

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

MALÉ MODULÁRNÍ REAKTORY

SMALL MODULAR REACTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Tichý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Milčák

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Marek Tichý**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Milčák**
Akademický rok: 2019/20

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

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Malé modulární reaktory se postupně vyvíjí již několik desítek let. Jejich uplatnění se nachází zejména v námořní dopravě. Nyní se malé modulární reaktory dostávají do popředí i pro stacionární aplikace jako možná substituce uhelných tepláren.

Cíle bakalářské práce:

- úvod do jaderné energetiky,
- rešerše generací jaderných reaktorů,
- popis malých modulárních reaktorů,
- možnosti aplikace malých modulárních reaktorů.

Seznam doporučené literatury:

BEČVÁŘ, Josef. Jaderné elektrárny. 2. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1981, 634 s.

KLIK, František a Jaroslav DALIBA. Jaderná energetika. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 189 s. : il. ; 30 cm. ISBN 80-01-02550-0.

DUBŠEK, František. Jaderná energetika. Brno: PC DIR, 1994, 209 s. ISBN 80-214-0538-4.

MURRAY, Raymond LeRoy a Keith E HOLBERT. Nuclear energy: an introduction to the concepts, systems, and applications of nuclear processes. 7th ed. Amsterdam: Elsevier, 2015, xvii, 550 s. : il. ISBN 978-0-12-416654-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zaměřuje na jadernou energetiku. Popisuje jednotlivé generace jaderných reaktorů a jejich hlavní zástupce. Hlavním tématem této práce jsou malé modulární reaktory, kterým se věnuje podrobněji. Jsou zde popsány konkrétní typy reaktorů, jejich popis a také využití, které nabízejí.

Klíčová slova

Jaderné reaktory, jaderná energetika, modularita, elektrická energie, topení

ABSTRACT

This bachelors thesis is focused on nuclear energy. It describes the generations of nuclear reactors and their representatives. The main goal of this work are small modular reactors which are discussed in more detail. This thesis describes types of reactors, their descriptions and also their use cases.

Key words

Nuclear reactors, nuclear energy, modularity, electrical energy, heating industry

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TICHÝ, Marek. *Malé modulární reaktory* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124306>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Milčák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem *bakalářskou* práci na téma **Malé modulární reaktory** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Pavlu Milčákovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Úvod do jaderné energetiky.....	12
1.1 Jaderné reakce.....	12
1.2 Jaderné palivo.....	13
1.3 Historie jaderné energetiky.....	14
2 Popis generací jaderných reaktorů.....	15
2.1 Jaderné reaktory.....	15
2.2 Generace I.....	16
2.2.1 Nejvýznamnější zástupci I generace:.....	16
2.3 Generace II.....	17
2.3.1 Nejvýznamnější zástupci II generace.....	17
2.4 Generace III.....	19
2.4.1 Nejvýznamnější zástupci III generace.....	19
2.5 Generace III+.....	20
2.5.1 Nejvýznamnější zástupci III+ generace.....	20
2.6 Generace IV.....	20
2.6.1 Nejslibnější zástupci IV generace.....	21
2.7 Shrnutí jaderných reaktorů.....	21
3 Malé modulární reaktory.....	23
3.1 Úvod do problematiky.....	23
3.1.1 Modularita.....	23
3.2 Současný trend v energetice.....	23
3.3 Technické provedení.....	24
3.4 Ekonomické hledisko.....	24
3.5 Aktuální situace.....	24
3.6 Výhled do budoucna.....	25
4 Jednotlivé typy reaktorů.....	26
4.1 mPower.....	26
4.2 NuScale.....	27
4.3 SVBR-100.....	28
4.4 BREST.....	29
4.5 SMART.....	29
4.6 CAREM-25.....	30
4.7 KLT-40S.....	30
4.8 4S.....	31
4.9 HTR-PM.....	32
5 Možnosti využití.....	33
5.1 Výroba elektrické energie v rozvojových zemích.....	33
5.2 Teplárenství.....	33

5.3	Kogenerace	33
5.4	Odsolování mořské vody	34
5.5	Výroba vodíku	34
5.6	Námořní doprava	35
5.7	Využití pro ČR	35
ZÁVĚR		37
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ		38
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		42
SEZNAM OBRÁZKŮ		43
SEZNAM TABULEK.....		44

ÚVOD

Dnešní globalizovaný svět, který se vyvíjí ve všech různých technických směrech potřebuje stále více energie, která pohání stroje, dopravní prostředky nebo přístroje, které lidem usnadňují a zpříjemňují život. S tím přicházejí i nové technologie, jak vyrábět elektrickou energii nebo teplo a zvyšovat účinnost jednotlivých výrobních metod.

Jednou z možností, jak získat energii využitelnou pro člověka, je přetransformovat energii uvolněnou při jaderných reakcích štěpného materiálu v jaderném reaktoru. Jaderné reakce jsou známé poměrně dlouhou dobu, poprvé byly využity armádou v jaderných zbraních a od 60. let 20. století existují jaderné elektrárny dodávající do sítě elektrickou energii. Od té doby se technologie v tomto směru posunula o velký kus dopředu. Zvýšení bezpečnosti, účinnosti a různé možnosti využití dávají jadernému průmyslu možnost udržet se v energetické konkurenci.

Tato práce se zabývá jednou z odnoží jaderné energetiky, a to malými modulárními reaktory. Čtenář se v práci seznámí obecně s jadernými reaktory a dále detailněji o malých modulárních reaktorech, jejich typech a možnostech využití.

Kapitola 1 obsahuje stručný úvod do jaderné energetiky, popis jednotlivých jaderných reakcí a jaderného paliva, které je v reaktorech využíváno. Ke konci této kapitoly je také stručně popsána historie jaderné energetiky.

Kapitola 2 popisuje jaderné reaktory a jejich jednotlivé generace. Nejprve je stručně popsána technologie jaderných reaktorů a následně rešerše generací tak, jak šly po sobě. K nim jsou vždy uvedeny jednotlivé příklady konkrétních typů reaktorů, jejich technický popis a případně odlišnosti oproti jiným generacím.

Další tři kapitoly už se zabývají malými modulárními reaktory. V kapitole 3 nalezneme úvod k dané problematice, vysvětlení pojmu modularita a výkonové zařazení reaktorů. V další kapitole 4 je popsáno devět konkrétních typů malých modulárních reaktorů, které jsou v provozu, testují se nebo vyvíjí. Poslední kapitola 5 se zabývá jejich možným využitím, které mimo výrobu elektrické energie může být více všestranné.

1 Úvod do jaderné energetiky

1.1 Jaderné reakce

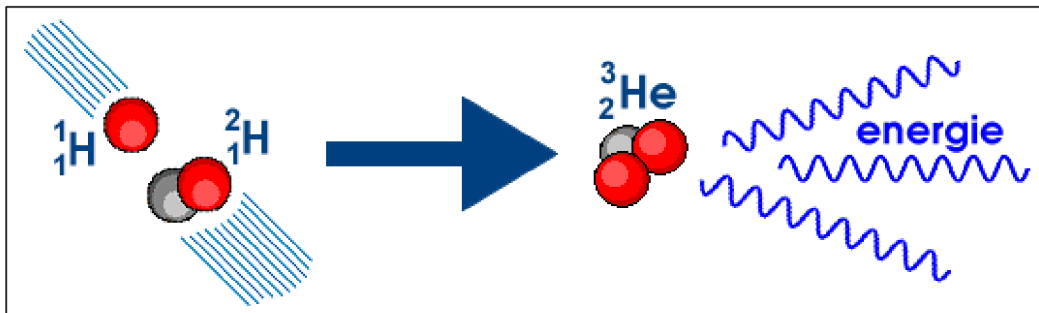
Nejprve je potřeba objasnit pojem radioaktivita. Je to přeměna jádra atomů na jádra jiných prvků nebo izotopů, to se projeví vznikem jaderného záření, při kterém se vyzařují částice α (jádra ${}^2\text{He}^4$), částice β (elektrony) nebo paprsky γ (fotony). [3]

Jaderný rozpad probíhá u některých prvků, které se vyskytují volně v přírodě, samovolně, a to u nuklidů, které jsou nestabilní. Snižují tak svoji excitační energii nebo dosahují vyšší stability. Jaderné přeměny mohou probíhat i u stabilních prvků, ale je k tomu potřeba vnější zásah. Přeměny vyvolané vzájemnou interakcí (srážkou) jádra a dopadající částice nebo dvou jader se nazývají jaderné reakce. Tyto reakce se řídí především těmito zákony:

- zákonem zachování energie
- zákonem zachování hmotnosti
- zákonem zachování hybnosti
- zákonem zachování počtu nukleonů
- zákonem zachování elektrického náboje

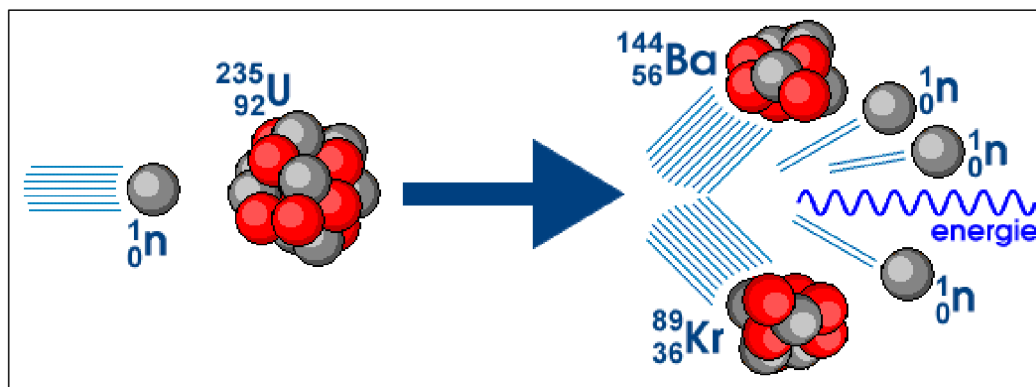
Jaderné reakce se dají rozdělit podle různých kritérií, jedním z hlavních je však rozdělení podle vztahu původních a nově vzniklých jader. Čímž vzniknou dvě hlavní skupiny, a to syntéza jader a štěpení jader. [4][5]

Syntéza (slučování) jader, neboli jaderná fúze, je vznik těžšího jádra ze dvou lehčích jader, k tomu je vhodný například vodík ${}^1\text{H}^1$ nebo deuterium (izotop vodíku) ${}^2\text{H}^2$. Pro vznik takové reakce je potřeba překonání elektrických odpuzivých sil, k čemuž je zapotřebí dodání velkého množství energie, této energie se dá dosáhnout zahřátím jader na teplotu vyšší než je 10^6 K a je to takzvaná termonukleární reakce. Takové reakce vznikají například v nitru hvězd nebo při výbuchu vodíkové pumy. Řízené termonukleární reakce jsou pouze předmětem výzkumu. [4][5]



Obrázek 1 - Fúzní schéma vodíku a deutria. [8]

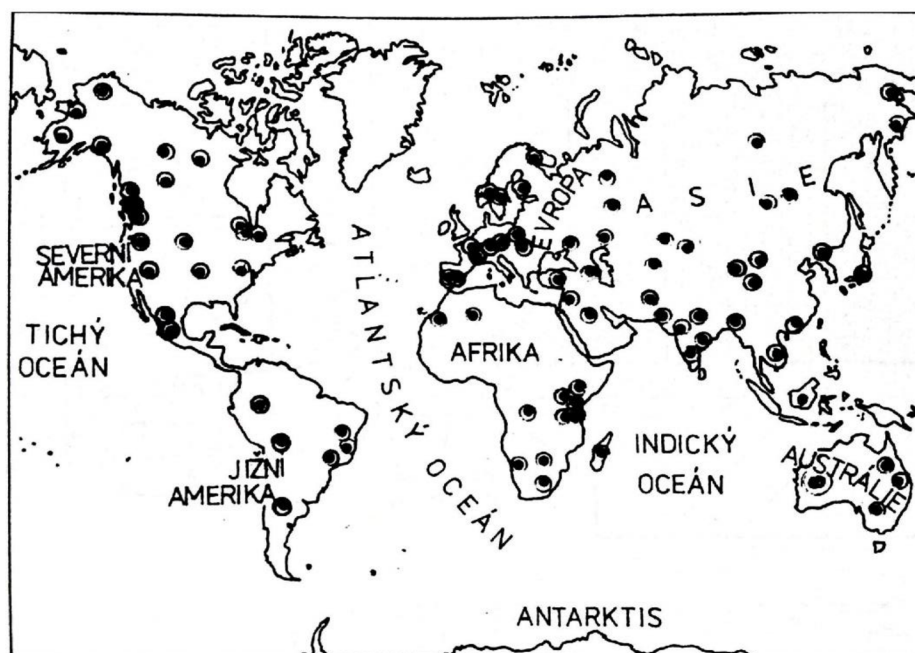
Štěpení jader je reakce, při níž dochází k rozštěpení jádra těžšího prvku pomalým neutronem. Jedním z nejvhodnějších prvků používaných pro tuto reakci je izotop uranu ${}_{92}\text{U}^{235}$. Pravděpodobnost, že k rozštěpení dojde se zvýší, když neutron v jádře zůstane, k tomu musí být neutron dostatečně pomalý, proto se zpomaluje vhodným moderátorem (lehká voda H_2O , těžká voda D_2O , grafit). Zároveň se dvěma fragmenty vznikne i několik neutronů, které mohou vyvolat další štěpnou reakci a při dostatečném množství uranu, takzvaném kritickém množství, může nastat řetězová reakce. [3][5][6]



Obrázek 2 - Štěpení uranu ${}_{92}\text{U}^{235}$ neutronem. [8]

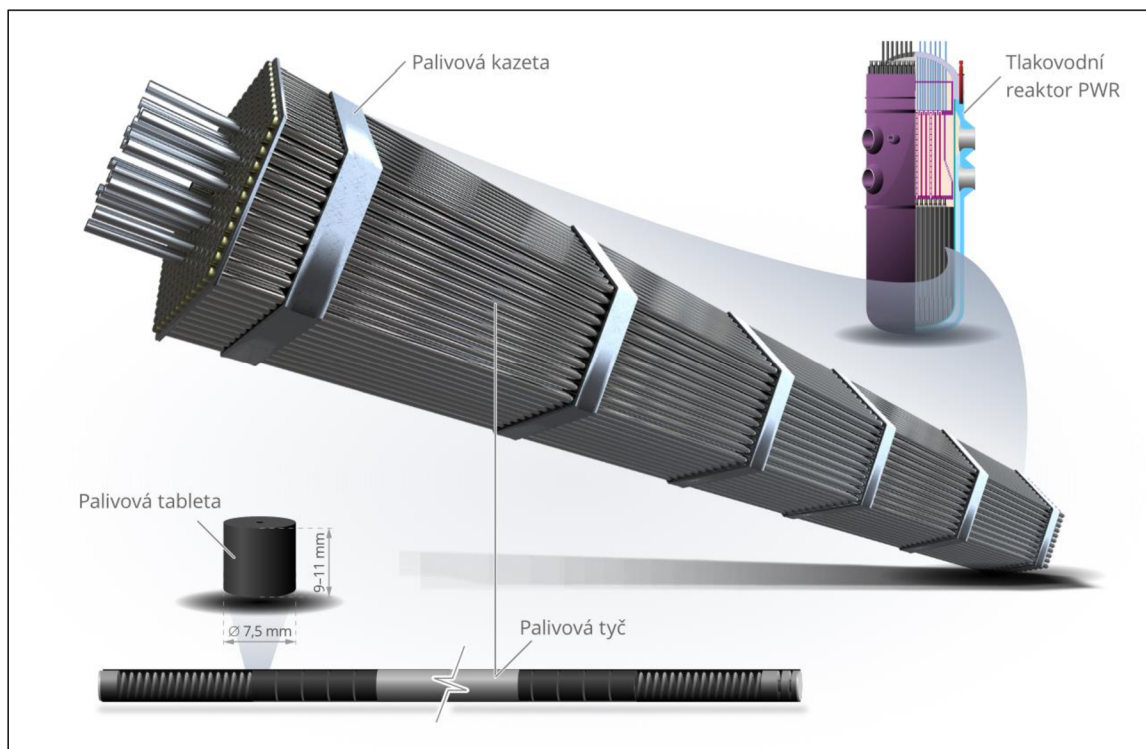
1.2 Jaderné palivo

Nejčastěji používaným jaderným palivem je Uran a Thorium, práce se však blíže zaměřuje pouze na Uran. Výskyt ložisek uranové rudy je po celém světě vcelku rovnoměrný a jeho odhadované množství činí v zemi asi 10^{15} tun a dalších zhruba 10^9 tun je rozpuštěno v mořské vodě. Je známo asi kolem stovky nerostů, které uran obsahují, z nichž nejznámější jsou smolinec, gumonit, autunit a další.



