vysokoteplotné elektrolyzéry komerčne dostupné, hybridizácia NUWARD SMR by mohla zamedziť emisiám 600 ktCO₂ /rok nahradením parného reformingu až zvýšiť účinnosť procesu.[41]

Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo uviesť do súčasnej energetickej situácie EÚ a určiť potenciál jadrovej energetiky na dosiahnutie klimatických cieľov na zmiernenie účinkov globálneho otepľovania. Ďalším cieľom bolo opísať technológiu vybraných koncepcií aktuálne prevádzkovaných jadrových elektrární EÚ a vybraných koncepcií malých modulárnych reaktorov, ktoré boli v poslednej kapitole porovnané.

Z veľkého počtu prevádzkovaných reaktorov v EÚ boli vybrané koncepcie tlakovodného reaktoru východného typu VVER 1000 a západného typu EPR, varného reaktoru BWR/6 a ťažkovodného reaktoru CANDU 6. Z malých modulárnych reaktorov bola vybraná tlakovodná koncepcia NUWARD SMR a varná BWRX-300. Momentálne nie je žiadny ťažkovodný malý modulárny reaktor v stave návrhu s dostatkom informácií, preto bolo porovnanie s reaktorom CANDU 6 v tejto bakalárskej práci vynechané. Vybrané vlastnosti reaktorov na porovnanie zahŕňali tlakovú nádobu reaktoru, palivo a aktívnu zónu reaktoru, primárny chladiaci okruh, kontajnement s bezpečnostnými prvkami a nakoniec potenciál využitia v EÚ.

Po porovnaní spomínaných vybraných vlastností bolo zistené, že napriek tomu, že sú označované ako malé reaktory, majú MMR tlakovú nádobu rozmerovo väčšiu ako veľké reaktory. Ďalším dôležitým zistením bolo, že koncepcie MMR majú prevahu nad veľkými reaktormi v oblasti pasívnej bezpečnosti, menšej spotreby jadrového paliva a potenciálnom flexibilnejšom využití v energetickom sektore. V budúcnosti by mohli nahradiť uhoľné elektrárne vyrábajúce elektrinu a teplo napr. v Poľsku a prispieť tak k výraznému zníženiu emisií. Vo Francúzsku sú plány na využitie NUWARD SMR ako hybridného zdroja na produkciu zeleného vodíku a odsoľovanie morskej vody, čo by vyriešilo problém s nedostatkom pitnej vody do roku 2050.

Zoznam použitých zdrojov

- [1] *European Union data*. Online. Ember. 2024. Dostupné z: <https://ember-climate.org/countries-and-regions/regions/european-union/>. [cit. 2024-05-19].
- [2] BROWN, Sarah a JONES, Dave. *European Electricity Review 2024*. Online. Ember. 2024. Dostupné z: <https://ember-climate.org/insights/research/european-electricity-review-2024/>. [cit. 2024-05-19].
- [3] JONES, Dave; SARAH, Brown a CZYŻAK, Dr Paweł. *European Electricity Review 2023*. Online. Ember. 2023. Dostupné z: <https://ember-climate.org/insights/research/european-electricity-review-2023/>. [cit. 2024-05-19].
- [4] *Nuclear Power in Germany*. Online. World-nuclear. 2024. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany>. [cit. 2024-05-19].
- [5] *Energetický slovník- Koeficient využitia inštalovaného výkonu*. Online. Javys, a.s. Dostupné z: <https://www.javys.sk/mobile/sk/informacny-servis/energeticky-slovník/K/koeficient-vyuzitia-instalovaneho-vykonu>. [cit. 2024-05-20].
- [6] WAGNER, Vladimír. *Jaké jsou ceny za jaderné reaktory III+ generace?* Online. In: OEnergetice.cz. 2018. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/jake-jsou-ceny-za-jaderne-reaktory-iii-generace>. [cit. 2024-05-20].
- [7] SLUGENĚ, Vladimír; LIPKA, Jozef; HAŠČÍK, Ján; PAVLOVIČ, Márius a NEČAS, Vladimír. *Jadrovo-energetické zariadenia*. Online. Slovenská technická univerzita, 2003. Dostupné z: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:39077448. [cit. 2024-03-18].
- [8] *Generation IV Systems*. Online. Generation IV International forum. 2024. Dostupné z: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_59461/generation-iv-systems. [cit. 2024-03-28].
- [9] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Nuclear Power Reactors*. Online. World-nuclear. 2023. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>. [cit. 2024-03-25].
- [10] *Reactor Database*. Online. World-nuclear. 2024. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/reactor-database.aspx>. [cit. 2024-03-30].
- [11] *Nuclear Power in Russia*. Online. World-nuclear. 2024. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-power.aspx>. [cit. 2024-03-30].
- [12] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements*. Online. World-nuclear. 2007, 2024. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>. [cit. 2024-03-25].
- [13] SKUPINA ČEZ. *Typy reaktorů*. Online. Svět Energie. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/charakteristika-zdroje/typy-reaktoru>. [cit. 2024-02-13].
- [14] BREEZE, Paul. Chapter 17 - Nuclear Power. In: *Power Generation Technologies*. Second Edition. Elsevier, 2014, s. 353-378. ISBN 0080983367. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098330-1.00017-X>.

