

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

ANALÝZA MOŽNOSTI UŽITÍ III. A IV. GENERACE JADERNÝCH
REAKTORŮ V ČR

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LUKÁŠ GAJDZICA

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

ANALÝZA MOŽNOSTI UŽITÍ III. A IV. GENERACE JADERNÝCH REAKTORŮ V ČR

ANALYSIS OF POSSIBILITIES FOR USE OF III. AND IV. GENERATION OF NUCLEAR
REACTORS FOR THE CZECH REPUBLIC

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. LUKÁŠ GAJDZICA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. OLDŘICH MATAL, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lukáš Gajdzica

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

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 diplomové práce:

Analýza možnosti užití III. a IV. generace jaderných reaktorů v ČR

v anglickém jazyce:

Analysis of possibilities for use of III. and IV. generation of nuclear reactors for the Czech Republic

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést analýzu 3. a 4. generace reaktorů (jejich výhody a nevýhody obecně); provést analýzu užití jaderné energie v ČR (výhody a nevýhody, možnosti umístění, rozvoj sítě, potřeba chlazení, výrobní kapacity, výzkum, společenská přijatelnost...); doporučit možné typy reaktorů pro budoucí užití v rozmezí krátkodobém a střednědobém (30 a 60 let) v ČR (výhody a nevýhody v rámci ČR).

Cíle diplomové práce:

1. Charakterizovat současné jaderné elektrárny v ČR
2. Doporučit použití vhodných typů 3. a 4. generace reaktorů v ČR ve střednědobém a dlouhodobém časovém rozmezí.

Seznam odborné literatury:

- a) International Status and Prospects of Nuclear Power, IAEA, 2008
- b) Státní energetická koncepce
- c) Závěry Pačesovy komise
- d) <http://www.gen-4.org/Technology/systems/index.htm>
- e) A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, U.S. DOE, 2002
- f) http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/technology_goals_nerac_subcommittee.pdf
- g) <http://www.world-nuclear.org/info/inf08.html>
- h) <http://www.nrc.gov/reactors/advanced.html>
- i) informační materiály jednotlivých dodavatelů (Westinghouse, AREVA, Mitsubishi atd.)
- j) http://www.snus.sk/nusim2008/Nusim%202008/Titka_NUSIM.pdf
- k) http://www.eia.doe.gov/cneaf/nuclear/page/analysis/nucenviss2.html#_ftn1
- l) <http://www.nea.fr/html/pub/nuclearenergytoday/welcome.html>
- m)
<http://www.ct24.cz/veda-a-technika/28400-v-rezi-se-budou-vyvijet-jaderne-reaktoryctvrte-generace/>

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Oldřich Matal, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 3.11.2009

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá analýzou možností užití jaderných reaktorů III. a IV. generace v České republice. Úvodní část se zabývá základními principy jaderné energetiky a palivovým cyklem, který s problematikou úzce souvisí a jeho vývoj a aplikace v praxi bude mít významný vliv jak na výběr budoucích typů jaderných reaktorů IV. generace, tak na otázku vypořádání se s použitým jaderným palivem. V dalších částech se diplomová práce zabývá současným stavem jaderné energetiky v České republice, porovnává konkrétní vybrané typy jaderných elektráren III. generace a obecně popisuje jaderné reaktory a elektrárny IV. generace. Závěrečná část práce se zaměřuje na otázky týkající se možnosti výstavby nových bloků jaderných elektráren v České republice a uvádí konkrétní doporučení z pohledu autora.

Abstract

The thesis deals with the analysis of possibilities for use of III. and IV. generation of nuclear reactors for the Czech Republic. Introduction deals with basic principles of nuclear energetics and fuel cycle which is closely associated with the issue and its development and application in practice will have a significant effect both for choice of future types of nuclear reactors of IV. generation and the matter of settlement with spent nuclear fuel. In other parts the thesis deals with the present state of nuclear energetics in the Czech Republic, compares concrete chosen types of nuclear power plants of III. generation and generally describes nuclear reactors and power plants of IV. generation. Final part of the work is focused on questions concerning the possibility of construction of new blocks of nuclear power plants in the Czech Republic and presents concrete recommendation from author's point of view.

Klíčová slova

Jaderné elektrárny, jaderné reaktory, jaderné palivo, palivový cyklus, instalovaný výkon, průmysl, elektrická energie, generace

Key words

Nuclear power plants, nuclear reactors, nuclear fuel, fuel cycle, installed power, industry, electrical energy, generation

Bibliografická citace závěrečné práce

GAJDZICA, L. *Analýza možnosti užití III. a IV. generace jaderných reaktorů v ČR*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 55 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Oldřich Matal, CSc.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto závěrečnou práci vypracoval samostatně bez cizí pomoci. Vycházel jsem z vlastních znalostí, odborných konzultací a literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 28. května 2010

.....
podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce prof. Ing. Oldřichu Matalovi CSc. za vstřícnost a ochotu při konzultacích nezbytných pro vznik této práce.

OBSAH

1.	Úvod	3
2.	Základní principy jaderné energetiky	4
2.1.	Zdroje jaderných paliv.....	4
2.2.	Palivový cyklus	5
2.2.1.	Otevřený palivový cyklus lehkovodních reaktorů.....	6
2.2.2.	Uzavřený palivový cyklus lehkovodních reaktorů	6
2.2.3.	Uzavřený palivový cyklus rychlých reaktorů.....	7
2.2.4.	Kombinovaný palivový cyklus lehkovodních a rychlých reaktorů	7
2.2.5.	Thorium - uranový palivový cyklus	7
3.	Současný stav jaderné energetiky v ČR.....	9
3.1.	Elektrárna Dukovany (EDU).....	10
3.2.	Elektrárna Temelín (ETE)	11
4.	Energetická koncepce ČR.....	12
5.	Vývoj v oblasti jaderné energetiky	14
5.1.	Generace I.....	14
5.2.	Generace II	15
6.	Generace III a III+	17
6.1.	Přehled vybraných typů jaderných reaktorů generace III a III+	18
6.1.1.	(US- / EU-) ABWR.....	18
6.1.2.	(US/EU-) APWR (+).....	19
6.1.3.	AP600/AP1000	19
6.1.4.	EPR.....	21
6.1.5.	MIR-1200 (AES-2006).....	22
6.2.	Technické parametry vybraných typů jaderných elektráren s reaktory generace III a III+ ...	23
6.3.	Porovnání nákladů na výstavbu jaderných elektráren s reaktory generace III (III+).....	28
7.	Generace IV	30
7.1.	Přehled reaktorů generace IV	31

7.1.1.	GFR (Gas - Cooled Fast Reactor).....	31
7.1.2.	LFR (Lead - Cooled Fast Reactor)	32
7.1.3.	SFR (Sodium - Cooled Fast Reactor).....	34
7.1.4.	MSR (Molten Salt Reactor).....	35
7.1.5.	VHTR (Very High Temperature Reactor).....	37
7.1.6.	SCWR (Supercritical Water - Cooled Reactor).....	38
8.	Možnosti českého průmyslu při výstavbě nových jaderných bloků v ČR.....	40
8.1.	Primární okruh.....	40
8.2.	Sekundární okruh a ostatní zařízení jaderných elektráren.....	41
8.3.	Lidské zdroje	43
9.	Analýza možností výstavby nových jaderných bloků v ČR - pohled autora.....	44
9.1.	Instalovaný výkon.....	44
9.2.	Volba lokality.....	46
9.3.	Přenosová soustavu ČR.....	47
9.4.	Veřejné mínění a společenská přijatelnost.....	48
10.	Závěr	50
11.	Seznam použitých zdrojů.....	51
12.	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	54
13.	Seznam použitých veličin	55

1. Úvod

Jaderná energetika zaujímá v dnešní době nezanedbatelnou úlohu při výrobě elektrické energie jak v České republice, tak celosvětově. Podle dostupných dokumentů IAEA [1] je elektrická energie vyráběna v 439 jaderných reaktorech v 30 zemích světa a tvoří tak asi 14% celkové výroby elektrické energie ve světě.

Vzhledem ke stále rostoucím nárokům na spotřebu elektrické energie v České republice i ve světě vyvstává otázka jak tuto spotřebu pokrýt. Podle [14] do roku 2020 stoupne celosvětová spotřeba ze současných 300 GJ/rok na 450 GJ/rok. Souvisí to zejména s rychle se zvyšujícími nároky na energie rozvíjejících se zemí. S výrobou elektrické energie souvisí také potřeba ochrany životního prostředí související s redukcí emisí CO₂ a dalších skleníkových plynů, mezi jejichž největší producenty patří právě stacionární energetické zdroje. Otázka budoucnosti spalování fosilních paliv souvisí také s jejich dostupností. Vzhledem k úbytku těchto fosilních zdrojů je třeba hledat jiné alternativy využitelné nejen v energetice, ale i v dalších oblastech průmyslu a dopravy. Jaderná energetika tak, jak je dnes využívána nejčastěji, není považována za obnovitelný zdroj energie. S rozvojem technologií přepracování a jejich rozšířením v průmyslové praxi, využíváním množivých reaktorů, které samy vytvářejí více paliva než spotřebovávají, může být jaderná energetika relativně čistým nástrojem pro pokrytí základní spotřeby elektrické energie. Zároveň může sloužit i pro výrobu vodíku jako alternativního paliva budoucnosti, nebo pro další vysoce energeticky náročné technologie jako je například odsolování mořské vody. V neposlední řadě je možné zapojit jaderné elektrárny do systému centrálního zásobování teplem velkých měst. Jaderná energetika může taktéž uspořít značné množství primárních energetických zdrojů. S jejím využíváním však souvisí problém nakládání s použitým jaderným palivem. Budoucnost jaderné energetiky je úzce spjata se zajištěním bezpečnosti a to nejen při provozu, ale v celém palivovém cyklu od výroby jaderného paliva po jeho případné definitivní uložení v hlubinných úložištích. V České republice v současné době probíhá hledání vhodné lokality pro stavbu hlubinného úložiště vysoce aktivních odpadů nejen z jaderné energetiky, ale i dalších průmyslových odvětví a lékařství. Zároveň probíhá diskuze o dostavbě jaderné elektrárny Temelín a obnově a rozšíření jaderné elektrárny Dukovany. Jedním z cílů této práce je poskytnout přehled o konkrétních typech jaderných elektráren III., III+. a IV. generace, které připadají v úvahu pro výběr budoucích jaderných elektráren použitelných v podmínkách České republiky.

2. Základní principy jaderné energetiky

Výroba elektrické energie štěpením jader v jaderných elektrárnách se v principu neliší od výroby v klasické parní elektrárně využívající uhlí či jiné fosilní palivo. Nejpodstatnější rozdíl je v získávání energie z paliva. V případě tepelných elektráren je palivo spalováno v kotli a získané teplo je využito k výrobě páry v teplosměnných plochách kotle.

V jaderné elektrárně se jedná o štěpení jaderného paliva v reaktoru. Teplo vyvinuté štěpením je odvedeno chladivem. Pro získání 100 GJ energie je zapotřebí spálení přibližně 3 tun uhlíku, kdežto izotopu uranu ^{235}U je zapotřebí rozštěpit přibližně 1 gram. Štěpení izotopů ^{235}U , ^{239}Pu a ^{233}U je možné tepelným (pomalým) neutronem o energii 0,025 eV. Štěpení izotopů ^{238}U a ^{232}Th je možné rychlým neutronem o energii řádově 10^5 eV. Energetický výtěžek ze štěpení jednoho jádra izotopu ^{235}U je přibližně 204 ± 7 MeV [16] ($3,204 \times 10^{-17}$ J), přičemž využitelná energie jednoho štěpení ^{235}U (odvedená chladivem) činí asi 192 MeV [16].

Opačným přístupem k získávání energie ze štěpení jader je jejich fúze. Hlavní vývoj v této oblasti se soustřeďuje v projektu ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Principem jaderné fúze je slučování jader izotopů vodíku (deuterium - deuterium, tritium - deuterium) za vzniku hélia (záření α) a neutronu. Energie uvolněná touto reakcí činí 17,6 MeV [10]. Pro překonání odpuzivých sil jader při jejich slučování je však zapotřebí extrémně vysokých teplot (v řádu 10^9 °C) v prostředí plazmy tvořené elektrony a jádry paliva. K udržení této plazmy je zapotřebí velmi silné elektromagnetické pole vytvářené soustavou elektromagnetů toroidního tvaru. Okolo 80% vzniklé energie je odvedeno z reaktoru neutrony, které předávají tuto energii v konstrukčních částech reaktoru, kde může být využita klasickým způsobem (tedy ohřevem vody) pro výrobu páry. Výhodou tohoto řešení je nulová produkce skleníkových plynů, stejně jako minimální spotřeba deuteria. Komerční využití jaderné fúze je však značně závislé na vývoji materiálů, které budou schopny odolávat vysokým teplotám, zvládnutí problémů se stabilním udržením plazmy a ekonomii provozu.

2.1. Zdroje jaderných paliv

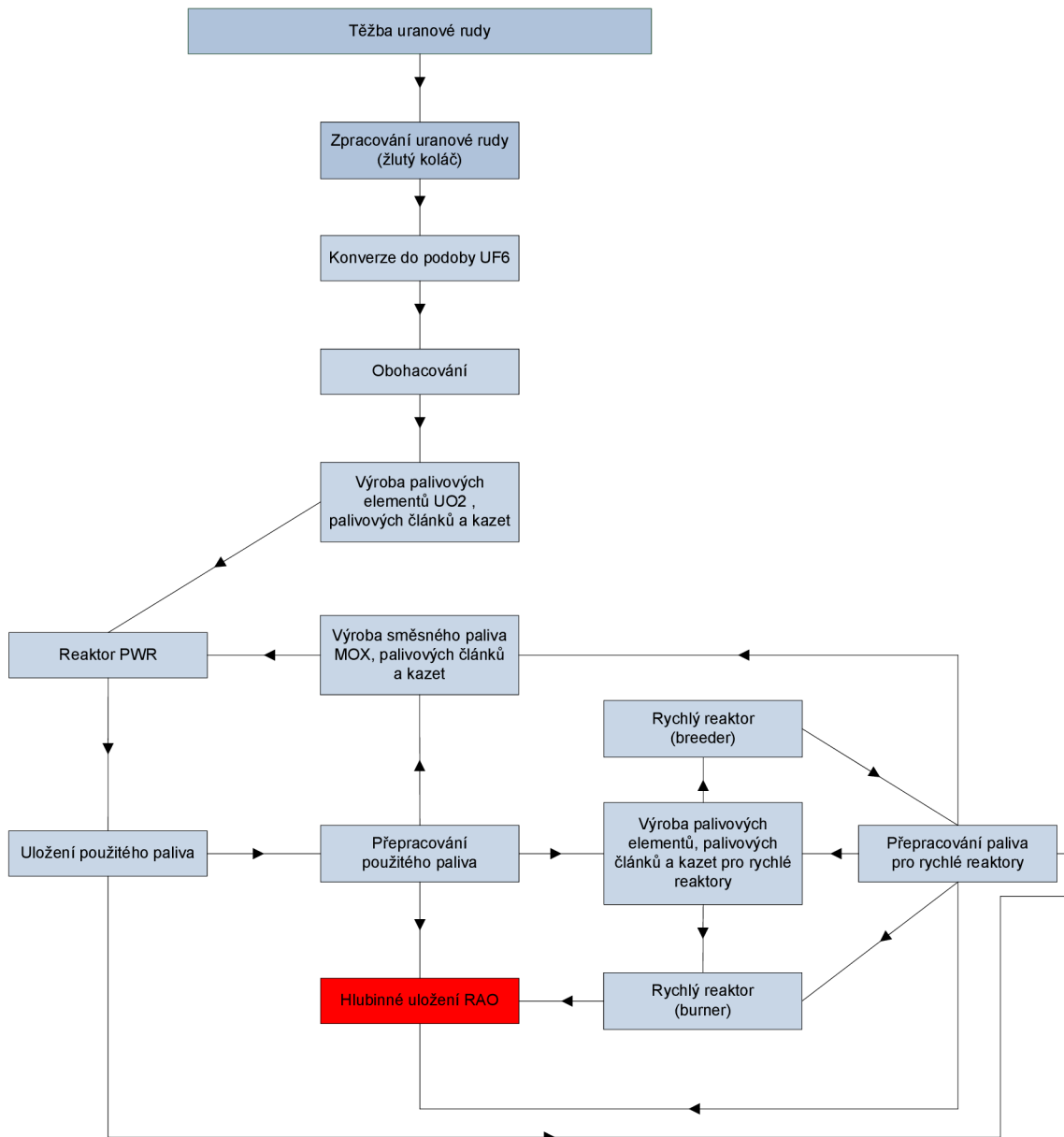
Jaderná paliva můžeme z principu rozdělit na přírodní a umělá. Mezi přírodní paliva patří uran ^{235}U , ^{238}U a thorium ^{232}Th . Uran i thorium jsou kovy, které se v přírodě nejčastěji vyskytují v rudách. Jako palivo dnešních LWR (PWR) reaktorů je používáno většinou oxidické palivo UO_2 . Palivové elementy ve formě UO_2 s přírodním obsahem izotopů uranu ^{235}U a ^{238}U lze bez dodatečného obohacování štěpit v těžkovodních reaktorech, například typu CANDU (PHWR). Pro použití v nejběžnějších lehkovodních reaktorech, je však nutné palivové elementy UO_2 obohatit na cca 4% ^{235}U . Jednotlivé izotopy uranu (nejvýznamnější) se v přírodně typicky vyskytují v přibližně následujícím složení: 99,3% ^{238}U , 0,7% ^{235}U [25]. Mezi paliva získávána uměle lze zařadit izotop plutonia ^{239}Pu z demontovaných jaderných hlavic či přepracovaného, použitého jaderného paliva (viz. kapitola 2.2) a izotop uranu ^{233}U .