Obrázek 3 - Hlavní naleziště uranových a thoriových rud. [1]

Uranová ruda se těží povrchově nebo z hlubinných dolů. Vytěžená ruda má obsah uranu různý, například smolinec až 20 %. Většina rud má obsah menší, proto se z natěžené rudy uran dále extrahuje a získává se v tzv. nukleárně čisté podobě ve formě UO_2 . Pro jadernou energetiku je však ještě potřeba zvýšit podíl izotopu uranu ${}^{235}\text{U}$ alespoň na 3 % - 5 %, protože v přírodní formě je koncentrace tohoto izotopu pouze okolo 0,7 %. Tento fyzikální proces se nazývá obohacování uranu, ${}^{235}\text{U}$ se oproti ${}^{238}\text{U}$ liší pouze v hmotnosti (${}^{235}\text{U}$ obsahuje o 3 neutrony méně). Obohacený UO_2 se dále lisuje do pelet, které se spečou na keramické válečky, ty se slučují ve speciálním obalu ze slitiny zirkonia, a to se dále slučuje do palivových souborů, tzv. kazet. Pro každý typ reaktoru se používá jiný soubor palivových kazet. [1][9]



Obrázek 4 - Model palivového souboru VVER. [9]

1.3 Historie jaderné energetiky

Počátek jaderné energetiky se datuje ke konci 18. století, kdy se spousta významných vědců podílela na tom, kam se jaderná energetika bude ubírat. Byl to například Wilhelm Röntgen, který objevil rentgenové záření, Henri Becquerel, který zkoumal radioaktivní záření uranových solí, manželé Curieovi, kteří objevili dva nové radioaktivní prvky a mnoho dalších. V roce 1938 se poprvé podařilo rozštěpit jádro uranu. V té době bylo velké úsilí vynaloženo na výrobu atomové pumpy a roku 1945 byla poprvé použita v japonských městech Hirošima a Nagasaki. První jaderná elektrárna zapojená do rozvodné sítě byla v roce 1954 v ruském Obninsku, od té doby se jaderná energie stala nedílnou součástí výroby elektřiny. Vznikla také první jaderná ponorka a radioaktivita se začala využívat v různých odvětvích, například v lékařství, průmyslu a dalších. V roce 1985 zahájila provoz první česká jaderná elektrárna v Dukovanech. Velkou ránou pro jadernou energetiku byla dosud největší jaderná havárie v roce 1986, kterou byl výbuch čtvrtého bloku elektrárny v Černobylu. Do dnešního dne je v provozu 442 jaderných reaktorů a 54 je ve výstavbě. Vývoj jaderných reaktorů šel ve velkém kupředu, zvyšuje se bezpečnost i efektivita a vědecké týmy stále pracují na vývoji nových druhů reaktorů, a také na jejich dalším využití. Touto problematikou se bude nadále zabývat tato práce. [4][9]

2 Popis generací jaderných reaktorů

2.1 Jaderné reaktory

Jaderný reaktor je zařízení, ve kterém probíhá řízená řetězová štěpná reakce a uvolněná energie se přeměňuje na energii tepelnou. Tepelná energie je pak dále transformována na elektřinu. Typů reaktorů je velké množství, podle hlavního účelu se dají rozdělit na školní, experimentální, produkční, transportní, stacionární energetické a na reaktory pro speciální účely. Každý reaktor je však ve své podstatě reaktorem víceúčelovým.

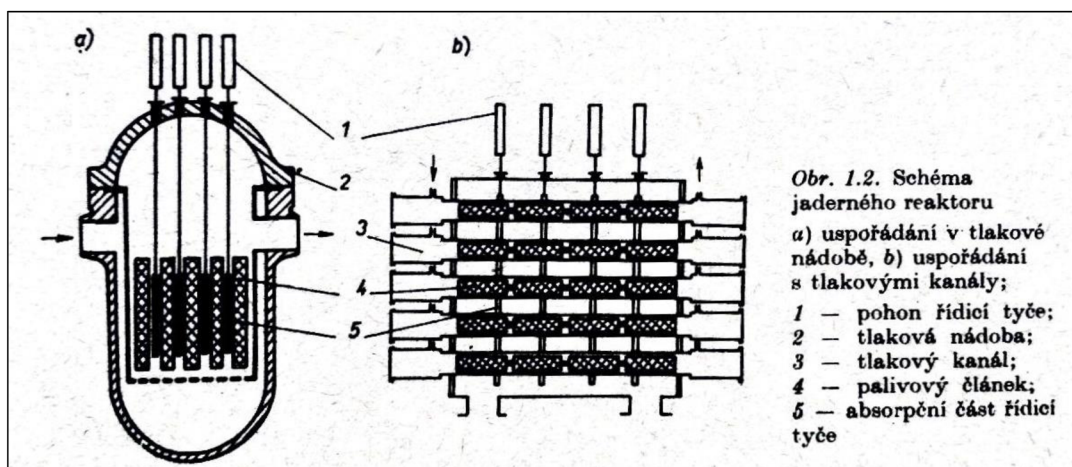
I přes velké množství typů jaderných reaktorů musí každý splňovat základní konstrukční prvky, které zajišťují primární funkce reaktoru. Jaderné palivo je rozmístěné v aktivní zóně a v té také probíhají štěpné reakce. Palivo se do aktivní zóny vkládá v palivových kazetách a jeho speciální ochranný obal jej chrání před korozi, vnějšími vlivy, zabraňuje propuštění radioaktivním štěpným produktům, ale umožňuje přenos tepla z paliva na chladivo.

Správný chod štěpné řetězové reakce závisí na rychlosti neutronů, která nesmí být příliš vysoká. K tomu slouží moderátor, který snižuje kinetickou energii vyletujících neutronů díky srážkám s atomy moderátoru. Jako moderátor se nejčastěji používá voda, ale i grafit nebo těžká voda (D_2O). U reaktorů, které fungují na principu rychlých neutronů, pak moderátor zcela chybí.

Výkon reaktoru se řídí pomocí řídicích tyčí, které jsou do aktivní zóny zasunuty podobně jako palivo a obsahují dobrý absorbátor neutronů, což často bývá bór nebo kadmium. Podle výšky zasunutí se pak mění výkon reaktoru. K úplnému zastavení štěpných reakcí slouží havarijní tyče, které absorbátor obsahují ve větší koncentraci. Ty jsou drženy nad aktivní zónou pomocí elektromagnetů a v případě potřeby spuštěny volným pádem do aktivní zóny, kde štěpnou reakci zastaví.

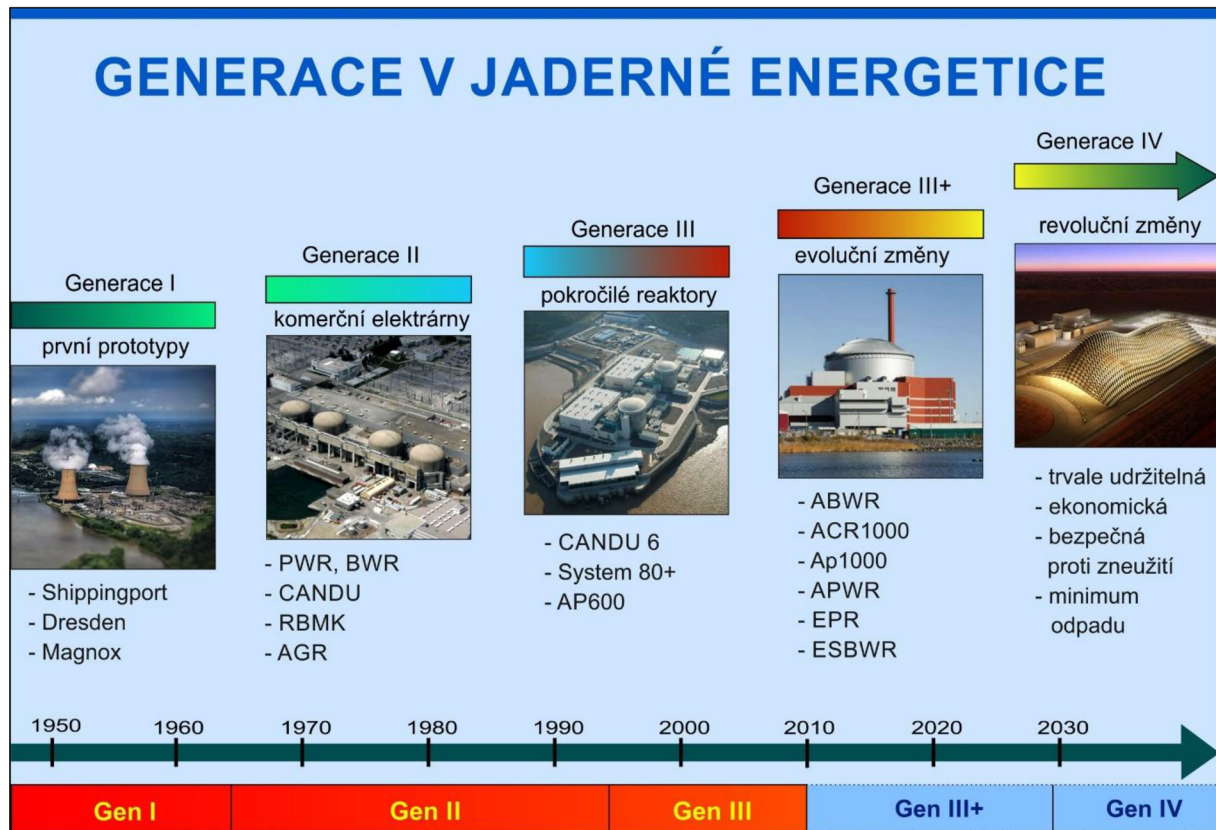
Chladivo odvádí teplo, vzniklé při štěpení, ven z jaderného reaktoru do míst, kde ho lze využít. Chladicí médium obklopuje palivové články a štěpný materiál je jím neustále ochlazován, jinak by došlo k přehřátí, roztavení ochranného povlaku, úniku radioaktivního materiálu nebo v horším případě k explozi. Osvědčeným chladivem je voda, ale používá se také těžká voda, helium, oxid uhličitý nebo sodík. Chladivo se v mnoha případech volí stejné jako moderátor.

Konstrukce reaktorů je velmi složitá, i když princip je vcelku jednoduchý. Většinou jsou jaderné reaktory uspořádány v tlakových nádobách, ale ve výjimečných případech může být také uspořádání s tlakovými kanály. Nároky na bezpečnost při konstrukci jaderných reaktorů jsou velké, musí odolat vysokým teplotám, tlakům i toku neutronů a s ohledem na to jsou voleny i materiály a způsob konstrukce. [2][4][9][12][13]



Obrázek 5 - Schéma jaderného reaktoru. [2]

Jak již bylo řečeno, jaderné reaktory prošly od svého prvopočátku velkým vývojem. První řízená štěpná reakce proběhla roku 1942 v Chicagu, když Enrico Ferminy zkonstruoval grafitový jaderný reaktor, který byl pojmenován Chicagský Miliř I a sloužil pouze pro experiment, který trval 20 minut a dosáhl výkonu 0,5 W. Pak už vývoj nabral velký spád, bylo navrženo a zkonstruováno velké množství reaktorů, které se podle časového intervalu dělí do několika generací.[9]



Obrázek 6 - Generace jaderných reaktorů. [14]

2.2 Generace I

Do této generace patří reaktory vzniklé v 50. a 60. letech 20. století. Bylo vytvořeno velké množství experimentálních reaktorů, z nichž se však v energetické praxi využily pouze některé. Patří sem například i první československá jaderná elektrárna A-1 v Jaslovských Bohunicích, ve které byl využit reaktor s označením HWGCR, chlazený oxidem uhličitým a moderovaný těžkou vodou.

Zpočátku měly reaktory pouze základní bezpečnostní prvky, ty se vylepšovaly až s nově nabytými zkušenostmi z provozu. U některých typů došlo k výrazným inovacím, například u britského Magnoxu nebo francouzského UNGG, které byly moderovány grafitem a chlazeny oxidem uhličitým. Poslední jaderný reaktor v provozu spadající do této generace byl v britské jaderné elektrárně Wylfa s instalovaným výkonem 540 MWe a fungoval do roku 2015. [11][15]

2.2.1 Nejvýznamnější zástupci I generace:

- EBWR v americké Argonne National Laboratory (experimentální varný reaktor)
- Shippingport (americký lehkovodní tlakový množivý reaktor – PLWBR)
- Rolphton (prototyp kanadských reaktorů CANDU – CANada Deutrium Uranium – chlazený i moderovaný těžkou vodou)

- Obninsk AM – 1 (ruský lehkovodní vodou chlazený a grafitem moderovaný reaktor – LWGR, historicky první prototyp jaderné elektrárny)
- VVER – 210 (Novovoronež – 1) (ruský prototyp tlakovodního reaktoru VVER) [11][15]

2.3 Generace II

K rozvoji této skupiny došlo v sedmdesátých letech minulého století a kontinuálně se navázalo na generaci předchozí. Do popředí se dostaly hlavně reaktory lehkovodní a to buď varné (označované BWR) nebo tlakovodní (označované PWR a VVER) a to i díky ekonomickým výhodám, protože voda jako moderátor a chladivo je relativně levná a dostupná. V dnešní době mají elektrárny s těmito typy reaktorů největší podíl na výrobě elektrické energie z jaderných elektráren. Je tomu tak i u našich dvou jaderných elektráren, a to v Dukovanech, kde jsou instalovány 4 reaktory typu VVER 440/213 s celkovým elektrickým výkonem 2040 MWe a v Temelíně, kde jsou instalovány 2 jaderné reaktory typu VVER 1000/320 o celkovém elektrickém výkonu 2110 MWe.