- [15] WANG, Jun; TALABI, Sola a BILBAO Y LEÓN, Sama (ed.). *Nuclear Power Reactor Designs: From History to Advances*. Academic Press, 2023. ISBN 9780323998802.
- [16] TSVETKOV, Pavel (ed.). *Nuclear Power: Deployment, Operation and Sustainability*. IntechOpen, 2011. ISBN 9533074744. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/704>.
- [17] ZDEBOR, Jan. *JADERNÉ SYSTÉMY I*. Online. In: . Ústav energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze. Dostupné z: <https://energetika.cvut.cz/pro-studenty/ke-stazeni/>. [cit. 2024-05-22].
- [18] TABADAR, Z.; AGHAJANPOUR, S.; JABBARI, M.; KHALEGHI, M. a HASHEMI-TILEHNOEE, M. Thermal-hydraulic analysis of VVER-1000 residual heat removal system using RELAP5 code, an evaluation at the boundary of reactor repair mode. *Alexandria Engineering Journal*. 2018, roč. 57, č. 3, s. 1249-1259. ISSN 1110-0168. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.03.044>.
- [19] SKUPINA ČEZ. *Parametry ochranné obálky JE Temelín*. Online. Svět Energie. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/bezpecnostni-systemy/parametry>. [cit. 2024-05-22].
- [20] *Status report 78 - The Evolutionary Power Reactor (EPR)*. Online. In: IAEA ARIS database. Dostupné z: <https://aris.iaea.org/sites/PWR.html>. [cit. 2024-04-21].
- [21] *EPR Design Description*. Online. In: U.S.NRC. 2005. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/docs/ML0522/ML052280164.html>. [cit. 2024-04-21].
- [22] *EPR -Areva brochure*. Online. In: YUMPU. 2015. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/view/46316433/epr-areva-brochure>. [cit. 2024-04-21].
- [23] UPADHYAYA, Belle a KERLIN, Thomas. *Dynamics and control of nuclear reactors*. London, England: Academic Press, 2019. ISBN 0-12-815262-1.
- [24] GE NUCLEAR ENERGY. *BWR/6: General Description of a Boiling Water Reactor*. 1980. Dostupné také z: <https://www.corephysics.com/NE301/>.
- [25] *Characteristics and operation*. Online. Cofrentes Nuclear Power Plant. Dostupné z: <https://www.cncofrentes.es/en/about-us/characteristics-and-operation/>. [cit. 2024-04-02].
- [26] *General Electric Advanced Technology Manual: Chapter 6.2 Primary Containment*. Online. In: U.S.NRC. 2014. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1414/ML14140A438.html>. [cit. 2024-04-19].
- [27] BARRÉ, Bertrand; ANZIEU, Pascal; LENAIN, Richarch a THOMAS, Jean-Baptiste. *Nuclear Reactor Systems*. EDP Sciences, 2016. ISBN 9782759819850. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1051/978-2-7598-1985-0>.
- [28] *Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: CANDU Reactor Assemblies: CANDU Reactor Assemblies*. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2001. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/publications/6128/assessment-and-management-of-ageing-of-major-nuclear-power-plant-components-important-to-safety-candu-reactor-assemblies>.
- [29] KOK, Kenneth (ed.). *Nuclear Engineering Handbook*. CRC Press, 2009. ISBN 9781420053906.