V České republice v současné době probíhá těžba uranové rudy v oblasti Dolní Rožínky. Současný těžební prostor je tvořen plochou o velikosti 8,76 km² [26]. Konečným produktem produktem těžby a zpracování v této oblasti je diuranát amonný

$(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ - žlutý koláč) prodávány zpracovatelským závodům mimo území ČR. V současné době se zásoby v této lokalitě odhadují na 650 tun uranu [26].

2.2. Palivový cyklus

Palivovým cyklem se rozumí veškeré nakládání s palivem od jeho vytěžení až po konečné uložení v úložišti. Palivový cyklus lze principiálně rozdělit na otevřený, nebo uzavřený. Palivový cyklus je schématicky zobrazen na obrázku 1.



Obr. 1 Zjednodušené zobrazení palivového cyklu s kombinací termální a rychlých reaktorů

2.2.1. Otevřený palivový cyklus lehkvodních reaktorů

Otevřený palivový cyklus představuje veškeré operace s palivem od těžby po konečné uložení v následujících krocích:

- těžba uranové rudy
- zpracování do podoby žlutého koláče
- konverze do podoby UF_6
- obohacování difúzní, nebo odstředivé
- výroba palivových elementů ve formě UO_2 , výroba palivových článků a kazet
- zavedení paliva do reaktoru
- uložení použitého paliva

V České republice v současné době probíhá pouze těžba a zpracování uranové rudy do formy žlutého koláče. O vybudování hlubinného úložiště na území České republiky není v současnosti rozhodnuto.

2.2.2. Uzavřený palivový cyklus lehkvodních reaktorů

Uzavřený palivový cyklus na rozdíl od cyklu otevřeného zahrnuje přepracování paliva a jeho opětovné použití v reaktorech. Podle [1] je dnes přepracovááno a recyklováno asi 15% použitého paliva. Uzavření palivové cyklu je rovněž jednou z možností jak snížit radioaktivitu zbytků, které je nutno uložit do hlubinných úložišť a podle [14] lze tímto způsobem snížit spotřebu přírodního uranu asi o 30%. Zároveň lze (v závislosti na míře využití plutonia a minoritních aktinoidů v rychlých reaktorech) snížit množství a aktivitu odpadů určených pro uložení v hlubinných úložištích. Uzavřený palivový cyklus lehkvodních reaktorů může být popsán následovně:

- těžba uranové rudy
- zpracování do podoby žlutého koláče
- konverze do podoby UF_6
- obohacování difúzní, nebo odstředivé
- výroba palivových elementů ve formě UO_2 , výroba palivových článků a kazet
- zavedení paliva do reaktoru
- přepracování - separace uranu a plutonia z použitého paliva pomocí vhodných metod
- zpracování separovaných prvků ve formě směšného paliva MOX. Palivo MOX (mixed oxide) obsahuje asi 5% izotopu ^{239}Pu ve formě PuO_2 a 95% ochuzeného uranu ve formě UO_2 . [28]
- opětovné zavedení paliva do reaktoru
- trvalé uložení nezpracovaných zbytků (minoritních aktinoidů a dalších produktů štěpení) a odpadů zejména z vodných metod přepracování

Nevýhodou přepracování použitého jaderného paliva je potenciální zneužitelnost a to především v souvislosti se separací izotopu plutonia ^{239}Pu . Další nevýhodou přepracování zejména vodnými metodami (PUREX) je nutnost zajistit v průběhu celého procesu

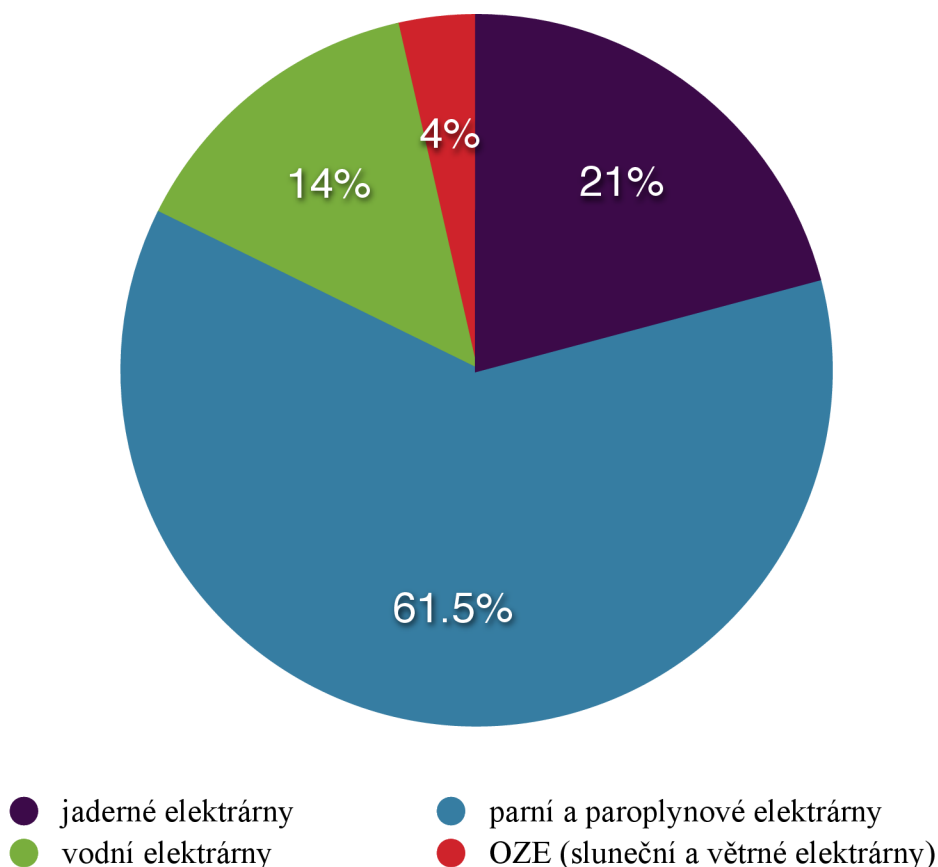
Palivo na bázi thoria může být používáno jak v otevřeném, tak v uzavřeném palivovém cyklu. Otevřený thorium - uranový cyklus je založen na konverzi izotopu thoria ^{232}Th na izotop uranu ^{233}U a jeho následného štěpení například v lehkovodních reaktorech typu LWBR (Light Water Breeder Reactor) bez přepracování izotopu uranu ^{233}U a jeho dalšího využití. Nakládání s použitým jaderným palivem je tedy obdobné jako v případě otevřeného palivového cyklu s palivem na bázi obohaceného izotopu uranu ^{235}U . Palivové kazeta pro použití v otevřeném thorium - uranovém cyklu může být tvořena centrální částí se štěpitelným materiálem (obohacený uran ^{235}U , nebo plutoniem ^{239}Pu) obklopenou částí plodivou (množivou) částí tvořenou izotopem ^{232}Th . Další alternativou může být využití izotopů thoria a plutonia (zbraňového, nebo z přepracování) ve formě paliva MOX.

Uzavřený thorium - uranový palivový cyklus je založen na přepracování izotopu uranu ^{233}U a thoria ^{232}Th z použitého jaderného paliva a jeho dalšího zapracování například ve formě $(^{232}\text{Th}-^{233}\text{U})\text{O}_2$, nebo ThO_2 . Takto přepracované palivo je možné opět zavést do jaderných reaktorů termálních, nebo rychlých. Thorium lze rovněž využít v systémech ADS (Accelerator - Driven System). [33]

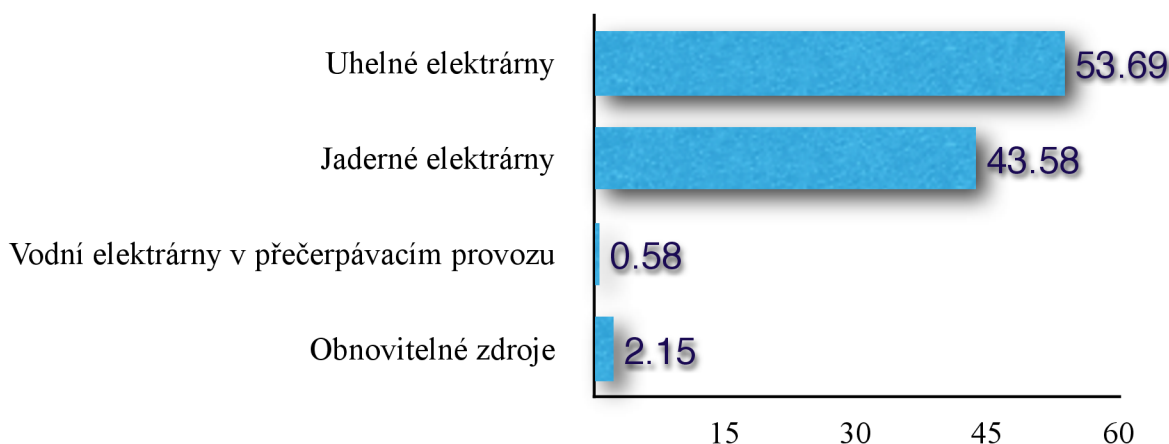
3. Současný stav jaderné energetiky v ČR

V současné době jsou v provozu v České republice dvě jaderné elektrárny s lehkovodním typem reaktoru VVER (lehkou vodou chlazený a moderovaný energetický reaktor). Obě elektrárny provozuje společnost ČEZ a.s.

K 31.12.2009 činil instalovaný výkon jaderných elektráren v ČR 3830 MWe [9]. Jedná se asi o 31% celkového instalovaného výkonu společnosti ČEZ a.s. a asi 21% v rámci celkového instalovaného výkonu v České republice. Podíl jednotlivých zdrojů pro výrobu elektrické energie v České republice je za rok 2008 dle [22] je zobrazen na obrázku 3. Instalovaný výkon jednotlivých energetických zdrojů je zobrazen na obrázku 3. Z uvedených grafů jasně vyplývá, že jaderné elektrárny hrají velmi významnou roli z hlediska celkové produkce elektrické energie v České republice a to zejména pro pokrytí její základní spotřeby.



Obr. 2 Instalovaný výkon jednotlivých energetických zdrojů v ČR za rok 2009 [9]



Obr. 3 Podíl zdrojů (v %) na výrobě elektrické energie v ČEZ a.s. [20]

3.1. Elektrárna Dukovany (EDU)

Jaderná elektrárna Dukovany byla postupně uváděna do provozu v 80. letech 20. století (první blok byl spuštěn v roce 1985). Elektrárna je tvořena čtyřmi bloky s reaktory ruského typu VVER 440/213. Palivem je obohacený (asi 4%) uran ^{235}U , který spolu s izotopem ^{238}U tvoří palivové elementy ve formě UO_2 . Teplo vzniklé v palivu štěpením je odváděno chladicí vodou primárního okruhu do šesti parogenerátorů v každém bloku, kde je předáváno do sekundárního okruhu. Parogenerátory horizontální konstrukce tvoří rozhraní mezi primárním a sekundárním okruhem. Každý reaktor má tepelný výkon 1375 MW a elektrický výkon jednoho bloku EDU (před modernizací) činil 440 MW (2 turbosoustrojí). Modernizací byl výkon bloku zvýšen na 460 MW a u jednoho z bloků až na 500 MW. Jedním z hlavních bezpečnostních prvků zamezujícím v případě havárie kontaminaci okolního životního prostředí je soustava hermeticky těsných kobek, ve kterých je uzavřen primární okruh a tzv. barbotážní věž jako pasivní systém pro snižování tlaku v hermetických kobkách v případě úniku chladiva z primárního okruhu. Z dnešního pohledu na jadernou bezpečnost už nelze tuto konstrukci považovat za přijatelnou pro nově budovaná komerční jaderná zařízení. Přesto je bezpečnost EDU srovnatelná s 20% nejbezpečnějšími elektrárnami na světě a podle [29] se v některých parametrech řadí dokonce k nejbezpečnějším. Roční výroba elektřiny v EDU představuje asi 20% spotřeby elektrické energie v České republice a činí přibližně 13,5 TWh.

Plánována životnost elektrárny je 40 let a v závislosti na technických, ekonomických a bezpečnostních okolnostech je možné její prodloužení na 60 let.

Součástí areálu EDU je také suchý mezisklad použitého paliva, které je ukládáno v obalových souborech CASTOR 440/80. Kapacita meziskladu je 60 obalových souborů. Součástí areálu EDU je také úložiště středně a nízko aktivního odpadu s celkovou kapacitou 55000 m³ [27]. Provoz tohoto úložiště, monitoring a způsob ukládání odpadů zajišťuje SÚRAO na základě povolení vydaných SÚJB.