V porovnání s I. generací se reaktory posunuly vpřed hlavně ve zvýšení aktivní bezpečnosti. Prvky aktivní bezpečnosti jsou závislé na dodávce elektrické energie a reagují na pokyny operátora nebo počítače. Tyto systémy řeší i odchylky od běžného provozu. Pro jadernou bezpečnost je nejdůležitější především regulace štěpné reakce, dostatečné chlazení a zadržování radionuklidů. [11][15][16]

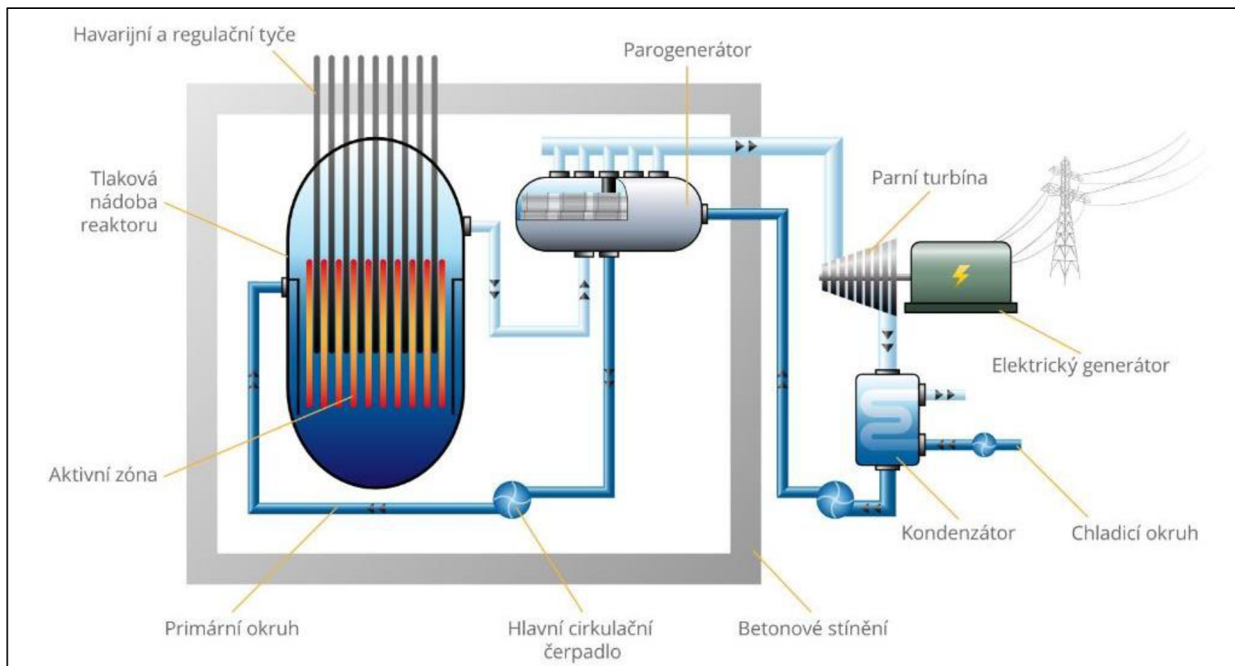
2.3.1 Nejvýznamnější zástupci II generace

- Tlakovodní reaktor PWR, VVER

Je to dodnes nejrozšířenější typ reaktoru, v provozu je 300 reaktorů typu PWR, což činí přes 68 % z celkového počtu světových reaktorů. Byl vyvinut v USA, ale jeho koncepci si později převzalo a upravilo i Rusko. Díky své bezpečnosti jsou stejné reaktory využívány i pro pohon jaderných ponorek. Palivem je obohacený uran ve formě UO_2 . Keramické peletky se vkládají do palivových souborů dlouhých 3,5 m. Reaktor je tlaková nádoba, ve které se palivo mění zhruba jednou za rok, a to při odstávce reaktoru kdy dojde k výměně zhruba jedné čtvrtiny vyhořelých palivových tyčí. Často se setkáváme s termínem lehkovodní reaktor, protože moderátorem i chladivem je obyčejná voda, která proudí v primárním okruhu a svoji energii předává v parogenerátoru do okruhu sekundárního. V parogenerátoru vzniká pára, která je dále přiváděna na lopatky turbíny, která roztáčí rotor a rotační pohyb je převáděn na elektrickou energii s využitím magnetické indukce. [9][10][11][15]

Tabulka 1 - Typické parametry reaktoru VVER-1000. [11]

Typické parametry reaktoru VVER - 1000	
Obohacení uranu izotopem ^{235}U	3,1 % - 4,4 %
Rozměry aktivní zóny	průměr: 3 m, výška 3,5 m
Tlak vody	15,7 MPa
Teplota vody na výstupu z reaktoru	324 °C



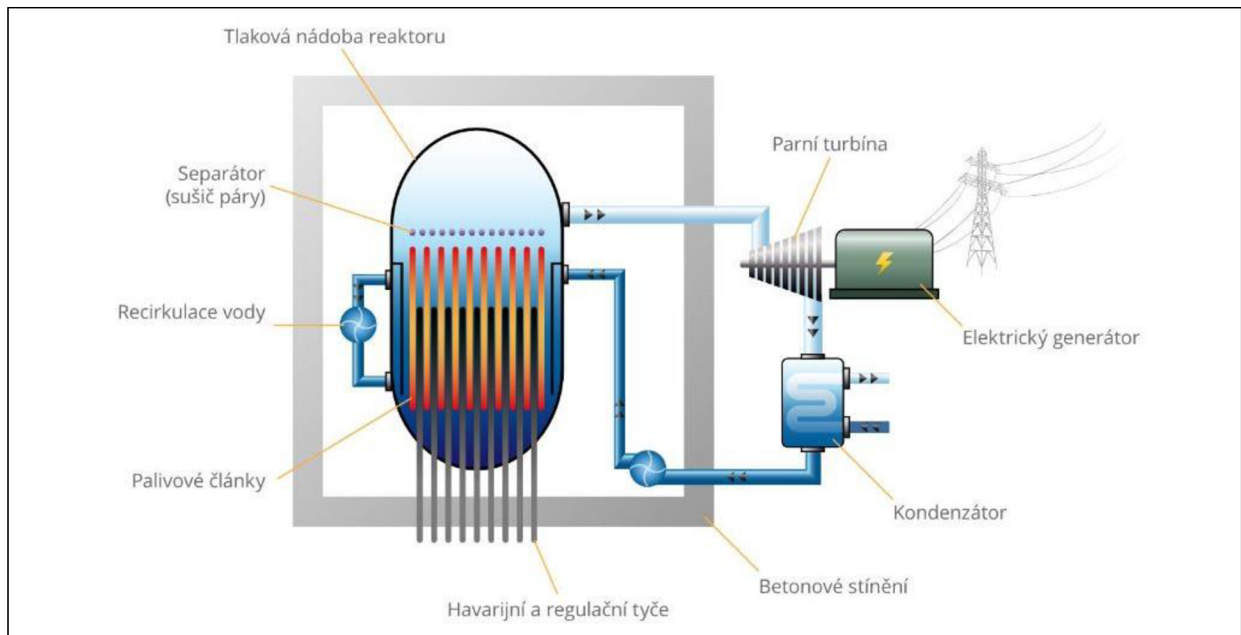
Obrázek 7 - Tlakovodní reaktor PWR. [11]

- Varný reaktor BWR

Je to druhý nejrozšířenější typ využívaný pro komerční účely a představuje asi 15 % z celkového počtu světových reaktorů. Palivem je opět obohacený uran ve formě UO_2 . Aktivní zóna je velmi podobná jako u tlakovodního reaktoru a moderátorem a chladivem je lehká voda. Reaktor je vysoký asi 10 m a je to tlaková nádoba z oceli. K výměně paliva dochází jednou za rok a mění se čtvrtina palivových tyčí. Voda je přímo v reaktoru ohřívána až na bod varu a v horní části se hromadí ve formě páry. Ta je znavována vlhkostí a vedena přímo na vstup turbíny. Elektrárny s těmito typy reaktorů jsou jednookruhové a zcela zde chybí parogenerátor. Přivedená pára roztáčí lopatky turbíny a elektrický generátor převádí rotační pohyb rotoru na elektrickou energii s využitím magnetické indukce. [9][10][11][15]

Tabulka 2 - Typické parametry reaktoru BWR. [11]

Typické parametry reaktoru BWR s výkonem 1000 MW	
Obohacení uranu izotopem ^{235}U	2,1 % - 2,6 %
Rozměry aktivní zóny	průměr: 4,5 m, výška 3,7 m
Tlak vody	7 MPa
Teplota páry na výstupu z reaktoru	286 °C



Obrázek 8 - Varný reaktor BWR. [11]

- Tlakovodní reaktor CANDU (chlazený i moderovaný těžkou vodou)
- Varný reaktor RBMK (chlazený lehkou vodou a moderovaný grafitem)
- Varný reaktor EPG – 6 (chlazený lehkou vodou a moderovaný grafitem)
- Plynem chlazený AGR (chlazený oxidem uhličitým a moderovaný grafitem) [15]

2.4 Generace III

Tato generace představuje další stupeň vývoje jaderných reaktorů. Vychází z generace předcházející, ale typy reaktorů jsou standardizované, což usnadňuje dobu schvalování a také samotnou délku výstavby. Bylo dosaženo prodloužení provozní doby, která by měla být 60 let, ale na základě získaných zkušeností z provozu může být značně prodloužena. Dochází také k projektovým změnám a k vylepšení materiálů, což vede ke zlepšení ekonomiky provozu. Jednodušší a odolnější konstrukce vedou k odolnosti vůči lidským chybám. Snížila se také pravděpodobnost přehřátí reaktoru a roztavení paliva. Celková bezpečnost stoupla, a to jak ve zvládnutí poruch a havárií, tak i v odolnosti vůči vnějším vlivům.

Dalším posunem vpřed je prodloužení doby mezi odstávkami, což zvedlo koeficient ročního využití výkonu. Došlo ke snížení investičních nákladů i díky zvýšení míry vyhořelého paliva, čímž klesla spotřeba uranu a snížil se objem radioaktivního odpadu. Mezi zástupce reaktorů tohoto typu, které jsou v provozu patří například CANDU-6 využívaný například v Kanadě, Číně nebo Argentíně. [11][15]

2.4.1 Nejvýznamnější zástupci III generace

- Vylepšený varný reaktor ABWR

Reaktory tohoto typu jsou následovníky reaktorů BWR od firem GE Hitachi Nuclear Energy a Toshiba. Stejně jako BWR, ani tyto reaktory nemají parogenerátor a ke vzniku páry dochází přímo v reaktoru. Jeho výkon se pohybuje okolo 1350 až 1460 MWe. Jako palivo je zde opět používán uran ve formě UO_2 a reaktory jsou koncipovány tak, aby dobře odolávaly vnějším vlivům, například zemětřesením. [17][18]

- Těžkovodní reaktor CANDU 6 [15]

2.5 Generace III+

Mezi reaktory generací III a III+ není pevná hranice, ale u reaktorů generace III+ je využito nových bezpečnostních prvků, s ohledem na licencování, výstavbu a provoz reaktorů III generace. V současné době jsou nejlepší dostupnou technologií v oblasti jaderných elektráren. Do projektů jsou také zakomponovány závěry z havárie jaderné elektrárny ve Fukušimě. Byla posílena zejména odolnost vůči vnějším vlivům, a to hlavně díky pasivním a inherentním bezpečnostním prvkům. Díky tomu je výrazně snížena možnost lidské chyby.

Inherentní bezpečnostní prvky jsou takové, které využívají základní fyzikální zákony. Na případnou nehodu tak elektrárna dokáže zareagovat, aniž by musela zasahovat obsluha či řídicí systém. K nejdůležitějším inherentním opatřením patří samotná konstrukce aktivní zóny. K nejčastěji využívaným prvkům pasivní bezpečnosti patří konvekce neboli proudění, a i přes nefunkčnost čerpadla, systém alespoň elementárně cirkuluje. U havarijních tyčí je zase použito gravitačního zákona. Tyče jsou nad aktivní zónou upevněny pomocí elektromagnetů a v případě nutnosti do aktivní zóny spadnou vlastní vahou. Modernější elektrárny inherentní a pasivní prvky bezpečnosti využívají stále častěji, a i díky nim, se jaderný reaktor stává bezpečnějším a může samovolně zareagovat na odchylky od běžného provozu. Bezpečnosti přidává i zvýšená odolnost konstrukce kontejnmentu i celé budovy, která musí například odolat pádu letadla. [9][11][15]

2.5.1 Nejvýznamnější zástupci III+ generace

- Tlakovodní reaktor EPR

Jedná se o Francouzsko-německý tlakovodní reaktor s instalovaným výkonem mezi 1600 až 1750 MW. Reaktor vyvinula firma Areva NP a měl by být schopen využívat palivo MOX, které obsahuje plutonium z přepracovaného vyhořelého paliva. [18]

- Tlakovodní reaktory AP1000, VVER-1200, APWR
- Varný reaktor ESBWR [15]

2.6 Generace IV

Jaderné reaktory IV. generace jsou zatím předmětem vývoje a ubírají se v několika koncepčních směrech. Oproti generacím minulým se liší zásadním způsobem. Někteří zástupci této generace se opírají o experimentální reaktory z 50. a 60. let.

Většina z nich pracuje s rychlými neutrony a uzavřeným palivovým cyklem. Tyto reaktory jsou schopné zvýšit efektivitu využití jaderného paliva a zároveň snížit množství jaderného odpadu. Cílem je, aby elektrárny s těmito reaktory byly konkurenceschopné v energetickém průmyslu, a zároveň splňovaly vysoké požadavky na bezpečnost, zaručené především inherentními bezpečnostními prvky. To znamená, že vážné havárie brání samotný princip fungování reaktoru. Dalším předpokladem je, že brání výrobě jaderných zbraní z daného jaderného materiálu.