- [30] ĐURĐOVIČ, Martin; ENTLER, Slavomír; HORÁČEK, Jan; MÁLEK, Jiří; SYBLÍK, Jan et al. *Malé modulární reaktory*. Středisko společenských činností AV ČR, vvi, pro Kancelář Akademie věd ČR, 2022. ISBN 9788020033956.
- [31] *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments (2022)*. Online. In: IAEA ARIS database. 2022. Dostupné z: <https://aris.iaea.org/sites/Publications.html>. [cit. 2024-05-04].
- [32] OECD (2024). *The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Second Edition*. Online. In: Nuclear Energy Agency. OECD Publishing, Paris, 2024. Dostupné z: https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_90816/the-nea-small-modular-reactor-dashboard-second-edition. [cit. 2024-05-04].
- [33] INGERSOLL, Daniel. *An Overview of the Safety Case for Small Modular Reactors*. 2011/01/01. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/SMR2011-6586>.
- [34] *Experti na jádro z celého světa se sešli v Praze v rámci International NUWARD Advisory Board*. Online. All for POWER. 2023. Dostupné z: <https://allforpower.cz/jaderna-energetika/experti-na-jadro-z-celeho-sveta-se-sesli-v-praze-v-ramci-international-nuward-advisory-board-742-1>. [cit. 2024-05-14].
- [35] *NUWARD SMR – evropský malý modulární reaktor pro českou energetiku a teplárenství (část druhá)*. Online. All for POWER. 2023. Dostupné z: <https://allforpower.cz/jaderna-energetika/nuward-smr-evropsky-maly-modularni-reaktor-pro-ceskou-energetiku-a-teplarenstvi-cast-druha-755>. [cit. 2024-05-14].
- [36] *Status Report – NUWARD™ (EDF lead consortium)*. Online. In: IAEA ARIS database. 2019. Dostupné z: <https://aris.iaea.org/sites/SMR.html>. [cit. 2024-05-15].
- [37] *Status Report – BWRX-300 (GE Hitachi and Hitachi GE Nuclear Energy)*. Online. In: IAEA ARIS database. 2019. Dostupné z: <https://aris.iaea.org/sites/SMR.html>. [cit. 2024-05-16].
- [38] GE HITACHI NUCLEAR ENERGY. *BWRX-300 General Description*. Online. In: GE Vernova. 2023. Dostupné z: <https://www.gevernova.com/nuclear/carbon-free-power/bwrx-300-small-modular-reactor>. [cit. 2024-05-22].
- [39] SUK, Pavel. *Polský chemický gigant zvažuje jádro jako zdroj energie*. Online. In: OEnergetice.cz. 2021. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/zahranicni/polsky-chemicky-gigant-zvazuje-jadro-jako-zdroj-energie>. [cit. 2024-05-22].
- [40] NUWARD™ EDF GROUP. *Our SMR Solution*. Online. NUWARD. 2024. Dostupné z: <https://www.nuward.com/en/our-smr-solution>. [cit. 2024-05-22].
- [41] *NUWARD SMR's opportunities and socio-economic & environmental features*. Online. In: NUWARD. 2023. Dostupné z: <https://www.nuward.com/en/whats-new/opportunity-study>. [cit. 2024-05-22].

Zoznam použitých skratiek

skratka	význam
AZ	Aktívna zóna
BWR	Varný reaktor
CO ₂	Oxid uhličitý
EÚ	Európska Únia
HSVT	Hlavný systém výmeny tepla
ICS	System izolačného kondenzátora
iPWR	Integrálny tlakovodný reaktor
LOCA	Havária so stratou chladiva
MMR	Malý modulárny reaktor
PCCS	Pasívny systém chladenia kontajmentu
PHWR	Ťažkovodný reaktor
PWR	Tlakovodný reaktor
SHCH	System havarijného chladenia
UO ₂	Oxid uraničitý