Zdrojem technologické vody jaderné elektrárny Dukovany je vodní nádrž Dalešice o objemu $127 \times 10^6 \text{ m}^3$, jejíž součástí je přečerpávací vodní elektrárna o instalovaném výkonu 480 MWe

3.2. Elektrárna Temelín (ETE)

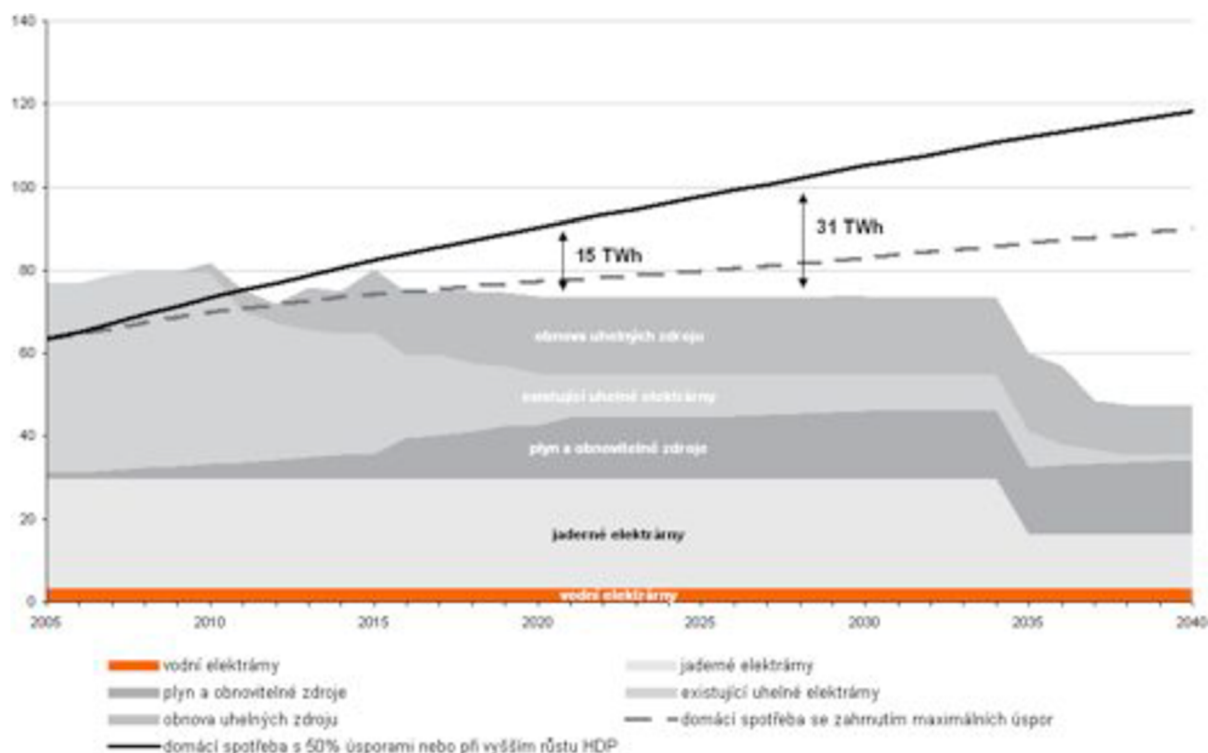
Jaderná elektrárna Temelín je tvořena dvěma bloky s lehkovodními reaktory VVER 1000/320. Jedná se o největší energetický zdroj v České republice s instalovaným výkonem 2000 MWe. V roce 2009 dodala elektrárna do sítě 13,253 TWh elektrické energie. První blok ETE byl uveden do provozu v roce 2000 a druhý blok v roce 2002. Každý blok obsahuje 4 parogenerátory horizontální konstrukce, jejichž trubkové svazky spolu s primárními kolektory stejně jako v případě EDU tvoří rozhraní mezi primárním a sekundárním okruhem. Výrobu elektrické energie zajišťuje v každém bloku jedno turbosoustrojí o výkonu 1000 MWe. Vnější obálku primárního okruhu tvoří kontejnment. Jedná se o hermeticky těsnou obálku z předepjatého betonu, schopnou odolávat vnějším vlivům, jako je náraz malého letadla, seismické aktivity v dané oblasti, povětrnostním vlivům, nebo tlakové vlně od výbuchu. Zároveň má zabránit úniku radioaktivních látek v případě havárie a zamezit tak kontaminaci životního prostředí. Kontejnment obsahuje veškeré komponenty primárního okruhu, včetně bazénu pro skladování použitého paliva. Po obvodu kontejnmentu jsou umístěná sprchovací zařízení pro snižování tlaku v případě úniku chladiva z primárního okruhu.

Stavba ETE byly výrazně ovlivněna změnou politického uspořádání země po roce 1989. Původní sovětský projekt byl upraven a posléze dokončen americkou firmou Westinghouse v úzké spolupráci z tuzemskými výrobci. Firma Westinghouse byla rovněž dodavatelem jaderného paliva. Od roku 2010 bude dodavatelem paliva stejně jako v EDU ruská společnost TVEL. Palivem je obohacený (4,25%) uran ^{235}U , který spolu s izotopem ^{238}U tvoří palivové elementy ve formě UO_2 . V současné době probíhají přípravné práce k zahájení dostavby 3. a 4. bloku. Možnosti této dostavby budou zmíněny v dalších částech této práce.

Zdrojem technologické vody pro jadernou elektrárnu Temelín je vodní nádrž Hněvkovice o objemu $22 \times 10^6 \text{ m}^3$, jejíž součástí je malá vodní elektrárna o instalovaném výkonu $2 \times 4,8 \text{ MWe}$.

4. Energetická koncepce ČR

Energetická koncepce České republiky [3] klade důraz na vyvážený mix zdrojů s přednostním využitím všech dostupných tuzemských zdrojů. Cílem je udržení přebytkové výrobní a výkonové bilance a z toho vyplývající zachování energetické stability, bezpečnosti a odolnosti vůči nestabilním dodávkám dovážených zdrojů. Trend růstu spotřeby elektrické energie v závislosti na čase spolu s vyznačením jejího pokrytí zobrazuje graf na obrázku 5. Pokles výroby elektrické energie znázorněný na obrázku 4 v jaderných elektrárnách je dán odstavením JE Dukovany a nezahrnuje rovněž ani výstavbu nových bloků. Z uvedeného grafu rovněž vyplývá, že za stávající situace dojde okolo roku 2015 a dále k výraznému rozdílu mezi spotřebou a výrobou elektrické energie v České republice. Stávající uhelné a jaderné elektrárny zřejmě nebude možné v plné míře nahradit žádným z dostupných obnovitelných zdrojů (viz. úvahy k OZE níže) využitelných v podmínkách České republiky. Z toho důvodu bude nutné zajistit vyvážený podíl jednotlivých zdrojů s udržení dovozní závislosti na přijatelné úrovni.



Obr. 4 Odhad růstu spotřeby elektrické energie v TWh v závislosti na čase v ČR [22]

Energetická koncepce České republiky [3] doporučuje diverzifikovat výrobu z jednotlivých typů zdrojů podle instalovaného výkonu tak, jak je uvedeno v tabulce 1.

Instalovaný výkon	Podíl na výrobě
nad 100 MW	60%
10 až 100 MW	30%
do 10 MW	10%

Tab. 1 Doporučené rozložení zdrojů [3]

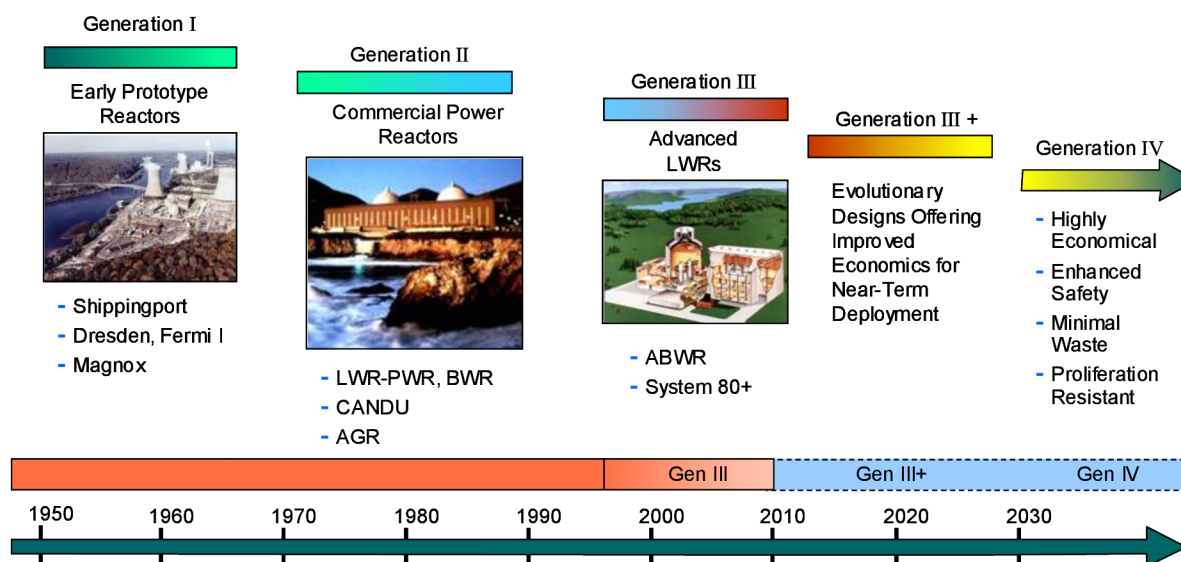
Státní energetická koncepce [3] rovněž klade důraz na zvýšení výroby z obnovitelných zdrojů energie (až 23% do roku 2050), zvyšování energetické účinnosti ekonomiky a úspory energie. Výhodou obnovitelných zdrojů je jejich místní dostupnost a odpadá tedy závislost na dovozu surovin. Dostupnost některých obnovitelných zdrojů elektrické energie (vodní zdroje, energie větru a slunce) je však značně omezena a je dána geografickou polohou země a aktuálním stavem klimatu. Nadměrné využívání obnovitelných zdrojů elektrické energie sebou nesou značná rizika v podobě nestálosti a nahodilosti dodávek, které je nutno kompenzovat klasickými zdroji. Toto se týká zejména energie získávané z větru a slunce. Průměrná doba slunečního svitu v ČR se pohybuje okolo 1500 hodin. Disponibilita sluneční energie je tedy v podmínkách ČR přibližně a v ideálním případě 17%, kdežto u jaderných elektráren III(+). generace se uvádí a očekává dostupnost okolo 92% při uvažované životnosti až 60 let [30]. Větrné elektrárny by měly rovněž být budovány pouze ve vhodných lokalitách s ohledem na místní povětrnostní podmínky, aby při jejich provozu docházelo k co nejmenším výkyvům v dodávkách elektrické energie do sítě. V případě masivní výroby elektrické energie z účelově pěstované biomasy na zemědělské půdě je nutné zvážit všechny důsledky a možné vlivy na zemědělství a výrobu potravin, vzhledem ke všeobecnému růstu populace. Nezanedbatelný negativní vliv (s přihlédnutím k aktuálnímu stavu v dané lokalitě) na biodiverzitu životního prostředí má rovněž účelové pěstování monokultur. Výroba energie z obnovitelných zdrojů by měla být podporována zejména tam, kde je to ekonomicky, ekologicky a geograficky výhodné, ale neměla by být účelově protěžována, důsledkem čehož je neadekvátní růst cen, neefektivita a prostor pro spekulace a korupci.

V oblasti jaderné energetiky státní energetická koncepce [3] předpokládá prodloužení životnosti stávajících bloků na 50 až 60 let (v závislosti na technických, ekonomických a bezpečnostních okolnostech) a zároveň podporuje výstavbu nových bloků a jejich rychlé uvedení do provozu s využitím moderních technologií s vysokou mírou pasivní bezpečnosti v souladu s mezinárodními standardy. Možné typy jaderných reaktorů III., III+. a IV. generace využitelné v České republice jsou dále popsány v této práci.

5. Vývoj v oblasti jaderné energetiky

První jaderný reaktor spolu se svým týmem sestrojil a spustil v roce 1942 italský fyzik Enrico Fermi v Chicagu jako součást projektu Manhattan. Reaktor byl sestaven z uranových a grafitových bloků a obsahoval kritické množství štěpitelného materiálu. Od této doby se konstrukce jaderných reaktorů neustále vyvíjí.

Dnes nejčastěji provozovaná (druhá) generace energetických jaderných reaktorů byla vyvinuta na základě zkušeností z vývoje a provozu reaktorů určených pro pohon zejména válečných lodí a ponorek. Většina těchto energetických reaktorů za dobu svého provozu prokázala schopnost bezpečného a stabilního provozu a na jejich základě probíhá vývoj reaktorů generace III. a IV. S rozvojem jaderné energetiky souvisí i nezanedbatelný nárůst požadavků na bezpečnost, odolnost i hospodárnost provozu.



Obr. 5 Vývoj energetických jaderných reaktorů [1]

5.1. Generace I

Jedná se o nejstarší generaci jaderných reaktorů, z nichž už kromě Velké Británie nejsou žádné v provozu. Tyto reaktory byly vyvíjeny a uváděny do provozu v padesátých letech 20. století a jedná se zejména o reaktory typu MAGNOX. Jedná se převážně o reaktory chlazené plynem CO_2 a moderované grafitem (GCR a AGR). Palivem byl přírodní kovový uran. K reaktorům chlazeným plynem a reaktorům těžkovodním, kdy palivem byl přírodní uran se uchýlovaly zejména státy bez vlastních možností obohacování jaderného paliva. Tyto reaktory byly rovněž využívány k produkci plutonia pro armádní potřeby (v době jaderného zbrojení byl toto primární účel těchto reaktorů).

Mezi jaderné elektrárny s reaktorem I. generace patřila rovněž elektrárna A1 v Jaslovských Bohunicích na Slovensku. Byla to 1. československá jaderná elektrárna. Jednalo se o elektrárnu s těžkovodním, grafitovým, plynem (CO_2) chlazeným jaderným reaktorem (KS-150). Byl to tedy zcela nový typ jaderné elektrárny vybudovaný s minimální zahraniční pomocí (projekt byl vypracován ve spolupráci s bývalým SSSR, které bylo zároveň

dodavatelem jaderného paliva). Provoz jaderné elektrárny A1 byl v důsledku dvou havárií zapříčiněných především lidským faktorem ukončen v roce 1979.

5.2. Generace II

Jaderné elektrárny s reaktory II. generace byly uváděny do provozu v průběhu 70. a 80. let 20. století. Jedná se dnes o nejrozšířenější typy reaktorů a jejich základní rozdělení je uvedeno v tabulce 2.

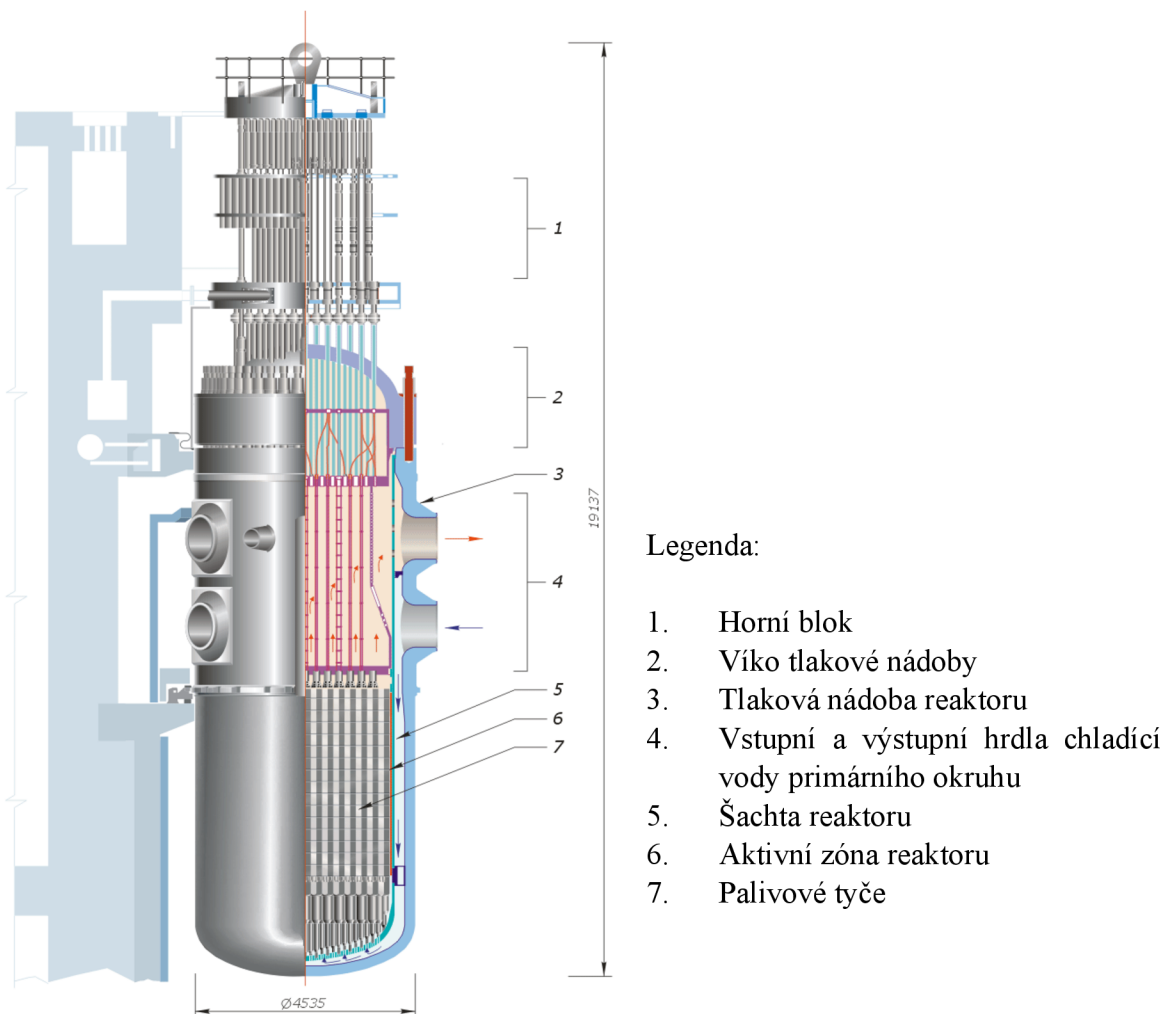
Základní rozdělení jaderných energetických reaktorů generace II			
označení skupiny	chladiivo / moderátor	označení typu	výměna paliva
tlakovodní reaktory	lehká voda (H ₂ O) / lehká voda (H ₂ O)	LWR; PWR; VVER	kampaňovitá (kompaktní aktivní zóna)
	těžká voda (D ₂ O) / těžká voda (D ₂ O)	CANDU; PHWR	kontinuální (aktivní zóna je tvořena tlakovými kanály)
varné	lehká voda (H ₂ O) / lehká voda (H ₂ O)	BWR	kampaňovitá (kompaktní aktivní zóna)
	lehká voda (H ₂ O) / grafit	RBMK; LWGR	kontinuální (aktivní zóna je tvořena tlakovými kanály)
plynem chlazené reaktory	CO ₂ / grafit	AGR	kontinuální (aktivní zóna je tvořena kanály)

Tab. 2 Základní rozdělení jaderných energetických reaktorů generace II

Prakticky majoritní postavení si mezi jadernými energetickými reaktory generace II vybudovaly reaktory typu LWR (PWR; VVER). Reaktory tohoto typu se vyznačují záporným koeficientem reaktivity, což značně zvyšuje bezpečnost celé konstrukce oproti varným reaktorům chlazených lehkou vodou a moderovaných grafitem (RBMK). U reaktoru typu RBMK nevede případná ztráta chladiiva zároveň ke ztrátě schopnosti moderace a tím i k zastavení štěpení jaderného paliva pomalými neutrony a hrozí nekontrolovatelný rozběh štěpné řetězové reakce. Tato skutečnost spolu s neodpovědnou manipulací a provozem (tedy selháním lidského faktoru) značně přispěla k nechvalně proslulé havárii reaktoru v Černobylu v roce 1986. V současné době je v provozu 11 reaktorů typu RBMK převážně na území bývalého Sovětského svazu.