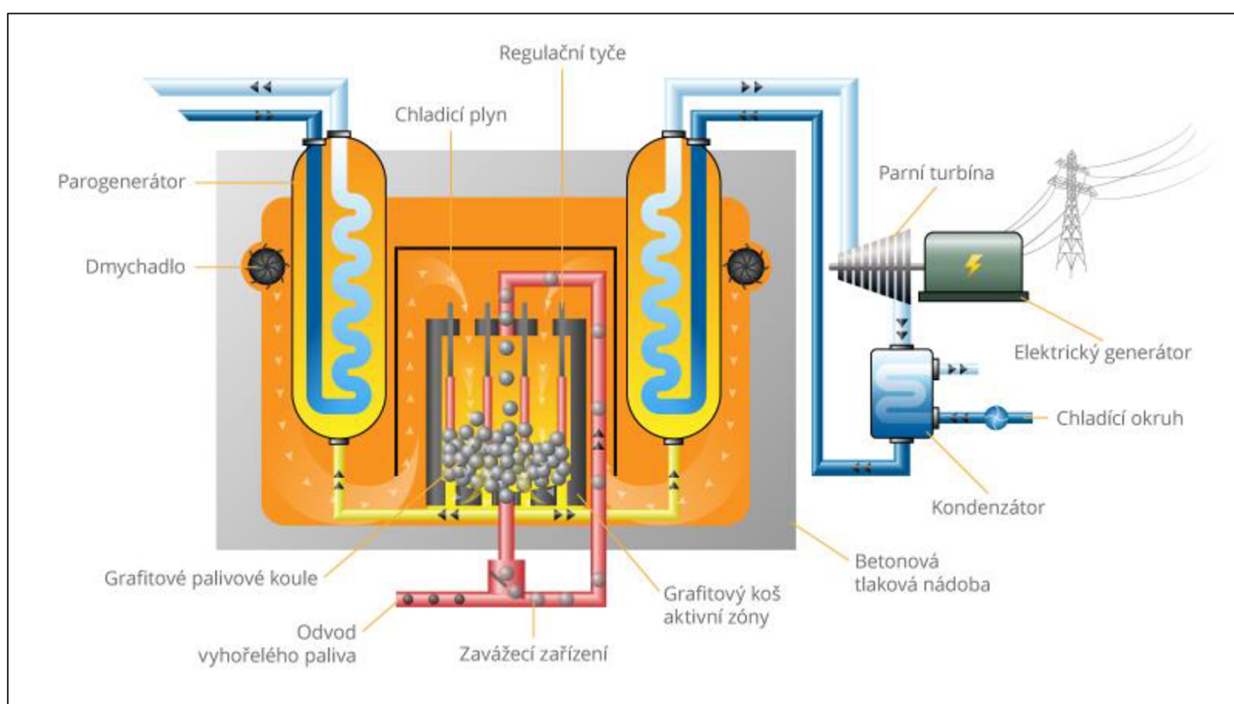
Předmětem největšího zájmu jsou zatím reaktory chlazené sodíkem, ty byly již dříve zkoumány v různých zemích. Jejich zástupci jsou například francouzský reaktor Phénix, japonský Monju nebo americký Fast Flux Test Facility. Většina z nich však slouží pouze k vědeckým účelům. Další reaktory pracují s tepelnými neutrony a otevřeným palivovým cyklem.

V rámci spolupráce vzniklo v roce 2001 takzvané Mezinárodní fórum pro generaci IV a jeho účelem je umožnit efektivní vývoj nových reaktorů, které představují budoucnost jaderné energetiky. Spuštění prvních pilotních jednotek do provozu se odhaduje mezi lety 2030 a 2040. Komerční využití je v plánu po roce 2050. [11][15]

2.6.1 Nejslibnější zástupci IV generace

- Vysoko teplotní reaktor HTGR

Tento vysoko teplotní reaktor HTGR je navržen tak, aby dosahoval vysoké účinnosti (zhruba 40 %). Existují však zatím pouze výzkumné reaktory například HTR-10 v Číně. Palivem je obohacený uran v podobě malých kuliček o průměru 0,5 mm a ty jsou ještě potažené karbidem křemíku a uhlíku. Tyto kuličky jsou pak volně rozptýleny v grafitové kouli o průměru zhruba 6,5 cm. Palivo je volně sypáno do aktivní zóny a dole se postupně odebírá. Moderátorem je grafit, který zde slouží současně jako matrice, je v něm uzavřen uran i produkty štěpení. Jako chladivo se zde používá helium. To je proháněno při tlaku 4 MPa aktivní zónou a na výstupu má 700 °C až 900 °C. Dále může být přivedeno přímo na turbínu, posloužit pro výrobu vodíku nebo svou energii předat v parogenerátoru vodě, která dále roztáčí turbínu. [9][19]



Obrázek 9 - Vysokoteplotní reaktor HTGR. [20]

- Sodíkem chlazený rychlý reaktor SFR
- Reaktor s roztavenými solemi MSR (ve vývoji: francouzský MSFR)
- Superkritický, vodou chlazený reaktor SCWR (ve vývoji: evropský HP-LWR a japonský JSCWR)
- Rychlý reaktor chlazený plynem GFR (ve vývoji: evropský ALLEGRO)
- Olovem chlazený rychlý reaktor LFR (ve vývoji: evropský ALFRED, belgický MYRRHA, ruské BREST a SVBR-100) [15]

2.7 Shrnutí jaderných reaktorů

Jaderná energetika a jaderné reaktory prošly od počátku svého vývoje velkými změnami. Jak bylo popsáno v předchozích kapitolách, dělí se do několika vývojových skupin a je jich celá řada typů. Stále nejčastěji komerčně využívaným typem reaktorů je tlakovodní reaktor PWR a za ním varný reaktor BWR. Jsou však snahy vyvinout nové efektivnější a bezpečnější reaktory. Právě bezpečnost je jedním z hlavních faktorů, které hrají v tomto vývoji významnou roli.

Existuje spousta odpůrců jaderné energetiky a v některých státech je dokonce jaderný program úplně zakázán, například v Rakousku. Je tomu tak hlavně kvůli vzniku jaderného

odpadu a neblaze proslulým jaderným haváriím, které se staly například v Černobylu nebo Fukušimě. I přes to jsou jaderné elektrárny jedním z hlavních zdrojů elektřiny a mohlo by tomu tak být i nadále, hlavně díky snahám vědců vyvinout efektivnější a bezpečnější způsob výroby elektřiny z jaderných reakcí.

Jaderné reaktory však nejsou využívány pouze k výrobě elektřiny a tepla. Jaderná energie byla zneužita k výrobě atomových bomb, některé reaktory s menším výkonem pohánějí námořní plavidla. Jaderných reaktorů je využíváno i k odsolování mořské vody nebo společně s elektřinou i k výrobě tepla. Někteří výzkumníci vidí budoucnost jaderné energetiky právě v reaktorech menších výkonů v modulárním provedení, které by nebyly tak složité na údržbu a mohly by být použity nejen na výrobu elektrické energie, ale také k distribuci tepla do větších měst. Právě těmito typy reaktorů se bude práce zabývat v dalších kapitolách.

3 Malé modulární reaktory

3.1 Úvod do problematiky

V úvodu si nejprve musíme objasnit, co se vůbec pod názvem malé modulární reaktory skrývá. Situace ve světě se velmi rychle mění, vznikají stále nové koncepty, které se od sebe mnohdy velmi liší nejen výkonem, ale i použitou technologií. Proto i klasifikace je dost nejednotná. Pro označení se nejčastěji používá zkratka SMR vycházející z anglického názvu *Small Modular Reactors*, ale někdy je zkratka SMR používána i pro modulární reaktory malého a středního výkonu (*Small-medium Modular Reactors*). V amerických zdrojích je často používána zkratka SMART (*Small Modular Advanced Reactor Technology*). V následujícím textu bude zkratka SMR používána pro malé modulární reaktory. [21]

Podle Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA) patří do třídy malých reaktorů ty, které mají výkon maximálně do 300 MWe. Reaktory středního výkonu se pak pohybují mezi 300 MWe až 700 MWe. Reaktory převyšující výkon 700 MWe se pak řadí do skupiny s velkým výkonem. Existuje však i řazení podle tepelného výkonu, které má hranici 1000 MWt pro malé a 2000 MWt pro střední reaktory. Pro tepelnou účinnost energetického reaktoru přibližně 1/3 však zhruba odpovídá hranicím pro elektrický výkon. Některá literatura zařazuje i zvláštní skupinu tzv. mini reaktorů, které dosahují výkonu maximálně do 50 MWe (250 MWt). [21][22]

Tabulka 3 - Rozdělení reaktorů podle výkonů. [23]

Mini reaktory	Do 50 MWe	Do 250 MWt
Malé reaktory	Do 300 MWe	Do 1000 MWt
Střední reaktory	300 – 700 MWe	1000 – 2000 MWt
Velké reaktory	Nad 700 MWe	Nad 2000 MWt

3.1.1 Modularita

Modularita znamená stavebnicovost nebo možnou sestavitelnost ze standardizovaných bloků. Pro SMR může hrát modularita dvojí význam. Reaktory sestavené ze standardizovaných součástí vyráběných sériově by se mohly dostat na mnohem nižší cenu, než jak je tomu u velkých konvenčních reaktorů. Úspor by dosáhla i samotná technologie, která by byla schválena a jednotná pro všechny reaktory daného typu. Dalším významem modularity u SMR je to, že samotné reaktory jsou navrhovány jako jednotlivé bloky, které mohou pracovat buď samostatně nebo být spojovány do výkonných elektráren o několika blocích. [21][24]

3.2 Současný trend v energetice

Reaktorů s malým výkonem byla ve světovém měřítku zkonstruováno už celá řada, většina však byla použita pro vědecké účely, jen menší část z nich byla využita komerčně. U druhé generace reaktorů v 70. a 80. letech minulého století bylo trendem navyšovat výkony reaktorů, které často přesahovaly 1000 MWe a některé dokonce dosahovaly až 1700 MWe.

V dnešní době však na energetickém trhu panuje tvrdá konkurence a investorům se nechce investovat do výstavby velkých jaderných elektráren, protože taková investice se vyplatí až po velmi dlouhé době a výstavba se často může velice prodražit, jak ukazuje tabulka 4. Dodavatelé se snaží dostat ceny elektřiny co nejnižší, a při zapojení velkého zdroje elektrické energie do sítě se její cena ještě sníží. Navíc klasické jaderné elektrárny jsou navrženy tak, aby pokrývaly základní potřebu sítě a elektřinu vyrábí v nepřetržitém provozu. To však na trhu, kde se ceny rychle mění, není příliš ceněná vlastnost a spíše jsou ceněny takové zdroje, které dokážou rychle reagovat. SMR taková kritéria splňují. Mohou vyrábět elektřinu v době, kdy jsou ceny vysoké, ale zároveň mohou být snadno odstaveny, pokud jsou ceny elektrické energie nízké. Můžou tak být dobře nakombinovány například s obnovitelnými zdroji energie. [21][24]

Tabulka 4 - Zpoždění a překročení nákladů ve výstavbě reaktorů. [21]

	Olkiluoto	Flamanville	Vogtle
Země	Finsko	Francie	USA
Reaktor	1xEPR	1xEPR	2xAP-1000
Začátek výstavby	2005	2006	březen 2013
Plánované spuštění	2009	2012	2016/17
Zpoždění ve výstavbě	7 let (2016)	4 roky (2016)	min. 1 rok
Původní rozpočet	3,2 mld. EUR	3,3 mld. EUR	14 mld. USD
Odhadovaná cena	10,7 mld. EUR	8,5 mld. EUR	15,6 mld. USD
Překročení nákladů	7,5 mld. EUR	5,2 mld. EUR	1,6 mld. USD

3.3 Technické provedení

Malé modulární reaktory ve většině případů využívají známé a ověřené technologie z minulých let, jako jsou například těžkovodní reaktory, lehkovodní reaktory, rychlé množivé, plynem chlazené a další. Reaktory se však liší výkonem, velikostí i samotným technickým provedením. U většiny z nich se cílí na to, aby měly jednodušší design, dosáhlo se tak rychlejšího výrobního času a tím i snížení nákladů. Důležitou roli hraje bezpečnost, která by měla být na srovnatelné úrovni s generací III a III+. Mnoho SMR je koncipováno tak, aby obsahovalo velké množství pasivních nebo inherentních bezpečnostních prvků. U malých reaktorů je větší riziko zneužití jaderného materiálu, proto mnoho návrhů uvažuje jejich umístění pod zemí, aby se zvýšila odolnost proti teroristickým útokům. Výhodou u SMR je i delší čas mezi výměnou paliva. Zatímco u dnešních reaktorů se palivo mění průměrně po 12 až 18 měsících, u SMR se tomu tak děje po 3 až 4 letech, ale někdy i po delší době. [21][22]

3.4 Ekonomické hledisko

Jedním z nejdůležitějších faktorů pro vývoj a výstavbu SMR je zajisté ekonomické hledisko. Velké konvenční elektrárny jsou velkou investicí, která má návratnost až za několik desítek let, což investory moc nepřitahuje. Cena za jednotku energie je však mnohem nižší než u SMR, protože provoz malých reaktorů je nákladnější. Pokud by tedy SMR byly pouze zmenšeninou klasických reaktorů, tak by se určitě jejich provoz nevyplatil. Jejich sériovost a větší jednoduchost je však ekonomicky zvýhodňuje. K další úspoře dojde při dopravě, protože menší součásti jsou méně nákladné na přepravu. Značnou výhodou je, že se dá investice rozdělit, jednotlivé bloky mohou fungovat samostatně, dají se ale také spojit do větších celků. Investice do elektrárny tak může být rozfázována a jednotlivé bloky přistavovány postupně. [21][22]

3.5 Aktuální situace

Přestože je většina projektů teprve ve vývoji, je v současné době již několik SMR v provozu. Většina z nich je lehkovodního typu PWR a na vývoji se podílí nejčastěji klasické jaderné velmoci, jako je Rusko, Čína nebo Indie, což je vidět i v následující tabulce 5. [22]

Tabulka 5 - Stávající SMR v provozu. [22]

Název	Kapacita	Typ	Dodavatel
CNP-300	300 MWe	PWR	SNERDI/CNNC, Pákistán a Čína
PHWR-220	220 MWe	PHWR	NPCIL, Indie
EGP-6	11 MWe	LWGR	Bilibino, Sibiř
KLT-40S	35 MWe	PWR	OKBM, Rusko
RITM-200	50 MWe	PWR	OKBM, Rusko

3.6 Výhled do budoucna

Protože zatím u SMR neprobíhá licencování, tak vývojáři často provádějí změny, a to i větší, jako je například zvýšení či snížení velikosti výkonu, a to až o několik desítek MWe. Je tedy obtížné získat aktuální ucelený obrázek u vyvíjených konceptů. Nejaktivnějšími jsou v této oblasti USA, Kanada a Velká Británie. V těchto zemích již probíhá předlicenční hodnocení některých typů. Žádný však není ve výstavbě. V Rusku probíhá vývoj několika reaktorů, které spadají do skupiny SMR. Jedná se o moderní reaktory IV. generace, ale i o lehkovodní minireaktory. V aktuální době je vyvíjeno celkem 24 modulárních reaktorů malého výkonu. Nejvíce jich je lehkovodních, ale jsou i těžkovodní, chlazené plynem nebo těžkými kovy. [21][22][23]