Jaderné elektrárny s reaktory II. generace se z hlediska jaderné bezpečnosti vyznačují využíváním aktivních bezpečnostních prvků, deterministickým a pravděpodobnostním

přístupem k hodnocení jaderné bezpečnosti. Do této generace jedených elektráren rovněž patří obě české jaderné elektrárny Dukovany a Temelín.



Obr. 6 Řez reaktorem typu VVER-1000 [21]

6. Generace III a III+

III. (III+) generace reaktorů je dalším vývojovým typem jaderných, energetických reaktorů, které bývají obecně označovány jako „pokročilé jaderné reaktory“. První jaderná elektrárna s tímto typem reaktoru byla uvedena do provozu v roce 1996 v Japonsku. Dnes jsou tyto jaderné reaktory respektive jaderné elektrárny komerčně nabízeny v různých variantách zahrnující koncepce LWR (PWR), CANDU i BWR. Všechny konstrukce jaderných reaktorů generace III (III+) vycházejí z prověřených a osvědčených konstrukcí generace II. Reaktory III+ generace by měly být brány v úvahu v rámci krátkodobého plánování výstavby nových bloků jaderných elektráren.

Některé typické znaky a cíle jaderných elektráren s reaktory generace III (III+) [2], [4]:

- standardizovaná konstrukce jednotlivých typů umožňující jednodušší a rychlejší licencování, schvalování a výstavbu.
- snižování nákladů na výstavbu
- jednodušší, robustnější a odolnější konstrukce
- větší využití paliva (vyhoření) důsledkem čehož je snížení spotřeby paliva a nižší produkce radioaktivních odpadů, zvýšení projektované životnosti až na 60 let
- vyšší dostupnost, zkrácení plánovaných odstávek
- snížení pravděpodobnosti poškození aktivní zóny (CDF) až na řád 10^{-7} reaktor-roků
- minimalizace vlivu na životní prostředí
- zvýšení podílu pasivních bezpečnostních prvků
- snížení, nebo úplná eliminace nutnosti zásahu operátorů v případě události typu LOCA
- zdvojená konstrukce kontejnmentu
- systémy pro záchyt taveniny aktivní zóny
- rozšíření koncepce ochrany do hloubky
- plně digitální systém kontroly, řízení a diagnostiky

V případě tlakové nádoby a parních generátorů došlo u reaktorů III. (III+) generace oproti reaktorům a parním generátorům II. generace ke snížení celkového počtu kovaných prstenců vzájemně svařovaných, ze kterých je tlaková nádoba reaktoru, nebo parního generátoru sestavena. Toto opatření vede k omezení počtu tepelně ovlivněných oblastí při svařování a tím je sníženo riziko poškození tlakové nádoby za provozu v této tepelně ovlivněné oblasti. Zároveň jsou svary jednotlivých částí tlakové nádoby reaktoru umístěny mimo oblast aktivní zóny. Pro zlepšení neutronové bilance a zároveň snížení rizika poškození materiálu tlakové nádoby ozářením (takzvané radiační křehnutí), jsou často tlakové nádoby reaktorů vybaveny radiálním reflektorem. Důsledkem snahy o omezení degradace materiálových vlastností tlakové nádoby je možnost prodloužit intervaly inspekčních kontrol. Nižší počet svarů rovněž snižuje čas potřebný k vykonání těchto kontrol.

Snižování počtu jednotlivých výkovek prstenců tlakových nádob však vede ke zvýšení jejich hmotnosti a velikosti a tím i ke zvýšení nároků na jejich výrobu. Hutnický průmysl musí zajistit požadovanou čistotu a homogenitu polotovarů. Strojírenský průmysl musí být vybaven odpovídajícími kovacími lisami a obráběcími zařízeními pro zpracování těchto rozměrných výkovek.

Přechod od aktivních bezpečnostních prvků (typicky systémy vysokotlakého a nízkotlakého dochlazování) k prvkům pasivním má za cíl odstranění závislosti na zdrojích elektrické či mechanické energie při plnění havarijních a bezpečnostních funkcí. Zároveň je cílem omezení, nebo úplné odstranění lidského faktoru a jeho vlivu na spouštění a činnost havarijních systémů. Pasivní systémy tedy zasahují automaticky, jejich funkce je zajišťována působením přírodních sil - gravitační, přirozená konvekce atd. Nevýhodou aktivních bezpečnostních prvků je fakt, že při ztrátě schopnosti (dojde například k výpadku napájení) chladit například odstavený reaktor nejsou tyto systémy schopny dostatečně odvádět reziduální teplo z reaktoru v případě události typu LOCA, tedy havárii, při níž dojde k poškození potrubí primárního okruhu a dojde k automatickému odstavení reaktoru. Dalším rozpadem fragmentů štěpení však nadále dochází v aktivní zóně k vývinu tepla, které je nutné účinně odvádět tak, aby nedošlo k poškození aktivní zóny reaktoru.

6.1. Přehled vybraných typů jaderných reaktorů generace III a III+

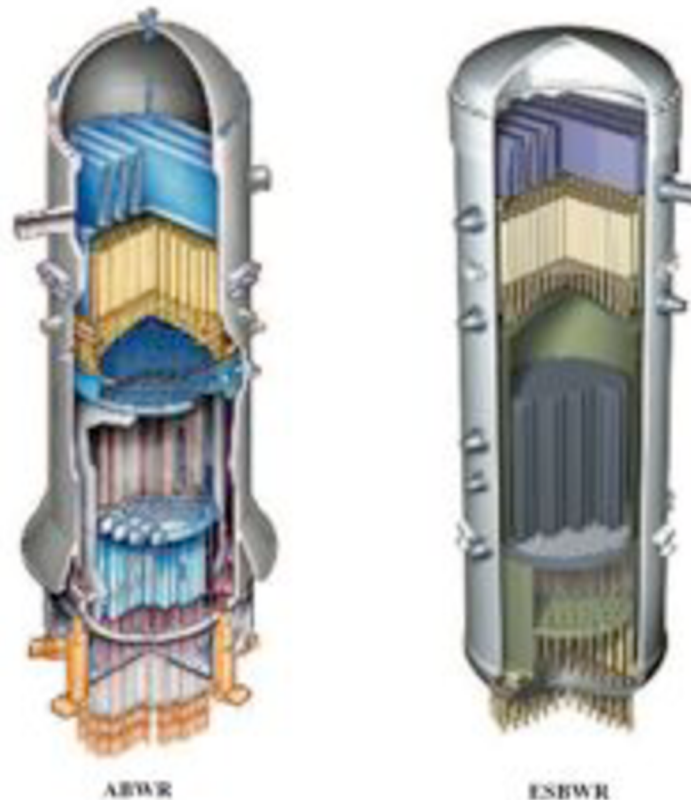
6.1.1. (US- / EU-) ABWR

ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) je varný energetický reaktor vyvinutý společností GE/Hitachi o výkonu 1350 - 1460 MWe. Jedná se o první spuštěný reaktor generace III v roce 1996 v Japonsku. Na obrázku 7 je zobrazen reaktor ABWR spolu s dalším vývojovým typem varných reaktorů ESBWR. Z obrázku je patrná snaha o celkové zjednodušení celé koncepce varných reaktorů včetně odstranění aktivních prvků (zde čerpadel) a jejich nahrazení pasivním systémem chlazení reaktoru na základě přirozené konvekce chladiva v reaktoru.

Jaderná elektrárna s reaktorem ABWR/ESBWR je řešena jako jednookruhová. V reaktoru dochází k varu chladiva a vzniklá pára je od chladiva v kapalném stavu oddělována v separátorech umístěných v horní části tlakové nádoby reaktoru. Sytá pára vystupující z reaktoru je radioaktivní a tomu musí být uzpůsobeno jak její vyvedení na vstupní hrdlo turbosoustrojí, tak celé řešení strojovny. Nevýhodou konstrukce varných reaktorů je velikost samotného reaktoru. Náklady na stavbu varných reaktorů jsou značně vyšší než u jaderných reaktorů typu PWR, ale velikost celkových nákladů na výstavbu jaderných elektráren s varnými reaktory je oproti jaderným elektrárnám s reaktory typu PWR kompenzována nižším počtem jednotlivých komponent, potrubí a absencí samostatných těles (tlakových nádob) parních generátorů. Kontejnment jaderné elektrárny s reaktorem ABWR/ESBWR je integrální součástí budovy reaktoru což vede k zvýšené odolnosti proti seismickým vlivům.

Nevýhodou jaderných elektráren s varnými reaktory pro jejich použití v podmínkách České republiky je prakticky nulová zkušenost s jejich výstavbou a provozem a orientace české jaderné energetiky na reaktory typu PWR (VVER). Přesto se jedná od druhou celosvětově nejrozšířenější koncepci jaderných elektráren

Doba výstavby jaderné elektrárny s reaktorem ABWR od zahájení stavebních prací po uvedení do provozu činí 54 měsíců . [17]



Obr. 7 Řez reaktorem ABWR a ESBWR [17]

6.1.2. (US/EU-) APWR (+)

Jedná se o pokročilý jaderný reaktor III. generace typu PWR vyvíjený firmou Mitsubishi. Jaderná elektrárna je tedy řešena jako dvouokruhová. Primární okruh je tvořen čtyřmi smyčkami (čtyři parní generátory a hlavní cirkulační čerpadla a jeden kompenzátor objemu). V reaktoru je umístěn radiální reflektor pro zlepšení neutronové bilance a snížení toku záření působícího na tlakovou nádobu. Bezpečnostní systém jaderné elektrárny s reaktorem APWR zajišťující havarijní dochlazování aktivní zóny reaktoru, odvod zbytkového tepla a snižování tlaku v kontejnmentu v případě události typu LOCA je tvořen čtyřmi nezávislými smyčkami. Bezpečnostní systémy jsou tvořeny kombinací aktivních a pasivních bezpečnostních prvků.

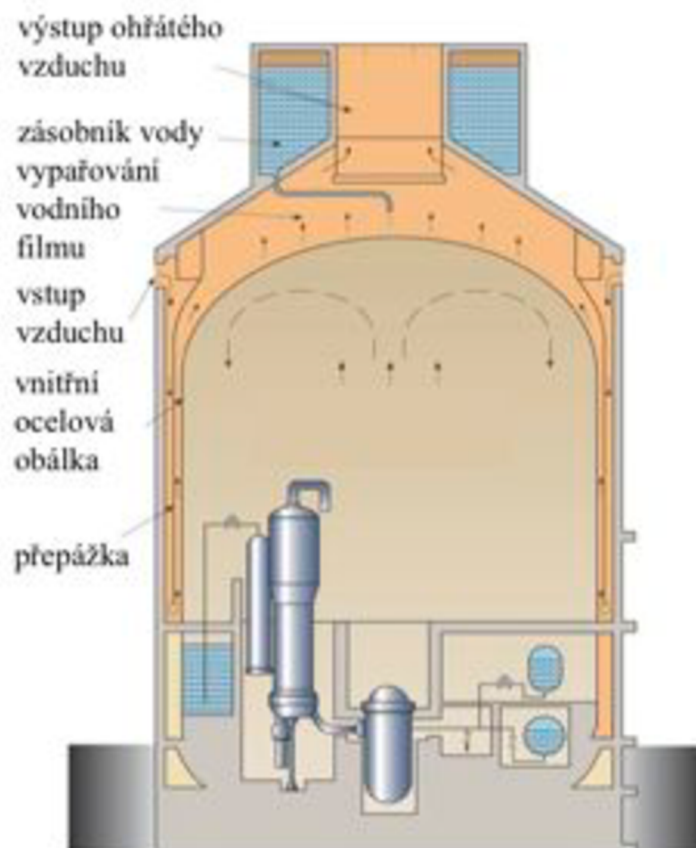
V současné době je plánována výstavba jaderné elektrárny Tsurunga 3 a 4 s tímto typem reaktoru v Japonsku. Předpokládaná doba výstavby od započetí stavebních prací po první vsázku paliva činí 40 měsíců.[6], [32]

6.1.3. AP600/AP1000

AP600 a AP1000 (AP - Advanced Passive) jsou reaktory typu PWR vyvíjené firmou Westinghouse. Jaderná elektrárna je tedy řešena jako dvouokruhová. Primární okruh je tvořen dvěma smyčkami v konfiguraci dvě studené větve a jedna horká větev v každé smyčce. Primární okruh tedy obsahuje čtyři hlavní cirkulační čerpadla, dva parogenerátory a jeden kompenzátor objemu. Pára je generována ve dvou vertikálních parních generátorech. Celá

konstrukce jaderné elektrárny je značně zjednodušena. V případě havárie typu LOCA je bezpečnost jaderné elektrárny s reaktorem AP1000 zajišťována pouze pasivními systémy (hydroakumulátory, plnotlaké nádrže, zásobní nádrže, systémy odtlakování primárního okruhu, chladič pro odvod reziduálního tepla reaktoru).

Kontejnment jaderné elektrárny s reaktorem AP600/AP 1000 (obr. 8) je řešen jako dvouplášťový. Vnitřní plášť je vyroben z oceli a vnější je vyroben z betonu. Vnější plášť umožňuje přístup vzduchu a na základě přirozené konvekce odvádí teplo z vnitřního pláště. Ohřátý vzduch vystupuje z kontejnmentu otvorem v jeho horní části. V případě havárie typu LOCA je vnitřní plášť chlazen vodou z nádrže umístěné v horní části. Chlazení vnitřního ocelového pláště umožňuje kondenzaci páry chladiva a tím snižování tlaku uvnitř kontejnmentu. Kondenzát vzniklý na stěnách ocelového pláště je sbírán a zachycován v zásobní nádrži a jímkách umístěných uvnitř kontejnmentu



Obr. 8 Schéma kontejnmentu JE s reaktorem AP600/AP1000 [8]

Čas potřebný pro uvedení do provozu od začátku stavebních prací je 36 až 48 měsíců. V současné době jsou jaderné elektrárny s reaktorem AP1000 licencovány pro provoz řízení a výstavba probíhá v číně. Ze strany amerického úřadu pro schvalování však byly vzneseny připomínky ke strukturální integritě kontejnmentu. Jedná se zejména o otázky týkající se odolnosti vnitřní ocelové části kontejnmentu vůči korozi a dalším druhům poškození a úniku radioaktivních látek do okolí díky přirozené konvekci vzduchu (nebo vodní páry v případě chlazení ocelové části kontejnmentu vodou z vnější nádrže) v mezeře mezi ocelovou a betonovou konstrukcí kontejnmentu. V případě události LOCA by znamenalo i malé porušení integrity ocelové části kontejnmentu vážné ohrožení (nejen) životního prostředí.[7], [18]

6.1.4. EPR

Reaktor EPR (European Pressurized Reactor) je společným projektem společností AREVA, Framatome a Siemens. Konstrukčně vychází z II. generace jaderných reaktorů Konvoi (Siemens) a N4 (Framatome). Jedná se o reaktor typu PWR. Jaderná elektrárna s reaktorem EPR je tedy dvouokruhová. Primární okruh je čtyřsmyčkový se čtyřmi parními generátory a čtyřmi hlavními cirkulačními čerpadly a jedním kompenzátorem objemu. Parogenerátory jsou vertikální konstrukce s definovaným axiálním ekonomizérem.

Bezpečnostní systém zasahující v případě události typu LOCA sestává z kombinací pasivních a aktivních bezpečnostních prvků a je tvořen čtyřmi nezávislými trasami. Bezpečnostní trasy a jejich komponenty (hydroakumulátory, systémy vysokotlakého a nízkotlakého doplňování vody a systémy odvodu reziduálního tepla z reaktoru) jsou od sebe vzájemně fyzicky odděleny a umístěny samostatně. Zásobní nádrž vody je umístěná ve spodní části dvouplášťového kontejnmentu a slouží zároveň jako bazén pro skladování použitého paliva vyjmutého z reaktoru.

Čas potřebný pro výstavbu jaderné elektrárny s reaktorem EPR od započetí stavebních prací po první spuštění by měl činit 42 měsíců, což dosavadní praxe jak je zmíněno v kapitole 6.3 zatím nepotvrdila. Výhodou tohoto projektu je jeho licencování v rámci EU. V současnosti je rovněž tento typ jaderné elektrárny ve výstavbě v Číně



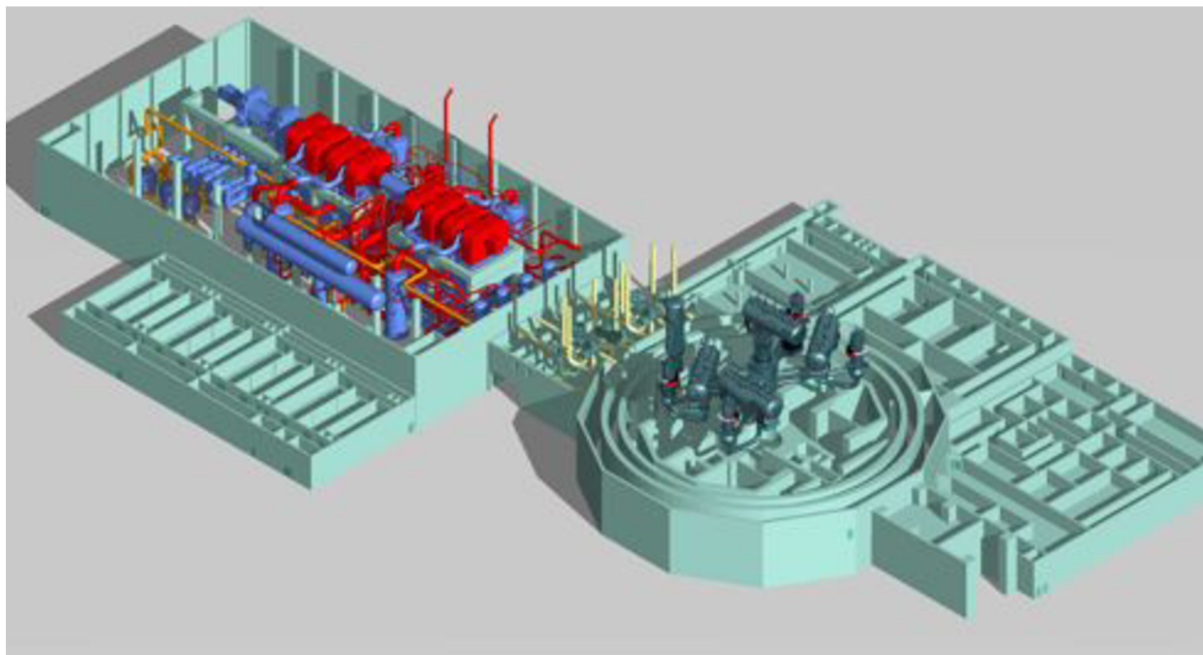
Obr. 9 Průřez elektrárnou s reaktorem EPR [20]

6.1.5. MIR-1200 (AES-2006)

MIR (Modernized International Reactor) je ruským reaktorem vycházející z ruské respektive sovětské konstrukce reaktorů VVER odlišujících se od západních konstrukcí reaktorů typu PWR zejména konstrukcí hrdlového prstence tlakové nádoby. Reaktory typu PWR západní konstrukce mají hrdla pro přivaření horké a studené větve smyčky primárního okruhu umístěna v jedné rovině, kdežto reaktory typu VVER mají hrdla pro přivaření horké a studené větve smyčky primárního okruhu umístěna nad sebou. Dalším rozdílem oproti jaderným elektrárnám s reaktory typu PWR západních konstrukcí je konstrukce parních generátorů. Parní generátory ruské konstrukce jsou horizontálně orientované. Reaktor MIR-1200 je nabízen společností Atomstroyexport spadající pod ruskou státní společnost Rosatom. Jaderná elektrárna s reaktorem MIR - 1200 je tedy dvouokruhová. Primární okruh je tvořen čtyřmi smyčkami se čtyřmi parogenerátory, čtyřmi hlavními cirkulačními čerpadly a jedním kompenzátorem objemu.

Bezpečnostní systém zasahující v případě události typu LOCA sestává z kombinací pasivních a aktivních bezpečnostních prvků a je tvořen čtyřmi nezávislými trasami. Bezpečnostní trasy a jejich komponenty (hydroakumulátory, systémy vysokotlakého a nízkotlakého doplňování vody a systémy odvodu reziduálního tepla z reaktoru) jsou od sebe vzájemně fyzicky odděleny a umístěny samostatně. Pasivní systém odvodu reziduálního tepla z reaktoru obsahuje čtyři vzduchem chlazené výměníky tepla umístěné mimo kontejnment.

Elektrárna AES-2006 a reaktorem MIR-1200 je v současné době ve výstavbě v Číně. Pro případnou dostavbu ETE je MIR-1200 pravděpodobně nabízen v konsorciu firem Škoda JS - ASE - Gidropress. Výhodou tohoto projektu jsou praktické zkušenosti s výstavou a provozem reaktorů respektive jaderných elektráren s reaktory typu VVER v podmínkách České republiky. Předpokládaná doba výstavby od započetí stavebních prací po první spuštění činí 54 měsíců. [24]



Obr. 10 Dispoziční řešení jaderné elektrárny s reaktorem MIR - 1200 [18]

6.2. Technické parametry vybraných typů jaderných elektráren s reaktory generace III a III+

Vybrané vlastnosti JE s reaktorem ABWR/ESBWR	
Typ reaktoru	varný (BWR)
Výkon tepelný	3926 / 4500 MW
Výkon elektrický	1350 / 1520 MW
Účinnost čistá	35%
Moderátor	lehká voda H ₂ O
Chladivo	lehká voda H ₂ O
Průměr tlakové nádoby - vnitřní	7,1 m
Výška tlakové nádoby	21 m
Počet okruhů elektrárny	1
Počet parních generátorů (smyček)	0 (pára je generována v reaktoru)
Tlak chladiva	7,3 MPa
Teplota chladiva na výstupu z reaktoru	287,4 °C
Průtok chladiva v primárním okruhu	52200 t/h
Počet turbosoustrojí (VT/ST/NT)	1 (1/0/3)
Otáčky turbosoustrojí	1500 min ⁻¹
Tlak páry na vstupu do turbíny	7,3 MPa
Teplota páry na vstupu do turbíny	287,4 °C
Počet palivových kazet	872 / 1132
Typ paliva	obohacený uran (3,2% ²³⁵ U + ²³⁸ U) ve formě UO ₂ , nebo UO ₂ -Gd ₂ O ₃ , směsné palivo MOX (až 100%)
Výhoření paliva	32 MWd/kg
Výměna paliva	kampaňovitá
Délka palivového cyklu	13 až 18 měsíců (24 měsíců u ESBWR)
CDF (1/rok)	1,6×10 ⁻⁷ / 3×10 ⁻⁸

Tab.3 Vybrané vlastnosti jaderné elektrárny s reaktorem ABWR/ESBWR [5], [17]

Vybrané vlastnosti JE s reaktorem APWR	
Typ reaktoru	tlakovodní (PWR)
Výkon tepelný	4451 MW
Výkon elektrický	až 1700 MW
Účinnost čistá	37% až 39%
Moderátor	lehká voda H ₂ O
Chladivo	lehká voda H ₂ O
Průměr tlakové nádoby - vnitřní	5,2 m
Výška tlakové nádoby	13,6 m
Počet okruhů elektrárny	2
Primární okruh	smyčkový
Počet parních generátorů (smyček)	4 - vertikální konstrukce
Tlak chladiva	15,5 MPa
Teplota chladiva na výstupu z reaktoru	325 °C
Průtok chladiva v primárním okruhu	2,6 x 10 ⁴ m ³ /h /smyčka
Počet turbosoustrojí (VT/ST/NT)	1 (1/0/3)
Otáčky turbosoustrojí	1500 min ⁻¹
Tlak páry na vstupu do turbíny	neuveďeno
Teplota páry na vstupu do turbíny	neuveďeno
Počet palivových kazet	257
Typ paliva	obohacený uran (do 5% ²³⁵ U + ²³⁸ U) ve formě UO ₂ , směsné palivo MOX
Vyhoření paliva	55 MWd/kg
Výměna paliva	kampaňovitá
Délka palivového cyklu	18 měsíců
CDF (1/rok)	< 10 ⁵

Tab. 4 Vybrané vlastnosti jaderné elektrárny s reaktorem APWR [6], [32]

Vybrané vlastnosti JE s reaktorem AP600 / AP1000	
Typ reaktoru	tlakovodní (PWR)
Výkon tepelný	1933 / 3400 MW
Výkon elektrický	610 / 1117 MW
Účinnost čistá	34%
Moderátor	lehká voda H ₂ O
Chladivo	lehká voda H ₂ O
Průměr tlakové nádoby - vnitřní	3,98 m / nezjištěno
Výška tlakové nádoby	12 m / nezjištěno
Počet okruhů elektrárny	2
Počet parních generátorů (smyček)	2 - vertikální konstrukce
Tlak chladiva	15,5 MPa
Teplota chladiva na výstupu z reaktoru	316/321 °C
Průtok chladiva v primárním okruhu	44,61 / 68,1 × 10 ³ m ³ /h
Počet turbosoustrojí (VT/ST/NT)	1 (1/0/2)/1 (1/0/3)
Otáčky turbosoustrojí	1500 min ⁻¹
Tlak páry na vstupu do turbíny	5,5 MPa
Teplota páry na vstupu do turbíny	271 °C
Počet palivových kazet	145/157
Typ paliva	obohacený uran (4,95% ²³⁵ U + ² ³⁸ U) ve formě UO ₂ , směsné palivo MOX
Výhoření paliva	až 62 MWd/kg
Výměna paliva	kampaňovitá
Délka palivového cyklu	18 měsíců
CDF (1/rok)	5 × 10 ⁻⁷

Tab. 5 Vybrané vlastnosti jaderné elektrárny s reaktorem AP600/AP1000 [7], [18]

Vybrané vlastnosti JE s reaktorem EPR	
Typ reaktoru	tlakovodní (PWR)
Výkon tepelný	4590 MW
Výkon elektrický	1650 MW
Účinnost čistá	36%
Moderátor	lehká voda H ₂ O
Chladivo	lehká voda H ₂ O
Průměr tlakové nádoby - vnitřní	4,87 m
Výška tlakové nádoby	13,7 m
Počet okruhů elektrárny	2
Primární okruh	smyčkový
Počet parních generátorů (smyček)	4 - vertikální konstrukce
Tlak chladiva	15,5 MPa
Teplota chladiva na výstupu z reaktoru	328,1 °C
Průtok chladiva v primárním okruhu	80 × 10 ³ t/h
Počet turbosoustrojí (VT/ST/NT)	1 (1/0/3;1/1/3)
Otáčky turbosoustrojí	1500 min ⁻¹
Tlak páry na vstupu do turbíny	7,8 MPa
Teplota páry na vstupu do turbíny	230 °C
Počet palivových kazet	241
Typ paliva	obohacený uran (5% ²³⁵ U + ²³⁸ U) ve formě UO ₂ , nebo UO ₂ -Gd ₂ O ₃ , směsné palivo MOX (až 100%)
Výhoření paliva	55 až 62 MWd/t
Výměna paliva	kampaňovitá
Délka palivového cyklu	12 až 24 měsíců
CDF (1/rok)	6,1×10 ⁻⁷

Tab. 6 Vybrané vlastnosti jaderné elektrárny s reaktorem EPR [11]

Vybrané vlastnosti JE s reaktorem MIR - 1200 (AES-2006)	
Výkon tepelný	3200 MW
Výkon elektrický	1200 MW
Účinnost čistá	33.7%
Moderátor	lehká voda H ₂ O
Chladivo	lehká voda H ₂ O
Průměr tlakové nádoby - vnitřní	4,6 m
Výška tlakové nádoby	11,2 m
Počet okruhů elektrárny	4
Primární okruh	smyčkový
Počet parních generátorů (smyček)	4 - horizontální konstrukce
Tlak chladiva	16,2 MPa
Teplota chladiva na výstupu z reaktoru	329,7 °C
Průtok chladiva v primárním okruhu	86 × 10 ³ m ³ /h
Počet turbosoustrojí (VT/ST/NT)	1 (1/0/3)
Otáčky turbosoustrojí	3000 min ⁻¹
Tlak páry na vstupu do turbíny	7 MPa
Teplota páry na vstupu do turbíny	285,8 °C
Počet palivových kazet	163
Typ paliva	obohacený uran (5% ²³⁵ U + ²³⁸ U) ve formě UO ₂ , směsné palivo MOX (až 100%)
Vyhoření paliva	max. 70 MWd/kg
Výměna paliva	kampaňovitá
Délka palivového cyklu	24 měsíců
CDF (1/rok)	< 10 ⁻⁶

Tab. 7 Vybrané vlastnosti jaderné elektrárny s reaktorem MIR - 1200 (AES-2006) [12]

6.3. Porovnání nákladů na výstavbu jaderných elektráren s reaktory generace III (III+)

Jedním z cílů investorů a provozovatelů jaderných elektráren s reaktory III. (III+) generace je snížit celkové náklady na výstavbu a provoz jaderných elektráren. Celkové náklady zohledňují všechny náklady na výstavbu vztažené na projektovaný čistý elektrický výkon (v kWe) bloku jaderné elektrárny. Vzhledem k malé celosvětové zkušenosti s výstavbou a provozem těchto jaderných elektráren se jedná převážně o náklady odhadované. Výjimku v tomto případě tvoří pouze jaderné elektrárny s reaktory ABWR, které jsou v provozu v Japonsku a EPR, které jsou ve výstavbě ve finském Olkiluoto a francouzském Flamanville. V praxi se však ukazuje že dochází k výraznému překročení původně odhadovaných nákladů. Značné zpoždění výstavby ve Finsku a téměř dvojnásobné překročení celkových nákladů na 1 kW bylo dáno zejména nedodržením projektu při výstavbě, předepsaných materiálů a nevyhovujícími svary ocelové části kontejnmentu a částí tlakové nádoby reaktoru. Udržení nákladů na výstavbu na přijatelné úrovni závisí jak na dodržení projektů, tak na zkušenostech s výstavbou. Předpokládá se, že výstavba každého dalšího bloku jednoho typu jaderné elektrárny přinese snížení těchto celkových nákladů. [34]