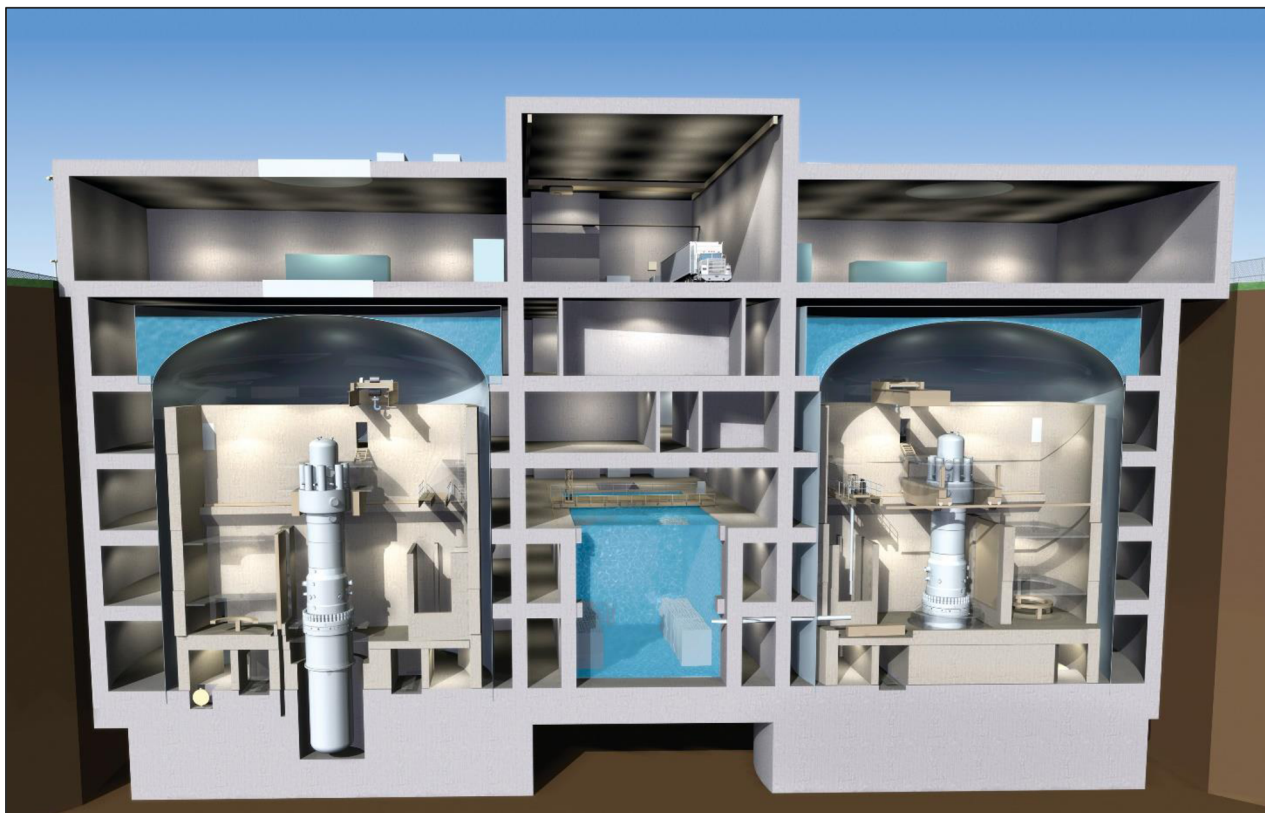
Tabulka 6 - SMR ve vývoji. [21]

Země	Název	Výrobce	Výkon (MWe/MWt)
Lehkovodní reaktory			
Argentina	CAREM	CNEA	25/100
Brazílie	FBNR	FURGS	72/218
Francie	Flexblue	DCNS	160/600
Korea	SMART	KAERI	100/330
Rusko	ABV-6M	OKBM Afrikantov	8,3/38
	SHELF	NIKIET	6/28
	RITM-200	OKBM Afrikantov	50/175
	VK-300	RDIPE	250/750
	WWER-300	OKBM Afrikantov	300/850
	KLT-40S	OKBM Afrikantov	35/150
USA	UNITHERM	RDIPE	2,5/20
	mPower	Babcock & Wilcox	180/530
	NuScale	Nuscale Power	45/166
	Westinghouse SMR	Westinghouse	225/800
Těžkovodní reaktory			
Indie	PHWR-220	NPCIL	236/755
Plynem chlazené reaktory			
Čína	HTR-PM	Tsinghua Univ.	200/500
JAR	PBMR1	PBMR	164/400
USA	GT-MHR	General Atomics	150/350
	EM2	General Atomics	240/500
Reaktory chlazené tekutými kovy			
Čína	CEFR	CNEIC	20/65
Japonsko	4S	Toshiba	10/30
Rusko	BREST-OD-300	RDIPE	300/700
	SVBR-100	AKME	101/280
USA	G4M	Gen4 Energy	25/70

4 Jednotlivé typy reaktorů

4.1 mPower

Malý modulární jaderný reaktor mPower vyvíjený firmou Babcock & Wilcox (B&W) je lehkvodní reaktor PWR integrálního typu, který je navržený pro výrobu ve velkém výrobním závodě a následné převezení na místo provozu a připojení do sítě. Jeho tepelný výkon je 530 MWt a elektrický výkon 180 MWe. [21][22]



Obrázek 10 - Vizualizace elektrárny se dvěma reaktory mPower. [25]

Tlaková nádoba reaktoru obsahuje kromě aktivní zóny a regulačních orgánů i další části primárního okruhu jako čerpadla, výměníky a další. V aktivní zóně je 69 palivových souborů s mříží 17x17 klasického tlakovodního typu, ale délka je zkrácena na dva metry. Celková výška je 23 m a průměr 4,5 m. Palivo je obohacené maximálně do 5 % a používají se gadoliniové vyhořívající absorbátory. Palivový cyklus reaktoru je standardně čtyřletý (48 měsíců), ale je možnost jej prodloužit až na 60 měsíců.

Celý reaktor je umístěn do podzemního kontejnmentu. Hlavní důraz klade na pasivní bezpečnostní systémy. Jeho integrální konstrukce je navržena tak, aby nedošlo ke ztrátě chladiva a vzniku havárie. Parogenerátory jsou zde nahrazeny trubkovými výměníky, které jsou stejně jako čerpadla uvnitř tlakové nádoby. Pod víkem se nachází parní prostor, který nahrazuje kompenzátor a pohony řídicích tyčí jsou umístěny také uvnitř.

Takto vyráběné moduly by byly sloučeny do elektrárny o jakékoliv velikosti, nejpravděpodobnější je však sloučení dvou modulů do elektrárny o kapacitě 380 MWe využívajících turbínových generátorů. Výroba těchto reaktorů by pak měla trvat tři roky. První reaktor, který je plánován v Clinch River v Tennessee má být firmou B&W uveden do provozu v roce 2022. Plánovaná životnost těchto reaktorů by pak měla být 60 let. [21][22][26]

4.2 NuScale

Tento reaktor je podobně jako mPower lehkovodní reaktor integrálního typu, vyráběný stejnojmennou firmou Nuscale Power. Má však menší instalovaný výkon 160 MWt a 45 MWe. Také jeho rozměry jsou menší a s hmotností 700 tun lze poměrně snadno přepravit z místa výroby na místo určení. [21][27]



Obrázek 11 - Řez tlakového reaktoru Nuscale. [28]

Tlaková nádoba má průměr 3 m a nachází se v ní aktivní zóna, nad ní regulační tyče a nad nimi dva parogenerátory a kompenzátor objemu. V aktivní zóně probíhá řízená štěpná reakce, jako palivo je zde použito UO_2 obohacené na 4,95 %. Palivo je uskupeno do 37 palivových souborů klasických tlakovodních reaktorů s mříží 17x17, ale zkrácených na dva metry. Standardní palivový cyklus je dvouletý, ale lze ho prodloužit až na pět let. Při pětiletém cyklu je však potřeba použít palivo obohacené nad 5 %.

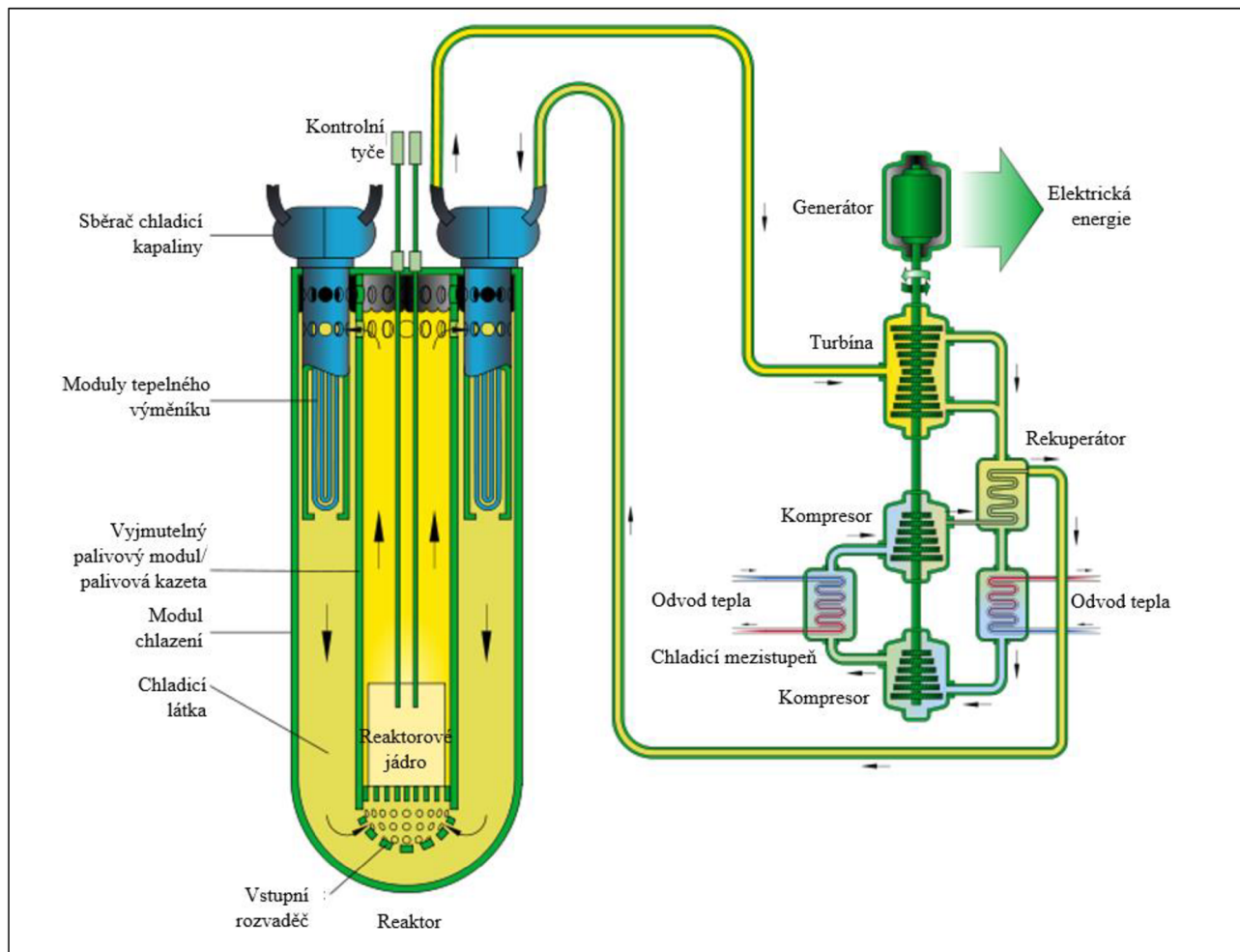
Reaktor má být umístěn pod povrchem a využívá přirozené cirkulace, tudíž nepotřebuje čerpadla k nucené cirkulaci. Voda procházející aktivní zónou předá svoji energii vodě v sekundárním okruhu, čímž se ochladí a klesne zpět pod aktivní zónu a tím je zaručena přirozená cirkulace. Jedním z bezpečnostních prvků je vysokotlaký kontejnment, další jsou dva pasivní systémy odvodu přebytečného tepla, jejichž cílem je dlouhodobé udržení stabilního chlazení.

Jednotlivé moduly mohou být opět slučovány do větších elektrárenských celků. Z jedné řídicí věže může být řízeno až 12 reaktorů, což dává celkový výkon 600 MWe. V případě potřeby však může být počet reaktorů i nižší. Všechny jsou umístěny do společné betonové nádoby naplněné vodou. Při výměně paliva by byl celý reaktor vyjmut a přesunut na místo výměny. Vyhořelé palivo ze všech reaktorů je pak skladováno v jednom centrálním bazénu.

Společnost Nuscale plánuje spustit provoz prvního reaktoru tohoto typu do roku 2026 v Americkém Idaho. [21][22][27]

4.3 SVBR-100

Jaderný reaktor SVBR-100, který byl vyvinut společností AKME, je rychlý reaktor chlazený tekutými kovy, slitinou olovo-bismut. Tento projekt navazuje na zkušenosti s návrhem a provozem reaktorů používajících toto chladivo, využitých pro ruské jaderné ponorky. Reaktor má výkon 280 MWt a 101 MWe, ale elektrický výkon může být proměnlivý v závislosti na parametrech páry, 70-100 MWe. [21][22][29]



Obrázek 12 - Schéma reaktoru chlazeného tekutým olovem. [29]

Při chlazení reaktorů těžkou kovovou látkou, v tomto případě sloučeninou olova a bismutu, se také využívá proudění. Je ale výhodou, že tyto sloučeniny mají mnohem vyšší bod varu. Není tak nutné dosahovat příliš vysokých tlaků, což zjednodušuje konstrukci reaktorů. Další výhodou je, že nedochází k úniku radioaktivní páry, která v primárním okruhu není. Teplota tání chladiva je 123,5 °C a teplota varu 1670 °C. Hodnoty, při kterých reaktor pracuje jsou 550 °C – 800 °C, což je velmi vzdálené od krajních hodnot.

V aktivní zóně se nachází 55 hexagonálních palivových souborů a v každém je 220 palivových proutků. Jako palivo zde může být využito více variant, ale standardně se používá UO₂ s obohacením na 16,4 %, ale také je možné použít MOX. Palivový cyklus trvá 7-8 let a palivo se vyměňuje externě vynětím aktivní zóny. Celková životnost by pak měla dosahovat 60 let. Konstrukce tohoto reaktoru je opět integrální, se snadnou možností převozu

při rozměrech 4,5 m průměr a 8,2 m výška. V reaktoru je opět využito pasivních bezpečnostních systémů a další výhodou je, že při výpadku elektrické energie je systém schopný uchládit sám sebe.