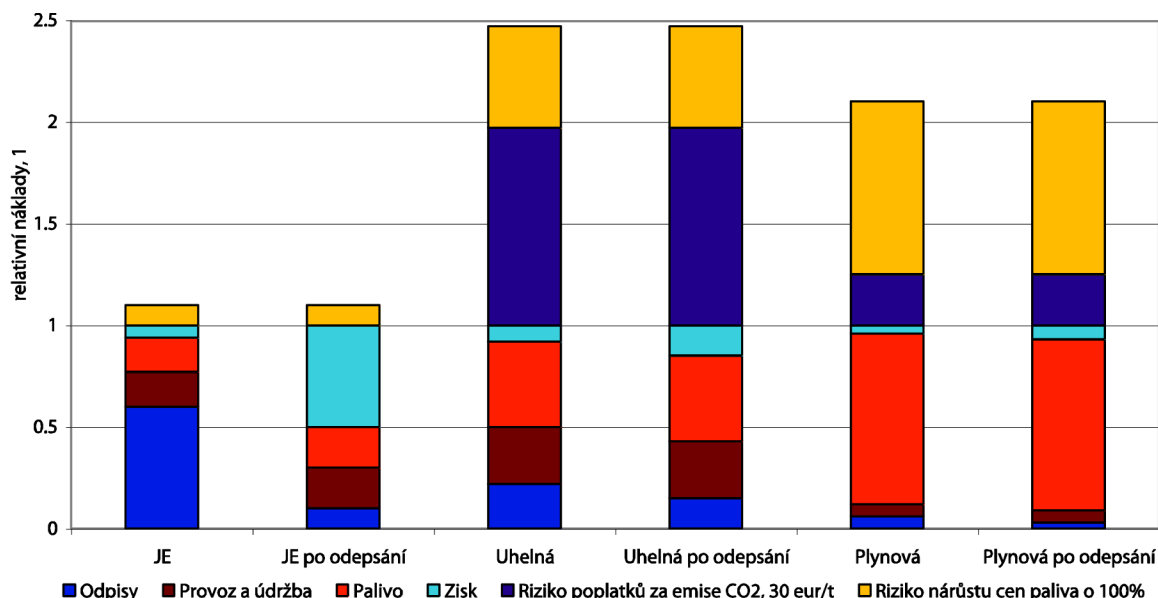
Celkové náklady na výstavbu nového jaderného zdroje			
Typ reaktoru	celková cena USD/kW	celková cena Kč/kW	Poznámka
ABWR	1400 až 1600	26380 až 30144	odhad udávaný dodavatelem
MIR-1200	1200	22608	odhad udávaný dodavatelem
AP1000	3500	65940	odhad pro 1. elektrárnu typu AP1000
	1000 až 1400	18840 až 26380	odhad pro další bloky
EPR	1400	26380	dosažitelná cena udávaná dodavatelem
	2590	48796	Flamanville - odhad
	2250 až 3475	42390 až 65469	Olkiluoto 3 - odhad
	až 4000	75360	Olkiluoto 3 - pravděpodobné náklady
ETE	-	50000	porovnání

Tab. 8 Porovnání celkových nákladů na výstavbu nového jaderného zdroje [34]²

² Přepočít z USD na Kč je proveden na základě kurzu ČNB ze dne 1.4.2010 (18,843 Kč/USD). Porovnání s jadernou elektrárnou Temelín je pouze orientační a není zde zohledněn vliv inflace, dalších ekonomických veličin a velikost kurzu k USD v době její výstavby. Odhadovaná celková cena ETE dle [33] činí cca 100×10^9 Kč

Porovnání celkových nákladů na výstavbu, nákladu fixních (provozních a nákladů na údržbu) a nákladu pro zajištění paliva je znázorněno na obrázku 11. Z obrázku je patrné, že při výstavbě nového jaderné zdroje jsou právě náklady na výstavu jedny z nejvyšších. Naopak palivové náklady jsou jedny z nejnižších.

Palivové náklady jsou rovněž významným faktorem, jenž by měl být při výstavbě nových zdrojů elektrické energie zvažován. Nejvyšší palivové náklady představuje použití zemního plynu v kombinovaném paroplynovém cyklu. Cena surovin pro výrobu elektrické energie všeobecně roste. Nejvyššímu riziku růstu ceny je vystaven zemní plyn, jehož produkce (a také cena) je úzce spjata s cenou ropy. To může značně ovlivnit cenu elektrické energie vyráběné v kombinovaném paroplynovém cyklu. Stejný problém vykazují i ostatní fosilní paliva a souvisí to zejména s velikostí jejich zásob. Vývoj ceny přírodního uranu vykazoval v poslední době rovněž prudký nárůst, ale jeho cena nemusí být při využití recyklace použitého paliva a zavedení uzavřeného palivového cyklu s množivými jadernými reaktory rozhodujícím faktorem, při ekonomickém posuzování vhodnosti či nevhodnosti nových budovaných zdrojů elektrické energie. [14]



Obr. 11 Porovnání velikosti nákladů jednotlivých zdrojů elektrické energie [14]

7. Generace IV

Reaktory IV. generace jsou nyní vyvíjené jaderné reaktory s předpokládaným nasazením před koncem 1. poloviny 21. století. Vývoj těchto vesměs nových typů jaderných reaktorů probíhá pod záštitou asociace GIF (Generation IV International Forum). Mezi státy které jsou členy GIF patří Spojené státy americké, Velká Británie, Kanada, Francie, Japonsko, Švýcarsko, Brazílie, Jihoafrická Republika, Jižní Korea a Argentina. Možnosti použití těchto reaktorů pro různé aplikace jsou naznačeny na tabulce 9.

Časový horizont uvedení jednotlivých typů do provozu je značně závislý na celkovém vývoji jaderné energetiky zejména v oblasti ekonomiky, bezpečnosti, způsobu využití získávané energie v dalších oblastech průmyslu a společenské přijatelnosti. Většina níže uvedených typů jaderných elektráren generace IV využívá palivo v uzavřeném cyklu. Pro další výzkum a vývoj byla vybrána šestice typů jaderných reaktorů generace IV, které je stále ve vývoji. Oblasti na které se vývoj v současnosti soustředí jsou především palivový cyklus, typ a kompozice paliva, pokrytí, konstrukční materiály, bezpečnost a rizika, odolnost konstrukce a celková bezpečnost.

Průmyslové aplikace reaktorů IV. generace	
Výroba elektrické energie	SCWR
	SFR
Výroba elektrické energie a výroba vodíku	GFR
	LFR
	MSR
Výroba vodíku	VHTR

Tab. 9 Možnosti užití reaktorů IV. generace pro různé aplikace [35]

Přínos jaderných reaktorů generace IV [35], [36]:

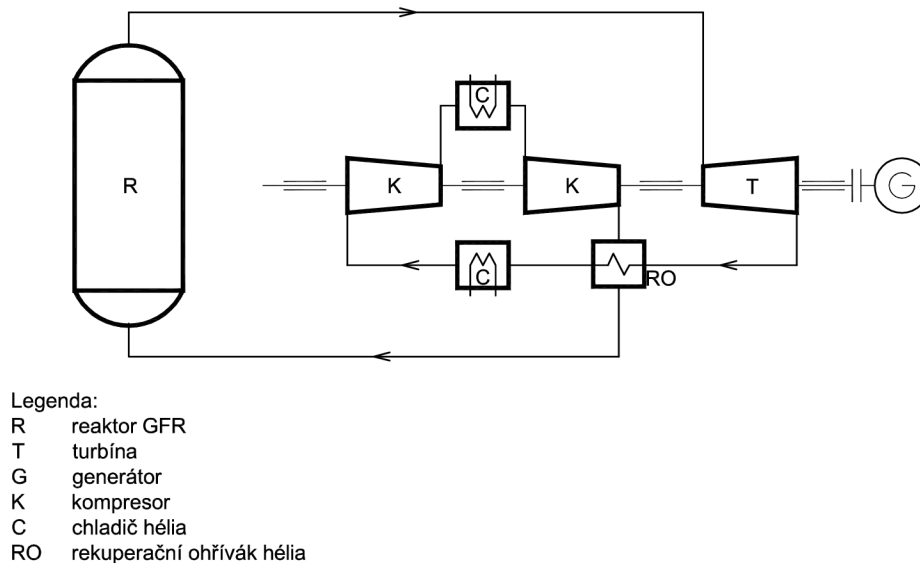
- robustnější a odolnější modulární konstrukce
- zlepšení ekonomie provozu, další snížení nákladů pro výstavbu a provoz
- úspora jaderného paliva, snížení potřeby těžby přírodního uranu díky zapojení do uzavřeného palivového cyklu a recyklaci použitého jaderného paliva. Díky vyššímu vyhoření paliva a využívání minoritních aktinoidů umožní jaderné reaktory generace IV. snížit radioaktivitu zbytků nutných k uložení do hlubinných úložišť a tím omezit rizika vyplývající dlouhodobého ukládání radioaktivních odpadů a jejich vlivu na životní prostředí
- využití alternativních chladiv u různých koncepcí jaderných reaktorů jako jsou kovy (sodík, olovo a jeho slitiny s bismutem) nebo roztavené soli na bázi fluoridů
- značně vyšší teplota chladiva na výstupu z reaktoru (v porovnání s jadernými reaktory II. a III. generace) umožňuje použití plynů (He, CO₂) v sekundárním okruhu a jejich energii využívat v expanzních plynových turbínách pro výrobu elektrické energie. V případě

plynem (He) chlazených jaderných reaktorů (GFR a VHTR) je možné přímé vedení plynu z reaktoru na expanzní plynovou turbínu.

- možnost produkce vodíku jako alternativního zdroje energie, nebo aplikace pro odsolování mořské vody v oblastech s nedostatkem pitné vody
- využíváním plutonia, minoritních aktinoidů a recyklací použitého jaderného paliva je možné omezit zneužitelnost těchto materiálů k výrobě zbraní
- další zvýšení bezpečnosti s využitím pasivních bezpečnostních prvků

7.1. Přehled reaktorů generace IV

7.1.1. GFR (Gas - Cooled Fast Reactor)



Obr. 12 Zjednodušené schéma jaderné elektrárny s reaktorem GFR [35]

GFR je plynem chlazený jaderný reaktor využívající pro štěpení jaderného paliva rychlé spektrum neutronů. Projekt vychází z koncepce vysokoteplotních plynem chlazených reaktorů (zejména CO₂). Jako chladivo tohoto typu reaktoru je zvoleno hélium. Mezi výhody hélia patří jeho netečnost, radiční stálost, nízká indukovaná aktivita, nízký účinný průřez pro absorpci neutronů a dobré vlastnosti pro přenos tepla. Nevýhodou však je jeho problematické těsnění v okruhu a v neposlední řadě jeho vzácnost a cena. Velmi vysoké teploty hélia rovněž kladou vysoké požadavky jak na použité materiály, tak na jejich zpracování.

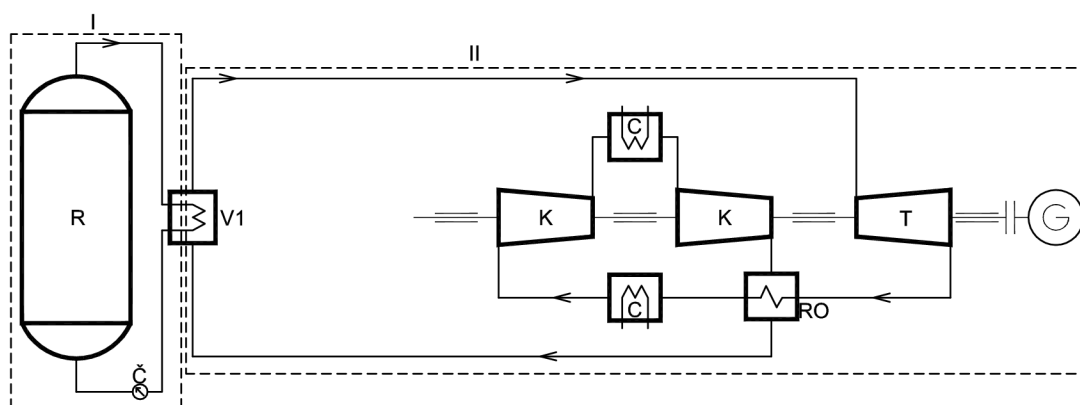
Jaderná elektrárna s reaktorem typu GFR by měla být součástí uzavřeného palivového cyklu jaderného paliva. Rychlé spektrum neutronů dovoluje štěpení minoritních aktinoidů a rovněž využití použitého paliva ze současných reaktorů typu PWR generace II a III.

Jaderná elektrárna s reaktorem GFR je koncipována jako jednookruhová, kdy chladivo z reaktoru je vedeno přímo na plynovou expanzní turbínu pro výrobu elektrické energie. Expanzní plynová turbína také slouží pro pohon kompresorů pro opětovné zvýšení tlaku hélia na požadované parametry (cca 9 MPa). Jedná se tedy o realizaci Braytonova cyklu zobrazeného na obrázku 12 s dvěma kompresorovými stupni, jedním turbínovým stupněm a regenerací tepla. [35]

Vybrané parametry referenční konstrukce reaktoru typu GFR	
Výkon tepelný	600 MW
Neutronové spektrum	rychlé
Účinnost čistá (Braytonův cyklus)	48%
Teplota chladiva na výstupu z reaktoru	850 °C
Tlak chladiva v primárním okruhu	9 MPa
Typ paliva	UPuC/SiC - karbidické s obsahem 20% ^{239}Pu
Palivový cyklus	uzavřený

Tab. 10 Vybrané vlastnosti reaktoru typu GFR [35]

7.1.2. LFR (Lead - Cooled Fast Reactor)



Legenda:

- R reaktor LFR
- I primární okruh - olovo (slitina olovo - bismut)
- II sekundární okruh - hélium
- T turbína
- G generátor
- K kompresor
- C chladič hélia
- Č cirkulační čerpadlo
- RO rekuperační ohřívák plynu
- V1 výměník tepla olovo/hélium

Obr. 13 Zjednodušené schéma jaderné elektrárny s reaktorem typu LFR [35]

LFR je olovem chlazený jaderný reaktor. Jako chladivo rovněž může být použita eutektická slitina olovo - bismut. Reaktory chlazené olovem byly 70. létech 20. století poprvé použity v sovětských ponorkách. Výhodou olova jako chladiva je jeho vysoká teplota varu 1794°C . Vysoká teplota varu chladiva umožňuje konstruovat tlakovou nádobu tohoto typu reaktoru jako beztlakou (tlak chladiva $\sim 0,1$ MPa). Nevýhodou použití kovů a jejich slitin obecně, jako nosičů tepla, je nutnost udržovat celý systém (reaktor, výměníky tepla, parní

generátory, potrubní systémy) zahřátý nad jejich teplotou tavení (v případě olova 325°C) i v dobách odstávek a podobně. Nevýhodou olova je rovněž jeho značná toxicita.

Uvažované spektrum výkonů jaderných elektráren s reaktorem typu LFR by mělo umožnit značně široký rozsah použití:

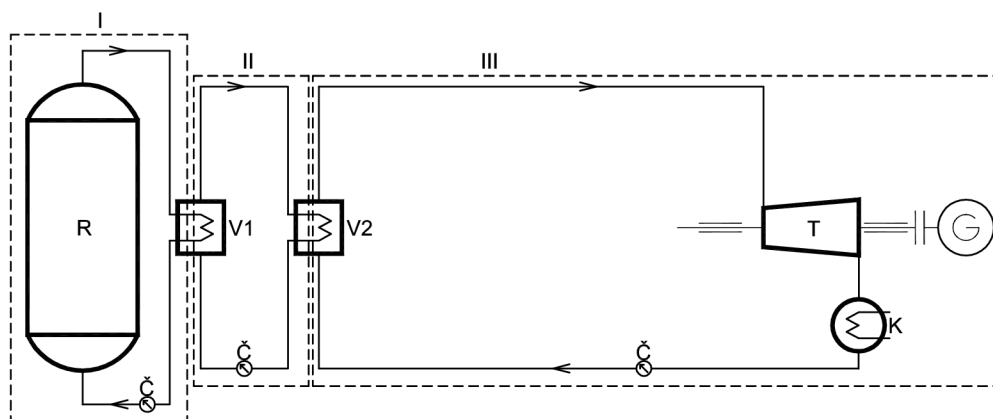
- Verze jaderného reaktoru LFR battery o výkonu 120 až 400 MWt (50 až 150 MWe) je koncipována jako velice kompaktní jednookruhová konstrukce. Veškeré komponenty primárního okruhu (výměníky tepla, nebo parogenerátory v případě realizace Rankine - Clausiově cyklu) jsou umístěny přímo v tlakové nádobě reaktoru s využitím přirozené konvekce chladiva. Verze battery by měla být průmyslově vyráběná a dodávaná jako kompaktní zdroj pro výrobu elektrické energie s velmi dlouhým palivovým cyklem (10 až 30 let) bez nutnosti zásahů do vnitřních částí reaktorů. To umožní její využití i v oblastech bez potřebné infrastruktury pro nakládání jak s čerstvým, tak použitým palivem.
- Verze reaktoru LFR modular o výkonu cca 1000 MWt (300 až 400 MWe). Malé a střední jaderné elektrárny s tímto typem reaktoru jsou koncipovány jako dvouokruhové.
- Verze jaderného reaktoru LFR large o výkonu cca 3600 MWt (až 1200 MWe) pro velké jaderné elektrárny koncipované jako dvouokruhové.

Vybrané parametry referenční konstrukce reaktoru typu LFR (ELSY)	
Výkon tepelný	600 MW
Neutronové spektrum	rychlé
Účinnost čistá (Braytonův cyklus)	42%
Teplota chladiva na výstupu z reaktoru	550 °C
Tlak chladiva v primárním okruhu	0.1 MPa
Typ paliva	MOX, nitridické a Al povlakem
Palivový cyklus	uzavřený

Tab. 11 Vybrané vlastnosti reaktoru typu LFR [36]

Teplonosnou látkou v sekundárním okruhu může být plyn (například hélium), který je přímo veden na plynovou expanzní turbínu pro výrobu elektrické energie. Expanzní plynová turbína rovněž slouží pro pohon kompresorů pro opětovné zvýšení tlaku plynu na požadované parametry v sekundárním okruhu. Jedná se tedy o realizaci Braytonova cyklu zobrazeného na obrázku 13 s dvěma kompresorovými stupni, jedním turbínovým stupněm a regenerací tepla. Místo plynu může být použita v sekundárním okruhu rovněž voda, ze které může být v parních generátorech generována pára o nadkritických, nebo podkritických parametrech, jejíž energie může být využita v klasické parní kondenzační turbíně. [35]

7.1.3. SFR (Sodium - Cooled Fast Reactor)



Legenda:

- R reaktor SFR
- I primární okruh - sodík
- II sekundární okruh - sekundární sodík
- III terciární okruh - voda/pára
- T turbína
- G generátor
- Č cirkulační čerpadlo
- K kondenzátor
- V1 mezivýměník sodík - sekundární sodík
- V2 parogenerátor

Obr. 14 Zjednodušené schéma jaderné elektrárny s reaktorem typu SFR

Sodíkem chlazený rychlý reaktor IV. generace typu SFR vychází z konstrukce jaderných reaktorů typu LMFBR provozovaných v 2. polovině 20. století. Příkladem mohou sloužit francouzské jaderné elektrárny s reaktory Phénix a Superphénix. Jaderná elektrárna s reaktorem Superphénix byla se svým výkonem 1200 MWe největším svého druhu. Jiným příkladem může být jaderná elektrárna BN-600, která je v úspěšném komerčním provozu od roku 1980.

Reaktor SFR je vyvíjen za účelem „spalování“ vysoce aktivních odpadů, plutonia a minoritních aktinoidů v uzavřeném palivovém cyklu. Sodík podobně jako olovo nabízí velmi dobré vlastnosti pro přenos tepla, nízkou teplotu tání ($\sim 98\text{ }^{\circ}\text{C}$) a vysokou teplotu varu ($883\text{ }^{\circ}\text{C}$). Tyto vlastnosti opět umožňují konstruovat nádobu reaktoru jako beztlakou (tlak chladiva $\sim 0,1\text{ MPa}$). Nevýhodou sodíku však je jeho vysoká reaktivita při styku s vodou i vodní parou. Proto jsou elektrárny s tímto typem reaktoru většinou koncipovány jako tři okruhové pro oddělení primárního (aktivního) sodíku od vodní páry v okruhu terciárním. V sekundárním okruhu proudí opět sodík. Alternativně může být v terciárním okruhu použit plyn CO_2 s nadkritickými parametry. Primární okruh rychlých sodíkem chlazených reaktorů je v některých případech konstruován jako integrální. Komponenty primárního okruhu (hlavní cirkulační čerpadlo a mezivýměník tepla sodík/sodík) jsou pak umístěny ve vnější nádobě reaktoru.

Jaderné elektrárny s reaktorem typu SFR by měly být k dispozici v širokém rozsahu výkonů od malých (50 až 150 MWe) modulárních konstrukcí až po velké tři okruhové

elektrárny o výkonu v řádu 600 až 1500 MWe a pravděpodobně se bude jednat o první komerčně nabízené a provozované jaderné reaktory generace IV. V současné době rovněž probíhá výstavba sodíkem chlazeného reaktoru BN-800 v ruské jaderné elektrárně Bělojarsk. [35]

Vybrané parametry referenční konstrukce reaktoru typu SFR	
Výkon tepelný	600 MW
Neutronové spektrum	rychlé
Účinnost čistá	42%
Teplota chladiva na výstupu z reaktoru	550 °C
Tlak chladiva v primárním okruhu	0.1 MPa
Typ paliva	MOX (oxidické), U-Pu-Zr, (kovové)
Palivový cyklus	uzavřený

Tab. 12 Vybrané vlastnosti reaktoru typu SFR [35]

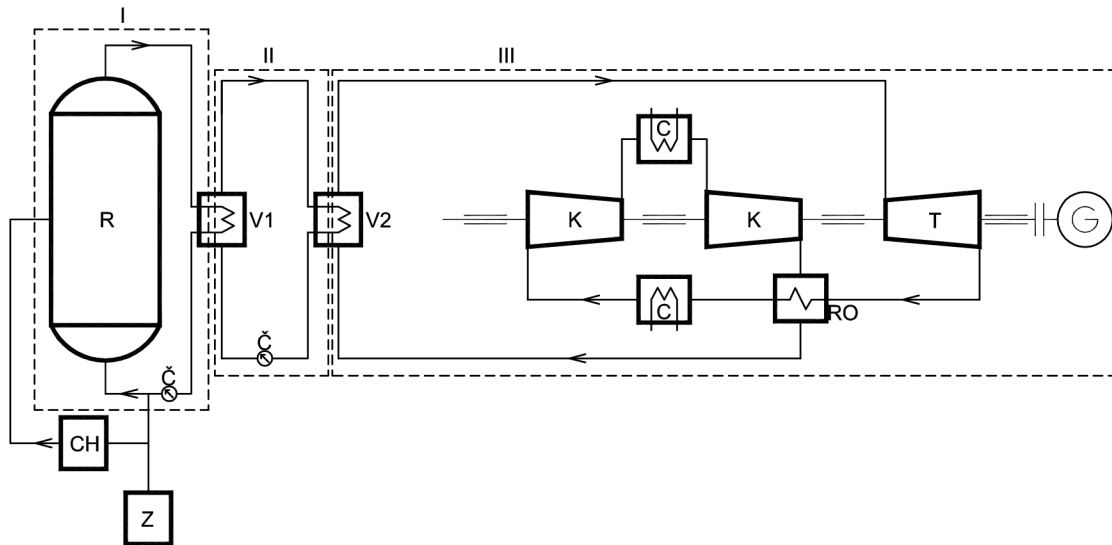
7.1.4. MSR (Molten Salt Reactor)

Jaderný reaktor chlazený roztavenými solemi na bázi fluoridů byl poprvé vyvíjen a testován pro pohon strategických bombardérů USA v 50. letech 20. století (reaktor ARE). Navazujícími projekty byly MSRE (v provozu byl v laboratořích ORNL o výkonu 7,4 MWt) a MSBR (Molten Salt Breeder Reactor). Projekt MSBR byl navržen jako rychlý reaktor s uran - thoriový palivovým cyklem, ale nebyl nikdy realizován.

MSR je jaderným reaktorem využívajícím ke štěpení jaderného paliva termální spektrum neutronů (moderátorem je grafit tvořící aktivní zónu reaktoru), nebo rychlé spektrum neutronů.

Jaderné elektrárny s reaktorem typu MSR jsou navrhovány jako tři okruhové. Z uvažovaných typů solí se nejvíce osvědčily soli na bázi fluoridů. Mezi hlavní přednosti některých typů solí v kapalném stavu jsou jejich chemická a radiační stálost, nízké korozní působení zejména na některé slitiny niklu, které byly pro tento účel vyvinuty (například Hastelloy N), nízká teplota tavení, vysoká teplota varu a nízká tenze par. Podobně jako u reaktorů chlazených kovem může být tlaková nádoba konstruována jako beztlaková (tlak chladiva ~ 0,1 MPa). Termofyzikálními vlastnostmi jsou roztavené soli na bázi fluoridů velice podobné vodě. Palivové soli, které jsou zároveň chladivem v primárním okruhu mají ve své matici rozpuštěno jaderné palivo ve formě UF_4 , ThF_4 , nebo PuF_3 . Jedná se zejména o soli složené z fluoridů LiF, BeF, nebo ZrF_4 obohacené o palivovou složku. Tímto způsobem je zajištěn dokonalý styk paliva s chladivem. Roztavené soli v sekundárním okruhu slouží pro transport tepla z primárního okruhu do okruhu terciárního s heliem a jedná se zejména o směsi LiF - BeF₂, NaBF₄ - NaF, nebo LiF - NaK. Stejně jako u roztavených kovů je nutné, aby všechny systémy (reaktor, výměníky tepla, parní generátory, potrubní systémy, zařízení

na úpravu a čištění soli a podobně), ve kterých se sůl vyskytuje byly udržovány nad teplotou tavení soli.



Legenda:

- R reaktor MSR
- I primární okruh - palivová sůl
- II sekundární okruh - sekundární sůl
- III terciární okruh - hélium
- T turbína
- G generátor
- K kompresor
- C chladič hélia
- Č cirkulační čerpadlo
- RO rekuperační ohřívák hélia
- V1 mezivýměník palivová sůl - sůl sekundární
- V2 mezivýměník sůl sekundární - hélium
- Z zásobník soli
- CH chemická úprava palivové soli (čištění soli, doplňování paliva)

Obr. 15 Zjednodušené schéma jaderné elektrárny s reaktorem MSR

Vybrané parametry referenční konstrukce reaktoru MSR	
Výkon tepelný	1000 MW
Neutronové spektrum	termální
Účinnost čistá (Braytonův cyklus)	44 až 50%
Teplota chladiva na výstupu z reaktoru	700 až 850 °C
Tlak chladiva v primárním okruhu	0.1 MPa
Typ paliva	minoritní aktinoidy a ^{239}Pu
Palivový cyklus	uzavřený

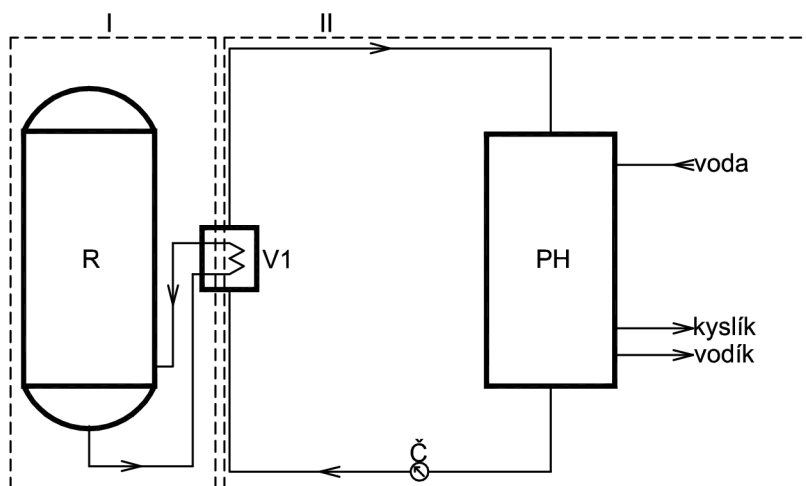
Tab. 13 Vybrané vlastnosti reaktoru MSR[35]

Jaderná elektrárna s reaktorem typu MSR by měla disponovat zařízením pro kontinuálním doplňováním a přepracováním paliva. Elektrárna by zároveň měla disponovat

chemickými a technologickým zázemím pro čištění soli od nežádoucích prvků vznikajících při štěpení. Nevýhodou použití soli s příměsí lithia je vznik tricia jeho štěpením. Vysoké teploty chladiva na výstupu umožňují využívat reaktor typu MSR pro výrobu elektrické energie v Braytonově cyklu s plynovou expanzní turbínou, kdy teplonosnou látkou v terciárním okruhu je plyn (hélium). Zároveň je tento typ jaderného reaktoru vhodný pro další náročné průmyslové aplikace (výroba vodíku).

[35]

7.1.5. VHTR (Very High Temperature Reactor)



Legenda:

- R reaktor VHTR
- V1 výměník tepla
- PH procesní zařízení pro výrobu vodíku
- Č cirkulační čerpadlo

Obr. 16 Zjednodušené schéma procesního zařízení na výrobu vodíku s reaktorem VHTR

Jaderný reaktor typu VHTR je dalším vývojovým stupněm vysokoteplotních plynem chlazených reaktorů (HTGR), který je vyvíjen jak pro výrobu elektrické energie, tak za účelem získání energetického zdroje pro náročné průmyslové aplikace, jako je výroba vodíku termochemickými cestami, nebo rozkladem páry. Tento typ jaderného reaktoru rovněž může nalézt uplatnění v kogeneraci.

Aktivní zóna jaderného reaktoru typu VHTR je tvořena grafitem, který je moderátorem. Chladivem primárního okruhu je hélium. Reaktor využívá ke štěpení termální spektrum neutronů. Hélium s teplotou až 1000 °C na výstupu může být přímo vedeno na plynovou expanzní turbínu pro výrobu elektrické energie, nebo může být jeho energie předávána ve výměníku tepla do sekundárního okruhu. Takto získané teplo pak může být využíváno v rafinériích, petrochemii, pro výrobu vodíku a v dalších oblastech průmyslu. Vysoké teploty chladiva však kladou velmi vysoké požadavky na použité materiály jednotlivých komponent reaktoru, pokrytí paliva, potrubí a jejich izolace.

V současné době se připravuje stavba tohoto typu reaktoru pod označením PBMR (Pebble Bed Modular Reactor) v JAR. Palivem by měl být v případě reaktoru PBMR obohacený uran ($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$) obalené povlakem z karbidu křemíku kulového tvaru, nebo směsné palivo MOX (až 100%).