Jak již bylo zmíněno, tak projekt navazuje na úspěšný provoz reaktorů stejného typu v ponorkách. V roce 2019 byl reaktor SVBR-100 spuštěn v Ruském Dimitrogradu a je to první reaktor chlazený těžkými kovy, který je využit k výrobě elektrické energie. [21][22][29][30]

4.4 BREST

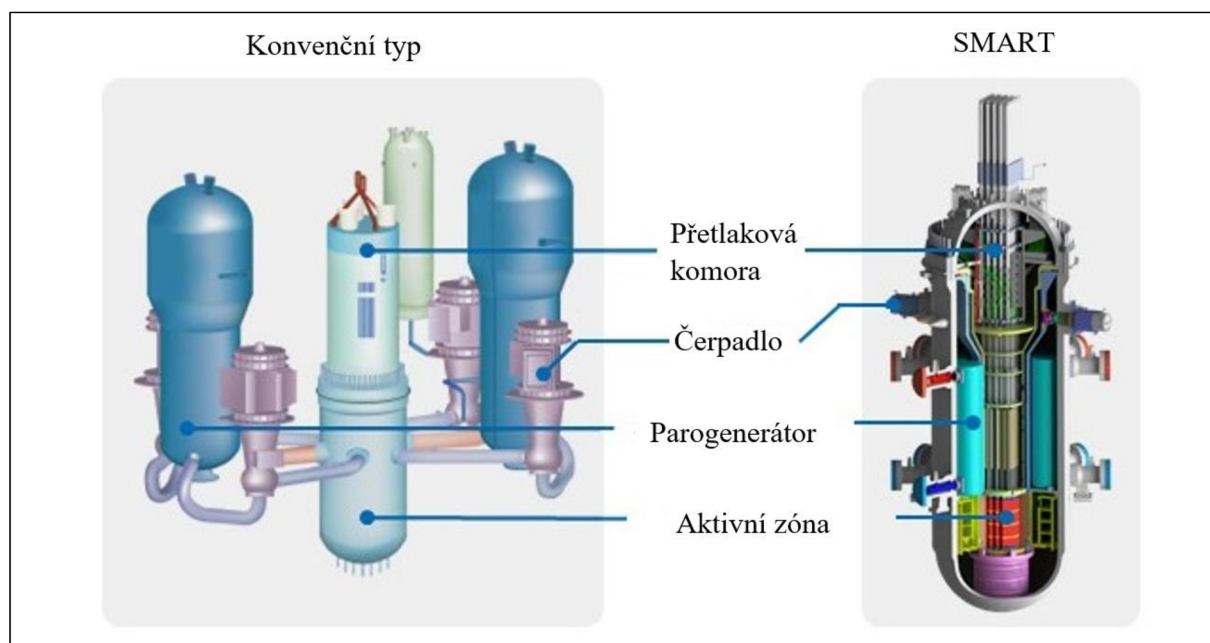
Reaktor BREST je dalším ruským reaktorem, který je chlazený těžkým kovem, vyvíjený společností NIKIET. Jde o rychlý neutronový reaktor, což znamená, že neobsahuje moderátor a neutrony nejsou zpomalovány. Výkon tohoto reaktoru dosahuje 700 MWt a 300 MWe.

Jako palivo je zde využita směs uranu a plutonia (U-Pu) v nitridové formě, chladivem je roztavené olovo a pracovní teplota reaktoru je 540 °C. Palivový cyklus trvá 10 měsíců, ale použité palivo se dá na místě přepracovat. Výhodou je, že se toto palivo nedá zneužít k výrobě jaderných zbraní. Všechny hlavní komponenty jsou ponořeny v bazénu s roztaveným olovem a krom běžných součástí jsou zde použity i nadkritické parogenerátory.

První komerčně spuštěný reaktor tohoto typu by měl být v sibiřském městě Seversk a to do roku 2026. Počítá se přitom se spojením více modulů, na celkový předpokládaný výkon 1200 MWe. [22][31][32]

4.5 SMART

Jihokorejský reaktor SMART (*System-integrated Modular Advanced Reactor*), navržený Korejským institutem pro výzkum atomové energie (KAREI), je tlakovodní reaktor integrálního typu s výkonem 330 MWt a 100 MWe. Je navržený tak, aby jeho využití bylo multifunkční, například výroba elektřiny, aplikace v teplárenství nebo odsolování mořské vody. Životnost reaktoru SMART je odhadována na 60 let. [22][31]



Obrázek 13 - Porovnání reaktoru SMART s konvenčním typem reaktoru. [31]

V aktivní zóně je 57 palivových souborů podobných jako v klasickém PWR, ale zkrácených. Palivo je použito na bázi uranu s obohacením do 5 % a palivový cyklus je standardně nastavený na 36 měsíců. SMART využívá 4 čerpadla k nucené cirkulaci chladiva, které prochází přes 8 parogenerátorů, které jsou součástí tlakové nádoby. Reaktor je rozdělen

na 4 části po dvou parogenerátorech. Při poruše lze konkrétní část vypnout a s nižším výkonem pokračovat dál až do plánované odstávky.

Všechny aktivní bezpečnostní systémy byly počátkem roku 2016 nahrazeny pasivními a odvod zbytkového tepla je také pasivní. Při havárii vydrží systém odvádět teplo 72 hodin bez zásahu obsluhy. První reaktor bude postaven v Saudské Arábii podle dohody se společností KAREI. Jedna jednotka zvládne denně vyrobit 90 MW elektrického výkonu a 40 milionů litrů odsolené mořské vody. [22][31][33]

4.6 CAREM-25

CAREM-25 je lehkovodní malý modulární jaderný reaktor integrálního typu vyvíjený Argentinskou národní komisí pro atomovou energii (CNEA). Výkon této jednotky je 100 MWt a 25 MWe, může však být bez větších úprav navýšen až na 100 MWe. Primární využití by mělo být dodání elektřiny do oblastí s menší spotřebou, ale možná je i dodávka odsolené mořské vody v přímořských oblastech.

Reaktor využívá jako palivo UO_2 obohacené na 1,8 % - 3,1 % a délka palivového cyklu je přibližně jeden rok. Aktivní zóna obsahuje 61 palivových souborů dlouhých 1,4 m, které jsou poskládané do trojúhelníkové mříže. Celkové rozměry tlakové nádoby jsou průměr 3,16 m a výška 11 m a většina komponent primárního okruhu je umístěno v ní. Nad aktivní zónou je 12 identických parogenerátorů, které produkují přehřátou páru o tlaku 4,2 MPa. Absorpční tyče jsou vyrobeny ze slitiny kovů Ag-In-Cd.

Pro reaktor CAREM je použito několik bezpečnostních systémů. Při detekované poruše se do reaktoru automaticky vstříkne kyselina boritá. Pasivním odvodem zbytkového tepla lze při poruše systém udržet bez havárie po dobu 36 hodin, aniž by byla potřeba zásah obsluhy. Celý reaktor je umístěn ve válcovém betonovém kontejnmentu o tloušťce 1,2 m.

Projekt CAREM byl poprvé představen v roce 1984, od té doby prošel četnými úpravami a v roce 2006 byl prohlášen věcí argentinského národního zájmu. První prototyp se staví blízko města Atuchy a měl být v provozu už v roce 2019. První větší verze pravděpodobně o výkonu 100 MWe je plánovaná v provincii Formosa. 70 % komponent potřebných pro výrobu reaktoru CAREM bude zabezpečeno místní argentinskou výrobou. [22][34][35]

4.7 KLT-40S

Reaktor KLT-40S je ruský reaktor navazující na předchozí typ KLT-40, který byl používán pro pohon ledoborců. Je to lehkovodní reaktor typu PWR o výkonu 35 MWe. Jeho primární využití by mělo být zásobování odlehlých oblastí elektřinou a teplem z plovoucí jaderné elektrárny.

Tento typ jaderného reaktoru využívá klasické palivo UO_2 obohacené na 20 % a výměna je prováděna jednou za 3,5 – 4 roky, přičemž pokaždé jsou vyměněny všechny palivové soubory. Na konci dvanáctiletého provozního cyklu je reaktor s celou elektrárnou převezen na centrální místo, kde jsou provedeny generální opravy. Celková životnost reaktoru je 40 let.

Cirkulace je nucená pomocí čerpadel, ale při nouzovém chlazení je využito přirozené konvekce. Pracovní teplota je 316 °C, při které chladivo cirkuluje s tlakem 12,7 MPa. Bezpečnost je zajištěna pasivními systémy a izolačními bariérami. Primární okruh je uzavřený a celý reaktor chrání dostatečně silný kontejnment. Při případné havárii dojde k malému dopadu na obyvatelstvo díky využití v málo osídlených oblastech.

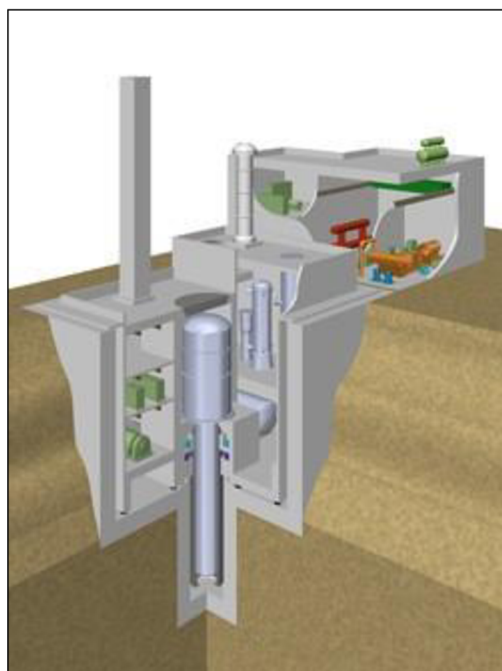
Výstavba ruské plovoucí jaderné elektrárny, která je umístěna na lodi Akademik Lomonosov začala v roce 2007. Na této lodi, která má hmotnost 20 000 tun, jsou nainstalovány dvě jednotky KLT-40S, které mají dohromady výkon 70 MWe. K připojení do sítě došlo v roce 2019, plovoucí elektrárna se nachází u města Pevek na Čukotce a doposud dodala do sítě 21 GWh elektřiny. Provoz je však zatím zkušební, po dokončení testování by mělo ke komerčnímu provozu dojít v létě roku 2020. [22][36][37]



Obrázek 14 - Plovoucí elektrárna Akademik Lomonosov. [37]

4.8 4S

Reaktor 4S je japonský reaktor vyvíjený firmou Toshiba. Pod názvem se ukrývají anglická slova *Super-Safe, Small&Simple*. Výkon reaktoru 4S je 30 MWt a 10 MWe, ale existují i verze s vyšším výkonem, ten se odvíjí od složení paliva a jeho obohacení. Tento reaktor se také často označuje jako jaderná baterie díky výkonu a hlavně dlouhému palivovému cyklu. [22][38]



Obrázek 15 - Schéma elektrárny s reaktorem 4S. [38]

4S je sodíkem chlazený reaktor, který využívá jako palivo slitiny uranu, zirkonia a plutonia. Palivový cyklus může být až 30 let dlouhý, palivo by se nechalo po této době rok chladit a poté by se vyjmul a odeslalo ke skladování nebo likvidaci. Konstrukce je podobná ostatním kovem chlazeným reaktorům. Teplota chladicího média je 510 °C – 550 °C, je tedy

mimo výrobu elektrické energie vhodný i pro výrobu vodíku. Aktivní zóna je složena ze 169 palivových souborů a pouze jedné absorpční tyče. Cirkulace je zajištěna elektromagnetickými čerpadly. Veškeré komponenty primárního okruhu jsou obsaženy v tlakové nádobě. Výhodou je také výměra potřebná pro celou elektrárnu, která je 22x16 m.

Při poruše je proudění zajištěno pomocí pasivních bezpečnostních systémů. V případě nebezpečí je do jádra reaktoru spuštěna středová tyč absorberu neutronů. Tlaková nádoba reaktoru je chlazena pomocí proudění okolního vzduchu.

V roce 2004 tento projekt získal podporu a firma Toshiba rozhodla o vybudování takovéto jednotky ve městě Galena na Aljašce, které je hodně odlehlé, a proto musí být energeticky soběstačné. V současné době není uveden termín, kdy by měl být projekt dokončen. Reaktory podobného typu by měly být komerčně využity jako zdroj energie v odlehlých dolech, jako odsolovací zařízení a pro výrobu vodíku. [22][38]

4.9 HTR-PM

Jaderný reaktor HTR-PM je malý modulární reaktor čínské výroby, který je chlazený plynem. Navazuje na předchozí zkušební projekt HTR-10, který se liší výkonem. Jednotka HTR-PM má výkon 500 MWt a 200 MWe a její životnost je 40 let.

Chladivem primárního okruhu je helium, které má provozní tlak 7 MPa. Helium se v aktivní zóně ohřeje na 750 °C a při této teplotě vstupuje do parogenerátoru a následně klesá zase dolů. Jako palivo je zde použit UO_2 obohacený na 8,5 % ve formě malých kuliček o průměru 0,5 mm. Výhoda kuličkového paliva spočívá v jeho nepřetržitém doplňování. Kuličky v jaderném reaktoru kolují a je u nich měřena míra vyhoření, při dosažení cílové hranice jsou vypuštěny do skladovací nádrže. Na tlakovou nádobu je připojen parogenerátor a dvě takovéto dvojice tvoří jednotku se společnou turbínou. Reakce jsou řízeny pomocí 24 grafitových tyčí

Provoz reaktoru zajišťuje několik bezpečnostních prvků. Radioaktivita chladiva je za normálních podmínek velice nízká. HTR-PM pracuje s inherentními bezpečnostními prvky. Vyvážená konstrukce a vhodné vlastnosti paliva s potažením zajišťují základní bezpečnostní funkce. Regulační tyče, velký záporný teplotní koeficient a velká teplotní rezerva předcházejí vzniku havárie. Kdyby k havárii došlo, pasivní odvod tepla zabrání roztavení paliva a dojde tak pouze k minimálnímu vyzáření radioaktivity do okolí.

Projekt byl zahájen v Číně v roce 2001 a k začátku výstavby zkušební reaktoru došlo v roce 2012 u města Rongcheng a nyní je spuštěn zkušební provoz. Po dokončení testování se počítá se sériovou výrobou modulů, které by mohly být spojovány a připojeny k jedné turbíně, čímž by se navýšil výkon například na 200 MWe, 600 MWe nebo 1000 MWe. [22][35][39]

5 Možnosti využití

Jaderné reaktory našly primární využití pro výrobu elektrické energie. Je složité, aby elektrina vyráběná z jádra byla v dnešní době konkurenceschopná, má však pořád obrovský potenciál. Technologie používané u malých modulárních reaktorů jsou vhodné i pro jiné typy využití, a to hlavně díky delším palivovým cyklům a větší bezpečnosti. Je to například, výroba vodíku, odsolování mořské vody, námořní doprava a v neposlední řadě výroba tepelné a elektrické energie. Nabízí se i možnosti víceúčelového využití, které by tyto reaktory ekonomicky zvýhodňovalo.

5.1 Výroba elektrické energie v rozvojových zemích

Nárůst populace a ekonomický rozvoj v zemích třetího světa zapříčiňuje vyšší poptávku po elektrické energii. Jako řešení by se nabízela jaderná energetika, avšak tyto země často nemají potřebný kapitál a znalosti pro stavbu klasických jaderných elektráren.

Vhodnou alternativou by mohly být právě SMR, které by byly licencovány a vyráběny v jiných energeticky vyspělejších zemích (Rusko, Čína, USA) a v dané lokalitě by byly postaveny a provozovány. Nižší výkon SMR je vhodný také v souvislosti s nedostatečně rozvinutými rozvodnými sítěmi. V případě osvědčení a ekonomického zisku by se tyto elektrárny mohly postupně rozrůstat do více bloků, k čemuž jsou přizpůsobeny například reaktory NuScale, mPower nebo HTR-PM. Nevýhodou by mohlo být zvýšené riziko teroristických útoků a využití jaderného paliva k vojenským účelům, což však z velké části eliminuje technické provedení reaktorů.

Další využití by SMR mohly najít v odlehlých oblastech s velmi nízkou hustotou osídlení nebo v odlehlých dolech jako jediný zdroj energie. Pro tento účel se nejvíce hodí reaktory s co nejdelším palivovým cyklem, které nemají tak velký výkon. Tato kritéria dobře splňuje reaktor 4S, který má být postaven na Aljašce. [21][38]

5.2 Teplárenství

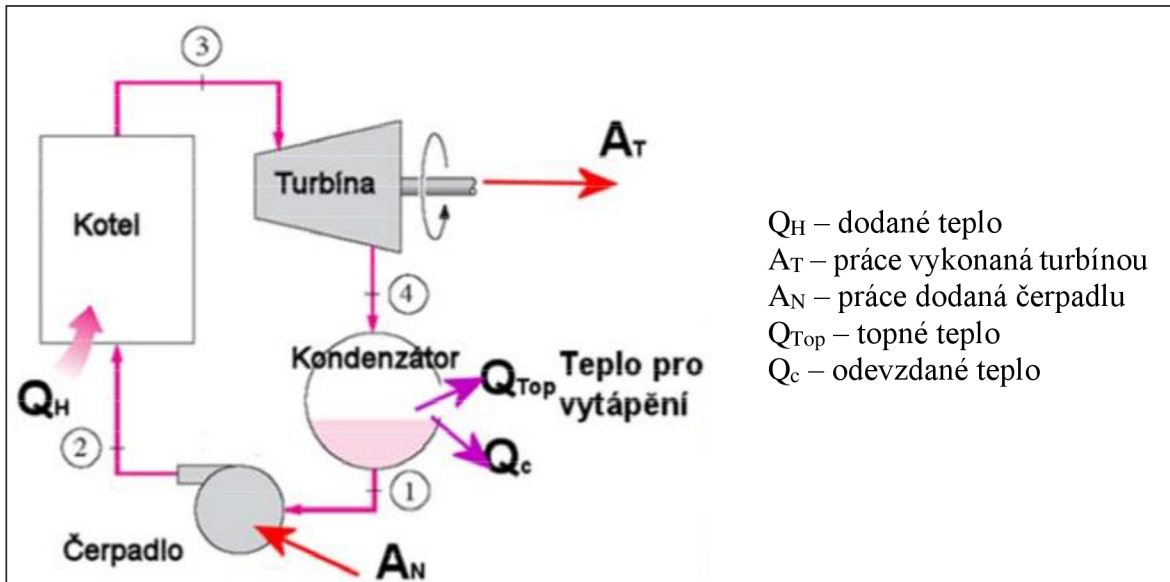
Dálkové vytápění pomocí tepláren není žádnou novinkou. Využívají je většinou domácnosti nebo kancelářské prostory ve větších městech. Většina tepláren však funguje na principu spalování fosilních nebo jiných druhů tuhých paliv. Vytápění rezidenčních budov pomocí více lokálních zdrojů tepla, má mnohem větší dopad na životní prostředí než využití jednoho velkého zdroje v podobě teplárny.

Nabízí se otázka, zda by se k provozu takové teplárny dal využít jaderný reaktor. V Helsinkách vznikla studie, která dokazuje, že reaktor o menším výkonu, řádově stovek megawatt tepelných, by město zvládlo zásobit teplem a napomohl by snížit emise. Při sériové výrobě reaktorů, by takovýto typ tepláren mohl řešit problém výroby tepla ve větších městech. [40]

5.3 Kogenerace

Kogenerace znamená kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla, která je ekologická a v mnoha případech dosahuje celkové účinnosti přes 90 %. Kogeneraci lze využít u různých druhů elektráren, s parní turbínou, plynovou, paroplynovou a dalšími typy. Účelem je využít zbytkové teplo, které je v běžných případech vyžáreno do okolí.

U jaderných elektráren také není využití zbytkového tepla žádnou novinkou. Například jaderná elektrárna Temelín dodává teplo Týnu nad Ohří. Dukovany plánují dodávání tepla do Brna zatím neuskutečnily. Pro SMR by mohla být kogenerace dalším krokem k efektivnějšímu a ekonomičtějšímu provozu. [40][41]



Obrázek 16 - Schéma využití energie při kogeneraci. [42]

5.4 Odsolování mořské vody

V přímořských oblastech by SMR mohly být využity mimo jiné i k odsolování mořské vody. Nedostatek pitné či užitkové vody v některých teplejších oblastech je v dnešní době velký problém. Jedno z řešení, které se nabízí, je odsolování mořské vody, které je však energeticky velice náročné. Je proto potřeba najít stabilní, a hlavně co nejlevnější zdroj energie.

Nejstarší metodou používanou k odsolení vody je destilace, ale existují i další a účinnější metody, jako komprese páry, reverzní osmóza, vymrazování, elektrodialýza nebo iontová výměna. Všechny metody však spotřebují značné množství energie. Problémem při odsolování je odpadní produkt zvaný solanka, extrémně slaná voda, která škodí životnímu prostředí. S jedním litrem odsolené vody vzniká 1,5 litru solanky. Při správném nakládání a zpracování se však dají negativní vlivy potlačit. [43][44]

5.5 Výroba vodíku

Výroba vodíku má v dnešní době velký potenciál, a to hlavně v dopravě. Palivové články využívající vodík by mohly konkurovat klasickým spalovacím motorům. Existuje několik metod, jak vodík vyrábět. Při většině z nich jsou využívána fosilní paliva. Nejčastěji se vodík získává reformingem zemního plynu nebo jako vedlejší produkt při zkapalňování nebo zplynování uhlí. Nevýhodou však je, že při těchto metodách vznikají velké emise CO_2 .

Další metodou výroby je vysokoteplotní elektrolýza páry, která by mohla být provozována pomocí malých modulárních reaktorů. Tento způsob je efektivnější než výroba vodíku elektrolýzou vody a dosahuje účinnosti až 45 %. Pára o teplotě $800\text{ }^\circ\text{C}$ generovaná reaktorem je přivedena do vysokoteplotního elektrolyzátoru, ze kterého vychází směs vodíku a páry. Vodík je následně oddělen v kondenzační jednotce.

Reaktor může být navržen tak, aby vyráběl elektrickou energii a v případě přebytku v síti by se mohl přepnout na výrobu vodíku. Tímto způsobem by se tak vhodně mohl doplňovat s alternativními zdroji elektrické energie. Reaktory touto metodou elektrolýzy dokážou vyrobit

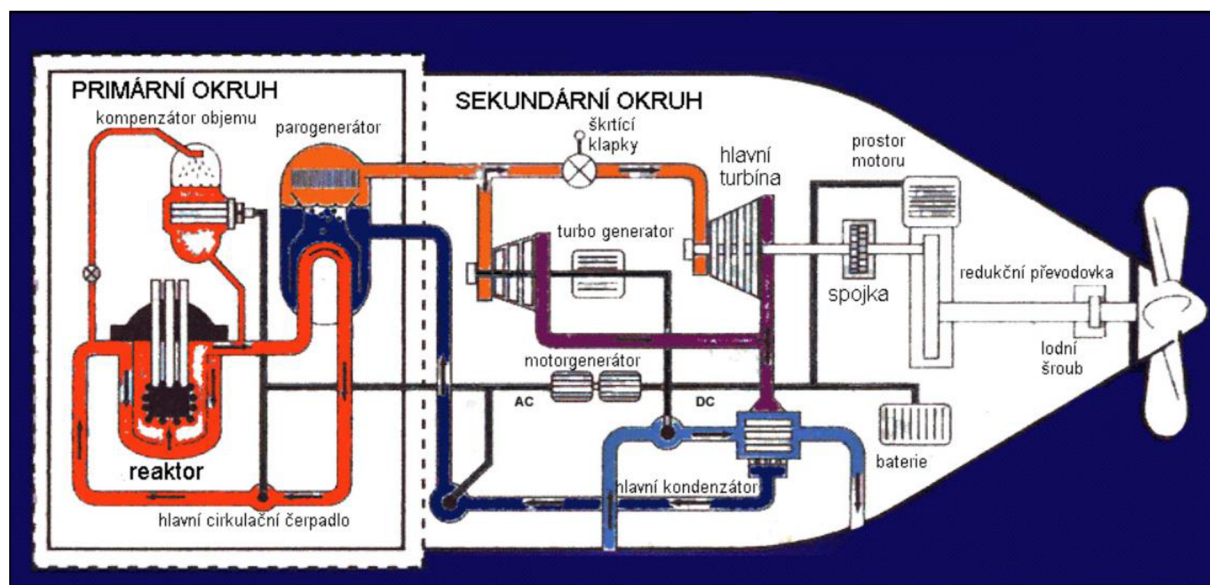
velké množství vodíku, který může být komerčně využíván. Problémem je však jeho skladování, které vyžaduje dokonale těsné nádoby. [45][46][47]

5.6 Námořní doprava

Jedno z prvních využití pro jaderné reaktory o malých výkonech je právě v námořních plavidlech. Ať už jde o ponorky, ledoborce, torpédoborce nebo letadlové lodě. Nejvíce aktivní v této oblasti jsou klasické jaderné velmoci Rusko, Velká Británie, USA a Čína. První jaderná ponorka byla americká USS Nautilus a vyplula v roce 1955 a první hladinové plavidlo na jaderný pohon byl ruský ledoborec Lenin, který vyplul v roce 1959.

Většina reaktorů použitá v námořních plavidlech je tlakovodního typu, které jsou podobné reaktorům využívaným v elektrárnách. V několika ohledech se však liší. Obohacení uranu je mnohem vyšší (více než 20 %) kvůli zmenšeným prostorům a také dlouhému palivovému cyklu, který trvá deset a více let. Jako palivo se zde používají mírně odlišné slitiny uranu než u klasických reaktorů. Systém jaderného pohonu je rozdělen na tři sektory, primární, sekundární a terciární, stejně jako u jaderných elektráren. Pára ze sekundárního okruhu pohání dvě turbíny. Jedna je napojena na elektrický generátor, který dodává plavidlu elektrickou energii a druhá turbína je spojena s lodním šroubem, který celé plavidlo pohání.

V budoucnu by mohly být jaderné pohony využity i u velkých nákladních lodí, čímž by napomohly snížit emise vzniklé spalováním fosilních paliv. [48][49][50]



Obrázek 17 - Uspořádání jaderného pohonu plavidel. [51]

5.7 Využití pro ČR

Česká republika má v oblasti energetiky dlouhou tradici. Obě české jaderné elektrárny Dukovany a Temelín dodávají do sítě okolo 35 % elektrické energie a v budoucnu je plánováno navýšení až na 50 %. Odsolování mořské vody nebo námořní doprava je pro Českou republiku bezpředmětná, ale i přesto by SMR své využití mohly najít.

Jednou z možností by mohla být dostavba nebo nahrazení stávajících bloků našich jaderných elektráren. Výhodou by bylo využití vybudované infrastruktury a vhodné a prověřené lokality pro jadernou energetiku. SMR by se mohly uplatnit i jako lokální zdroje energie, které by dodávaly teplo a elektrickou energii pro průmyslovou i neprůmyslovou potřebu. Většina konceptů malých modulárních reaktorů počítá s jejich umístěním pod zemí a více vrstvou ochranou, proto by se mohly nacházet blíž obydleným oblastem a mít právě lokální využití.

Vhodné by mohly být i pro samostatnou dodávku tepla, kde by nahradily klasické teplárny spalující fosilní paliva nebo jiná tuhá paliva.

Energetická politika v České republice spadá pod Ministerstvo průmyslu a obchodu. Ve spolupráci s ÚJV Řež a Fakultou jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze mají za úkol vybrat vhodné reaktory a jejich potenciální využití. Nejvhodnějšími kandidáty jsou dva americké lehkovodní reaktory mPower a Nuscale a také ruský reaktor SVBR-100, který je chlazený tekutými kovy. [21]

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo popsat generace jaderných reaktorů a následně se zaměřit na malé modulární reaktory, jejich popis, jednotlivé typy vyvíjených SMR a také možnosti jejich využití. Práce by měla čtenáře dostatečně seznámit s daným tématem. Pro úspěšné dokončení práce bylo potřeba důkladně si nastudovat téma z různých zdrojů a následně udělat ucelenou a logicky navazující rešerši, čehož bylo docíleno v pěti kapitolách.

Od prvního rozštěpení uranu uběhlo už přes 80 let a od té doby je jaderná energetika nedílnou součástí našeho světa. Největší využití doposud našla při výrobě elektrické energie. V jaderných elektrárnách, které jsou velice nákladné na výstavbu a technické provedení, je jako srdce jaderný reaktor. Známe různé druhy reaktorů, jako tlakovodní, varný, chlazený tekutými kovy nebo plynem chlazený, ale je jich mnohem víc s různým technickým provedením. Některé byly však pouze zkušební nebo pro vědecké účely a komerčně se vůbec nevyužily. Doposud nejvíce používaným reaktorem je tlakovodní.

Jednou z odnoží jaderných reaktorů jsou malé modulární reaktory, které dosahují výkonu maximálně do 300 MWe a jejich modularita spočívá v možnosti sériové výroby a také jednoduššímu technickému provedení z komponent, které budou vyráběny v továrnách a v místě provozu smontovány. Většina SMR je zatím pouze ve fázi konceptu, vývoje nebo testování, jsou ale i některé typy, které už jsou v provozu.

Nejúspěšnějšími zeměmi ve vývoji jaderné energetiky a také v malých modulárních reaktorech jsou Spojené státy americké s reaktory mPower a Nuscale, Rusko s reaktorem SVBR-100 nebo Čína s reaktorem HTR-PM. Na vývoji však spolupracují i jiné země a těchto typů reaktorů je vymyšlena celá řada.

Ačkoliv jaderná energetika skýtá jistá nebezpečí a jistě si najde své odpůrce, kteří mohou kritizovat práci s jaderným materiálem, možné havárie a v neposlední řadě nakládání s jaderným odpadem. Přesto je však energie vyráběná z jádra nedílnou součástí energetického průmyslu. A díky vysoké bezpečnosti, chytrému technickému provedení a snaze snížit náklady na výstavbu si mohou i malé modulární reaktory najít svoje využití. Výroba elektřiny se nabízí jako první a díky snadné regulovatelnosti by mohla být vhodně nakombinována s alternativními zdroji elektrické energie. I rozvod tepla by mohl být primárním cílem těchto reaktorů nebo by se mohlo využívat zbytkové teplo pomocí kogenerace. SMR jsou již dlouhá léta nedílnou součástí námořní dopravy a v neposlední řadě by mohly být využity na výrobu vodíku nebo odsolování mořské vody.

Využití jaderného paliva k výrobě elektřiny nebo jiné energie je velice kontroverzní, ale při stálém zvyšování bezpečnosti, vyšším využití jaderného paliva a novým modernějším technologiím, si určitě své místo v energetice udrží a možná i posílí, a to nejen ve světě, ale i v České republice. Napomoci tomu mohou právě malé modulární jaderné reaktory.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DUBŠEK, František. *Jaderná energetika*. Vyd. 2. dopl. Brno: PC-DIR, 1997. ISBN 80-214-0833-2.
- [2] BEČVÁŘ, Josef. *Jaderné elektrárny*. 2. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1981, 634 s.
- [3] KLIK, František a Jaroslav DALIBA. *Jaderná energetika*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství Českého vysokého učení technického, 2002. ISBN 80-010-2550-0.
- [4] KUSALA, Jaroslav. *Jaderná energetika. Skupina ČEZ* [online]. 2004 [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/nuklear.htm>
- [5] Radioaktivita. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/urychl/k12.htm>
- [6] Atomové jádro a jaderné reakce. *Gymkren* [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.gymkren.cz/wp-content/uploads/UO29.-Atomov%C3%A9-jadro-a-jadern%C3%A9-reakce.pdf>
- [7] FICKER, Ondřej. Fúze, to není jen vtíp I: Proč se o to snažíme a co nám stojí v cestě? *Atominfo* [online]. 2013 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2013/07/fuze-to-neni-jen-vtip-i-proc-se-o-to-snazime-a-co-nam-stoji-v-cestech/>
- [8] Jaderné reakce. *Spssvsetin* [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <http://www.spssvsetin.cz/assets/06/reakce.htm>
- [9] BROMOVÁ, Edita, Dušan VARGONČÍK a Michael SOVADINA. *Jaderná energie a energetika* [online]. Simopt, 2013 [cit. 2020-01-20]. ISBN 978-80-87851-01-2. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/aplikace/encyklopedie-jaderna-energie-a-energetika>
- [10] Nuclear Power Reactors. *World nuclear association* [online]. 2020 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>
- [11] Základní typy jaderných reaktorů. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2020-02-12]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/zakladni-typy-jadernych-reaktoru>
- [12] Z čeho se skládá reaktor. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/reaktor_2.html
- [13] Jaderný energetický reaktor. *Svět energie* [online]. [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/jaderné-elektrarny/jaderný-energetický-reaktor>
- [14] ZOUL, David. Vývoj jaderných reaktorů od počátků po současnost. *Aldebaran* [online]. [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2020_10_rek.php
- [15] Generace jaderných reaktorů – jaké generace máme, čím se navzájem liší. *Atominfo* [online]. 28.3. 2016 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2016/03/generace-jadernych-reaktoru-jake-generace-mame-cim-se-navzajem-lisi/>
- [16] Jaderná zařízení v ČR. *Státní úřed pro jadernou bezpečnost* [online]. 2014 [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/jaderna-zarizeni/jaderna-zarizeni-v-cr/>
- [17] SUK, Pavel. ABWR Pokročilé varné reaktory. *Idnes.cz* [online]. 22.10. 2016 [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <https://pavelsuk.blog.idnes.cz/blog.aspx?c=561807>
- [18] WAGNER, Vladimír. Reaktory III. generace. *Osel.cz* [online]. 4.5. 2008 [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <https://www.osel.cz/3531-reaktory-iii-generace.html>

- [19] WAGNER, Vladimír. Reaktory IV generace. *Osel.cz* [online]. 16.5.2008 [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <https://www.osel.cz/3568-reaktory-iv-generace.html>
- [20] Vysokoteplotní reaktor HTGR. *Svět energie* [online]. [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/fotobanka?itemId=190>
- [21] SMR ve světě. *Malé jaderné reaktory* [online]. [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <http://malereaktory.cz/smr-ve-svete>
- [22] Small Nuclear Power Reactors. *World nuclear association* [online]. 2020 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
- [23] ŠEVEČEK, Martin. Malé modulární reaktory u nás a ve světě. *Oenergetice.cz* [online]. 7.3.2018 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jadernoelektrarny/male-modularni-reaktory-u-nas-ve-svete>
- [24] Tři aspekty, ve kterých mohou malé modulární reaktory překonat současné bariéry jaderné energetiky. *Atominfo* [online]. 30.5.2016 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2016/05/tri-aspekty-ve-kterych-mohou-male-modularni-reaktory-prekonat-soucasne-bariery-jadernoe-energetiky/>
- [25] Trend budoucnosti? SMR. *Atominfo* [online]. 12.9.2017 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2017/09/trend-budoucnosti-smr/>
- [26] Projekt malého reaktoru mPower má problémy a došlo ke snížení rozpočtu. *Atominfo* [online]. 17.4.2014 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2014/04/projekt-maleho-reaktoru-mpower-ma-problemy-a-doslo-ke-snizeni-rozpoctu/>
- [27] ŠEVEČEK, Martin. NuScale jako první žádá o licenci svého malého modulárního reaktoru. *Oenergetice.cz* [online]. 17.1.2017 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/nuscale-jako-prvni-zada-licenci-sveho-maleho-modularniho-reaktoru>
- [28] ČEZ se zajímá o malé reaktory. *Technický týdeník* [online]. 11.10.2019 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/energetika-teplo/cez-se-zajima-o-male-reaktory_48253.html
- [29] Malé jaderné reaktory dnes – SVBR-100. *Atominfo* [online]. 12.11.2012 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2012/11/male-jadernoe-reaktory/>
- [30] Rosatom schválil detailní revizi designu reaktoru SVBR-100. *Atominfo* [online]. 5.10.2015 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2015/10/rosatom-schvalil-detailni-revizi-designu-reaktoru-svbr-100/>
- [31] Infografika: Malé modulární reaktory (SMR) v pokročilé fázi vývoje. *Oenergetice.cz* [online]. 20.2.2020 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jadernoelektrarny/infografika-male-modularni-reaktory-smr-pokrocile-fazi-vyvoje?fbclid=IwAR38X5Ix5QFMczRuSbWbrvZV9MnCaAoOrXfDxkxQ2Rl0q-6dXHtevHQkFFU>
- [32] Rosatom v roce 2020 vynaloží 4 miliardy rublů do projektu reaktoru BREST-300. *Atominfo* [online]. 13.3.2020 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2020/03/rosatom-v-roce-2020-vynalozi-4-miliardy-rublu-do-projektu-reaktoru-brest-300/>
- [33] Korea a Saúdská Arábie postoupili při spolupráci na projektu SMART. *Atominfo* [online]. 20.1.2020 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2020/01/korea-a-saudska-arabie-postoupili-pri-spolupraci-na-projektu-smart/>
- [34] Malý modulární reaktor CAREM-25. *Atominfo* [online]. 1.4.2015 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2015/04/maly-modularni-reaktor-carem-25/>

- [35] Infografika: Malé modulární reaktory (SMR) ve výstavbě. *Oenergetice.cz* [online]. 9.12.2019 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/infografika-male-modularni-reaktory-smr-ve-vystavbe>
- [36] SUK, Pavel. Malé modulární reaktory, část II. *Idnes.cz* [online]. 28.11.2017 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://pavelsuk.blog.idnes.cz/blog.aspx?c=636387>
- [37] Plovoucí elektrárna Akademik Lomonosov už dodala do sítě 21 GWh elektřiny. *Atominfo* [online]. 11.3.2020 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2020/03/plovouci-elektrarna-akademik-lomonosov-uz-dodala-do-site-21-gwh-elektriny/>
- [38] TŮMA, Martin. Atomový reaktor do každé rodiny. Nebo aspoň města. *Vtm.e15.cz* [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://vtm.e15.cz/modularni-atomove-reaktory>
- [39] PUCHAR, Jiří. První parogenerátor pro čínský demonstrační reaktor HTR-PM prošel tlakovými testy. *Oenergetice.cz* [online]. 6.10.2018 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/prvni-parogenerator-cinsky-demonstracni-reaktor-htr-pm-prosel-tlakovymi-testy>
- [40] Zachrání malé reaktory systémy dálkového vytápění? *Atominfo* [online]. 25.3.2019 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2019/03/zachrani-male-reaktory-systemy-dalkoveho-vytapeni/>
- [41] BUDÍN, Jan. Kogenerace - princip, technologie a výhody. *Oenergetice.cz* [online]. 21.4.2015 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/technologie/kogenerace-princip-technologie-a-vyhody>
- [42] ŠTĚTINA, Josef. Kogenerace. *Oficiální výukové prezentace předmětu Termomechanika* [online]. Brno: Fakulta strojního inženýrství [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://docs.google.com/presentation/d/1UfxHnZDUPPisKt0bUlkEmVOqZhGNIndkoIcWda-ajng/edit?pli=1#slide=id.p31>
- [43] MURTINGER, Karel. Odsolování vody: Destilace, vymrazování, komprese a další. *Nazeleno.cz* [online]. 22.4.2010 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/technologie-1/odsolovani-vody-destilace-vymrazovani-komprese-a-dalsi.aspx>
- [44] DOHNAL, Radomír. Odsolování mořské vody ničí životní prostředí. Nejen spotřebou energie, ale také toxickou solankou. *Ekolist.cz* [online]. 16.5.2019 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/odsolovani-morske-vody-nici-zivotni-prostredi.nejen-spotrebou-energie-ale-take-toxickou-solankou>
- [45] NuScale: malé modulární reaktory pomohou také bezemisní výrobě vodíku nebo rafineriím ropy. *Proelektrotechniky.cz* [online]. 15.10.2019 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/vyroba-a-prenos/180.php>
- [46] Vysokoteplotní reaktor MHR-100. *Atominfo* [online]. 7.5.2019 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2019/05/vysokoteplotni-reaktor-mhr-100/>
- [47] JANÍK, Luděk. Jak se vyrábí palivo budoucnosti. Vodík pro auta i elektroniku. *Idnes.cz* [online]. 28.1.2008 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/technet/technika/jak-se-vyrabi-palivo-budoucnosti-vodik-pro-auta-i-elektroniku.A080127_234744_tec_technika_vse
- [48] PUCHAR, Jiří. Plavidla na jaderný pohon: Civilní plavidla. *Oenergetice.cz* [online]. 24.9.2015 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/ostatni/plavidla-na-jaderny-pohon-civilni-plavidla>

- [49] PUCHNAR, Jiří. Plavidla na jaderný pohon: Ponorky. *Oenergetice.cz* [online]. 10.9.2015 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/ostatni/plavidla-na-jaderny-pohon-ponorky>
- [50] PUCHNAR, Jiří. Plavidla na jaderný pohon: pohled do podpalubí. *Oenergetice.cz* [online]. 1.10.2015 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/plavidla-na-jaderny-pohon-pohled-do-podpalubi>
- [51] Schéma jaderného pohonu plavidel. In: *Wikipedia.org* [online]. 22.11.2014 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%BD_pohon#/media/Soubor:Jaderny_pohon.jpg

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

°C	Stupeň Celsia
Ag	Stříbro
BWR	Boiling water reactor / Varný reaktor
Cd	Kadmium
CO ₂	Oxid uhličitý
ČR	Česká republika
ČVUT	České vysoké učení technické
D ₂ O	Těžká voda – deuterium
GFR	Gas-cooled fast reactor / Rychlý reaktor chlazený plynem
GWh	Gigawatthodina
H	Vodík
H ₂ O	Voda
He	Helium
HTGR	High temperature gas cooled reactor / Vysokoteplotní plynem chlazený reaktor
IAEA	International Atomic Energy Agency / Mezinárodní agentura pro atomovou energii
In	Indium
LWGR	Light water cooled graphite-moderated reactor / Lehkou vodou chlazený reaktor s grafitovým moderátorem
m	Metr
MOX	Mixed oxide fuel / Směsné oxidické palivo
MPa	Megapascal
MWe	Megawatt elektrický
MWt	Megawatt tepelný
PHWR	Pressurised heavy water reactor / Těžkovodní reaktor
Pu	Plutonium
PWR	Pressurized water reactor / Tlakovodní reaktor
SCWR	Supercritical water reactor / Superkritický vodou chlazený reaktor
SFR	Sodium-cooled fast reactor / Sodíkem chlazený reaktor
SMART	Smart modular advanced reactor technology / Malý modulární reaktor
SMR	Small modular reactor / Malý modulární reaktor
U	Uran
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu
UO ₂	Oxid uraničitý
USA	United States of America / Spojené státy americké
VVER	Vodo-vodní energetický reaktor
W	Watt

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Fúzní schéma vodíku a deutria. [8]	12
Obrázek 2 - Štěpení uranu ${}_{92}\text{U}^{235}$ neutronem. [8]	13
Obrázek 3 - Hlavní naleziště uranových a thoriových rud. [1]	13
Obrázek 4 - Model palivového souboru VVER. [9]	14
Obrázek 5 - Schéma jaderného reaktoru. [2]	15
Obrázek 6 - Generace jaderných reaktorů. [14]	16
Obrázek 7 - Tlakovodní reaktor PWR. [11]	18
Obrázek 8 - Varný reaktor BWR. [11]	19
Obrázek 9 - Vysokoteplotní reaktor HTGR. [20]	21
Obrázek 10 - Vizualizace elektrárny se dvěma reaktory mPower. [25]	26
Obrázek 11 - Řez tlakového reaktoru Nuscale. [28]	27
Obrázek 12 - Schéma reaktoru chlazeného tekutým olovem. [29]	28
Obrázek 13 - Porovnání reaktoru SMART s konvenčním typem reaktoru. [31]	29
Obrázek 14 - Plovoucí elektrárna Akademik Lomonosov. [37]	31
Obrázek 15 - Schéma elektrárny s reaktorem 4S. [38]	31
Obrázek 16 - Schéma využití energie při kogeneraci. [42]	34
Obrázek 17 - Uspořádání jaderného pohonu plavidel. [51]	35

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Typické parametry reaktoru VVER-1000. [11]	17
Tabulka 2 - Typické parametry reaktoru BWR. [11]	18
Tabulka 3 - Rozdělení reaktorů podle výkonů. [23].....	23
Tabulka 4 - Zpoždění a překročení nákladů ve výstavbě reaktorů. [21]	24
Tabulka 5 - Stávající SMR v provozu. [22].....	24
Tabulka 6 - SMR ve vývoji. [21].....	25