[35]

Vybrané parametry referenční konstrukce reaktoru VHTR	
Výkon tepelný	600 MW
Neutronové spektrum	termální
Účinnost	více než 50%
Teplota chladiva na výstupu z reaktoru	až 1000 °C
Tlak chladiva v primárním okruhu	neuvedeno
Typ paliva	prizmatické, nebo kulové s pokrytím ZrC s obohacením do 20% ^{235}U
Palivový cyklus	otevřený

Tab. 16 Vybrané vlastnosti reaktoru VHTR[35]

7.1.6. SCWR (Supercritical Water - Cooled Reactor)

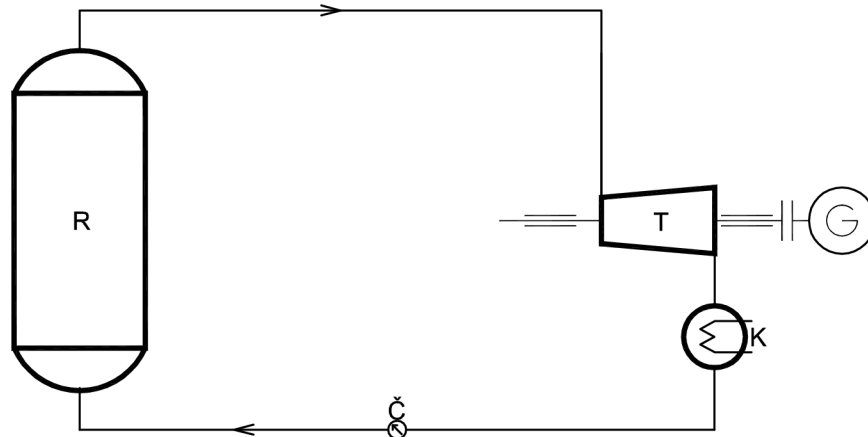
Reaktor s nadkritickými parametry páry vychází z koncepce varných reaktorů a je primárně vyvíjen pro výrobu elektrické energie. Reaktor by měl vyrábět páru o tlaku a teplotě nad kritickým bodem vodní páry (22,1 MPa a 374,15 °C). V praxi se pak bude jednat o hodnoty přibližně dvakrát vyšší, než u dnešních jaderných reaktorů typu PWR. Cílem vývoje jaderných elektráren s tímto typem reaktoru je zvýšení čisté účinnosti výroby elektrické energie oproti dnešním reaktorům typu PWR, která by měla dosáhnout až 44%. Zvýšení parametrů na straně napájecí vody vede ke snížení hustoty chladiva a tím i potřebné čerpací práce. Průtok chladiva reaktorem se uskutečňuje bez recirkulace chladiva v reaktoru (obdobu průtočného kotle s nadkritickými parametry) a není tedy zapotřebí instalací separátorů vlhkosti a dalších zařízení do nitra tlakové nádoby. Oproti reaktorům typu PWR rovněž odpadá použití parních generátorů. Tímto lze dosáhnout značné úspory jak materiálů, tak prostoru uvnitř kontejneru. Počet jednotlivých komponentů tak může být značně redukován. Přechodem k nadkritickým parametřům páry rovněž dojde k odstranění dalších problémů souvisejících s blánovým varem (krize varu 1. a 2. druhu) na povrchu pokrytí palivových elementů.

Jaderná elektrárna reaktoru typu SCWR je navrhována jako jednookruhová.

Při využití otevřeného palivového cyklu je jako palivo uvažován obohacený uran obohacený uran ($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$) ve formě UO_2 s kovovým pokrytím z oceli, nebo niklových slitin. V tomto případě je pro štěpení využito termální spektrum neutronů. Použití termálního spektra neutronů si však vyžádá silnou moderaci, kterou voda o nadkritických parametrech

není schopna zajistit, Při využití uzavřeného palivového cyklu, by jako palivo měly sloužit minoritní aktinoidy štěpené rychlým neutronovým spektrem.

[35]



Legenda:

- R reaktor SCWR
- T turbína
- G generátor
- K kondenzátor
- Č cirkulační čerpadlo

Obr. 17 Zjednodušené schéma jaderné elektrárny s reaktorem SCWR

Vybrané parametry referenční konstrukce reaktoru SCWR	
Výkon elektrický	1700 MW
Neutronové spektrum	rychlé; termální
Účinnost	44%
Teplota chladiva na výstupu z reaktoru	510 °C
Tlak chladiva v primárním okruhu	25 MPa
Typ paliva	minoritní aktinoidy; oxidické s kovovým pokrytím
Palivový cyklus	uzavřený; otevřený

Tab. 17 Vybrané vlastnosti reaktoru SCWR [35]

8. Možnosti českého průmyslu při výstavbě nových jaderných bloků v ČR

Český (československý) průmysl a věda v minulosti prokázali svou vyspělost a schopnost při výstavbách jaderných elektráren počínaje elektrárnou A1 a elektrárnou Temelín konče. Je velmi pravděpodobné, že dostavbu dvou bloků jaderné elektrárny Temelín a obnovu jaderné elektrárny Dukovany na území České republiky bude komplexně zajišťovat a zastřešovat vítěz výběrového řízení. V rámci generálních dodávek i subdodávek se tímto otvírá značný prostor pro české firmy ve většině oblastí průmyslu.

V oblasti hutnictví došlo po roce 1989 k velkým změnám na poli výroby surového železa a oceli. Většina firem ve vlastnictví státu (nejen hutních) přešla do rukou soukromých vlastníků a to zpravidla zahraničních. Velká část provozů byla uzavřena, nebo restrukturalizována tak, aby vyhověla portfoliu svých nových majitelů, kteří se rekrutovali zejména z nadnárodních korporací. Všeobecně největším problémem české energetiky je dostupnost speciálních (nejen nerezových) ocelí. Vzhledem k ceně výrobků z nerezových ocelí pro speciální aplikace je jejich dostupnost až na výjimky obtížná a dodací lhůty se pohybují v řádech měsíců, případně musejí být objednávány v zahraničí. Většina českých resp. československých firem podílejících se na výstavbě jaderné elektrárny Temelín si svůj výrobní program v oblasti jaderné energetiky zachovala a je schopna se na dostavbě výše zmíněných jaderných elektráren podílet. Přehled firem nabízející své služby a výrobky v oblasti jaderné energetiky je uveden v tabulce 12. Tabulka 12 si neklade za cíl pokrýt všechny firmy zabývající se jadernou energetikou v České republice, ale má poskytnout informativní přehled. Z uvedeného přehledu lze usoudit (za předpokladu, že tyto firmy disponují kvalifikovanými pracovníky), že český průmysl je připraven a schopen se podílet na výstavbě nových bloků jaderných elektráren v České republice. Většina strojírenských a elektrotechnických firem a institucí zabývajících se jadernou energetikou se sdružuje v Národním strojírenském klastru. Toto uskupení předpokládá plné oživení jaderné - energetického zaměření svých firem do roku 2012.

8.1. Primární okruh

Výroba komponent primárního okruhu je značně specifická z hlediska konstrukce jednotlivých částí, použitých materiálů, nároků na svařování a tepelného zpracování. Zároveň musí tato zařízení splňovat všechny požadavky vyplývající z jaderné a technické bezpečnosti. Tyto specifika primárního okruhu vedou rovněž k vysokým požadavkům na kvalifikaci a schopnosti všech zúčastněných osob ve všech fázích výstavby.

Společnost Škoda J.S. patří mezi nejvýznamnější společnosti v oblasti jaderného průmyslu v České republice. Společnost se začala jadernému programu věnovat v roce 1956. V tomto roce byl vyroben první československý jaderný reaktor KS150 o výkonu 150 MWe. Následně firma vyráběla převzaté ruské jaderné reaktory VVER. Škoda J.S. v současné době nabízí široký sortiment produktů zahrnující příslušenství k většině typů jaderných reaktorů jako jsou utahovací zařízení, hermetické kabelové průchodky, zařízení pro měření a přírubová těsnění. Společnost rovněž nabízí palivové mříže pro skladování použitých palivových souborů pro reaktory typu VVER, PWR a BWR. Dále se podílí na výrobě skladovacích

kontejnerů CASTOR a CONSTOR pro suché skladování použitého jaderného paliva. Společnost se podílela na výrobě vnitřních komponent reaktoru EPR pro finskou jadernou elektrárnu Olkiluoto 3 a čínské jaderné elektrárny s tímto typem reaktoru Taishan 1 a 2. Vlastníkem Škody J.S. je ruská skupina OMZ a pravděpodobně se uchází se společností Atomstroyexport o dostavbu nových bloků jaderných elektráren v České republice.

Prakticky jedinou firmou v České republice schopnou dodat potrubní části pro primární okruh, jako jsou potrubí primárního okruhu, trubkové ohyby a tvarovky pro jaderné elektrárny je společnost Modřanská potrubní a.s. Tato společnost rovněž disponuje technologickým zázemím pro výrobu zakázkových tvarovek do hmotnosti cca 12,5 t, čímž je schopná pokrýt výrobu veškerých těchto potrubních částí. V oblasti čerpadlové techniky pro jaderné elektrárny v České republice působí společnost Sigma Group a.s.

Parní generátory a kompenzátor objemu jaderných elektráren Dukovany a Temelín vyrobila společnost Vítkovice (dnes uskupení firem Vítkovice Machinery Group). Jedná se o parní generátory ležaté konstrukce. Tato konstrukce parních generátorů je používána u reaktorů VVER, mezi něž patří i reaktor MIR - 1200 představený v kapitole 6.1.5. Reaktory západní provenience používají parní generátory svislé konstrukce. Divize VMG zabývající se (nejen) jadernou energetikou se dnes nazývá Vítkovice Power Engineering. Společnost se nyní zaměřuje na obnovu svého jaderného programu a spolupracuje s ruskou společností ATOMENERGOMAŠ na výrobě kolektorů pro parní generátory elektráren VVER - 1000 a VVER - 1200. Současně probíhají ověřovací práce na možnostech výroby prstenců parních generátorů a kompenzátorů objemu. Vítkovice Heavy Machinery jsou schopny zpracovávat výkrovky do hmotnosti 123 t a průměru až 6000 mm.

8.2. Sekundární okruh a ostatní zařízení jaderných elektráren

Sekundární okruh nových českých jaderných elektráren může být vystavěn prakticky plně v režii českých firem. Český průmysl je prakticky soběstačný při výstavbách a rekonstrukcích klasických českých tepelných elektráren. Společnost Škoda Power a.s. (dnes součást korejského koncernu Doosan) je schopná vyrábět parní turbíny o v širokém rozsahu výkonů a má zkušenost s výrobou a rekonstrukcí dvou kusů parních turbín o výkonu 1000 MWe pro jadernou elektrárnu Temelín. Tato společnost je rovněž dodavatel parních turbín a kondenzátorů pro rekonstrukci slovenské jaderné elektrárny Mochovce. V současné době probíhají přípravné práce na novém turbosoustrojí o výkonu 1200 MWe pro případnou dostavbu jaderné elektrárny Temelín. Na českém trhu rovněž působí řada firem s rozsáhlými zkušenostmi s výstavbou a výrobou tlakových zařízení klasických parních elektráren, potrubních rozvodů, čerpadlové techniky, měření a regulace a armatur.

Přehled některých firem působících v ČR v oblasti jaderné energetiky		
zařízení primárního okruhu	konstrukční části reaktorů	Škoda J.S. a.s.
	potrubí, tvarovky	Modřanská potrubní a.s.
	armatury	Modřanská potrubní a.s., Arako s.r.o. Armatury Group a.s., IPU s.r.o.
	čerpadlová technika	Sigma Group a.s.
	laboratorní technika, měření	Envinet a.s.
	pomocné systémy, chemické technologie, havarijní systémy	Královopolská RIA a.s.
	parní generátory, kompensátory objemu	Vítkovice Heavy Machinery a.s., Vítkovice Power Engineering a.s.
zařízení sekundárního okruhu	turbíny a jejich příslušenství	Škoda Power a.s.
	kondenzátory, výměníky tepla	Škoda Power a.s., Mico s.r.o., G-MAR
	čerpadlová technika	Sigma Group a.s.
	chemická úprava vody	BKG s.r.o, AQUA s.r.o, Hydrodem s.r.o.
	Armatury	Armatury Group a.s. G-Team a.s., Arako s.r.o., LDM s.r.o.
ostatní	technologie pro manipulaci s RAO	Škoda J.S. a.s., VUCHZ a.s.
	polní instrumentace, elektrické systémy	ZPA industry a.s. I&C energo a.s., Elektro Kroměříž s.r.o.
	MaR	JSP s.r.o., Energo Nova s.r.o., Afras Energo a.s.
	strojírenství pro jadernou energetiku	V-Nass s.r.o., Vítkovice Heavy Machinery a.s. Strojírny Třinec a.s. Žďas a.s., PBS Energo a.s.
	stavební činnost, inženýring	Hochtief CZ a.s., EGPI s.ro.

Tab. 18 Přehled některých firem působících v oblasti jaderné energetiky v ČR

8.3. Lidské zdroje

Jedním ze základních předpokladů výstavby a provozu nových bloků (nejen) jaderných elektráren v České republice je dostatek kvalifikovaných a odborných pracovníků a řemeslníků ve všech oblastech průmyslu zabývajících se jadernou energetikou. Nepříznivě na počty pracovníků v jaderné energetice obecně a jejich stoupající věkový průměr působí zejména celkový demografický vývoj společnosti, neochota a nezájem absolventů středních škol studovat technické obory obecně. Nedostatek kvalifikovaného personálu se týká energetického průmyslu jako celku. Vzhledem k celoevropskému nedostatku kvalifikovaných odborníků může českému energetickému průmyslu rovněž hrozit odliv těchto specialistů do zahraničí.

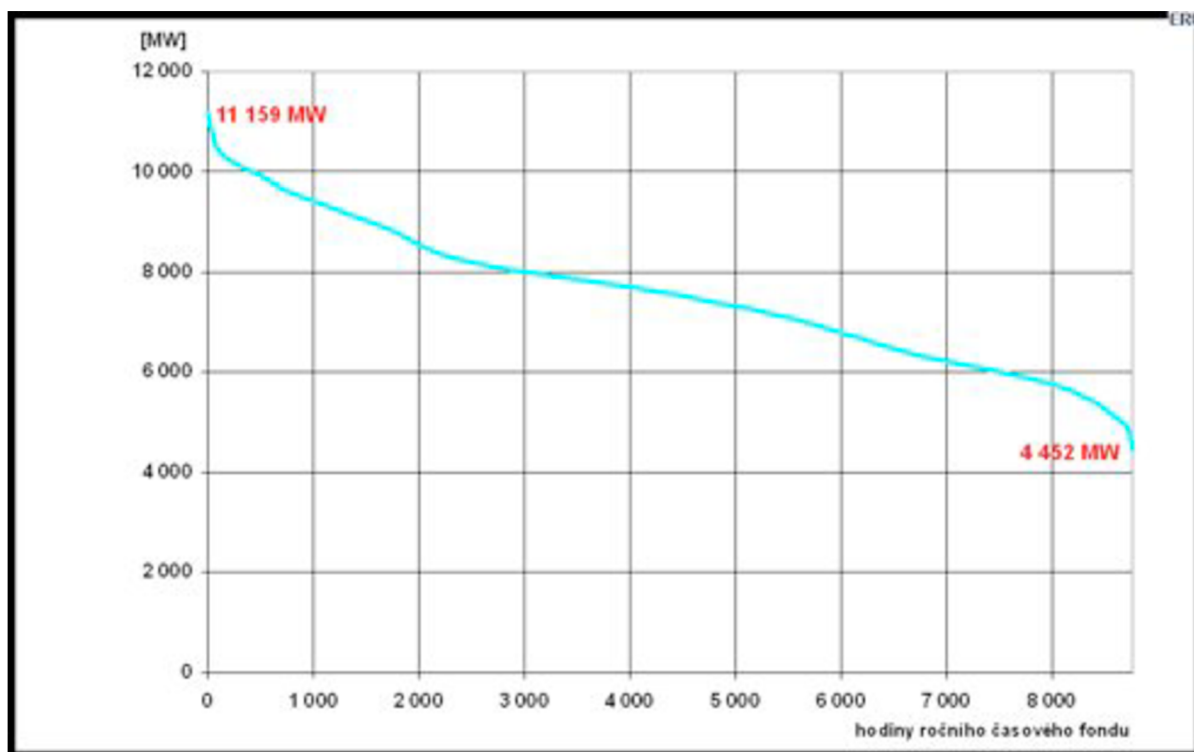
Úlohou školství (středního i vysokého) by měla být příprava a kvalitní vzdělání odborných pracovníků. Prakticky jedinou specializovanou katedru zabývajících se jaderným inženýrstvím nabízí v současnosti pouze Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze. Ostatní české vysoké školy nabízí studium jaderné energetiky vesměs pouze okrajově v rámci energetických ústavů strojních fakult.

Aby si Česká republika udržela samostatnost v oblasti vývoje, konstrukce, výroby a provozu energetických zařízení je nutné současný stav zvrátit a více podporovat a motivovat studium technických oborů ve středním i vysokém školství. Příkladem mohou sloužit i různé podpůrné programy společnosti ČEZ a.s. V případě jaderné energetiky by měla být (v rámci možností jednotlivých strojních fakult) obnovena, nebo zavedena možnost specializovaného studia jaderných energetických zařízení. Dle názoru autora by české vysoké školství rovněž mělo studentům umožnit větší styk s praxí a výuku rozšířit o možnost ověřovat nabyté znalosti na zkušebních zařízeních, nebo formou softwarových simulací.

9. Analýza možnosti výstavby nových jaderných bloků v ČR - pohled autora

9.1. Instalovaný výkon

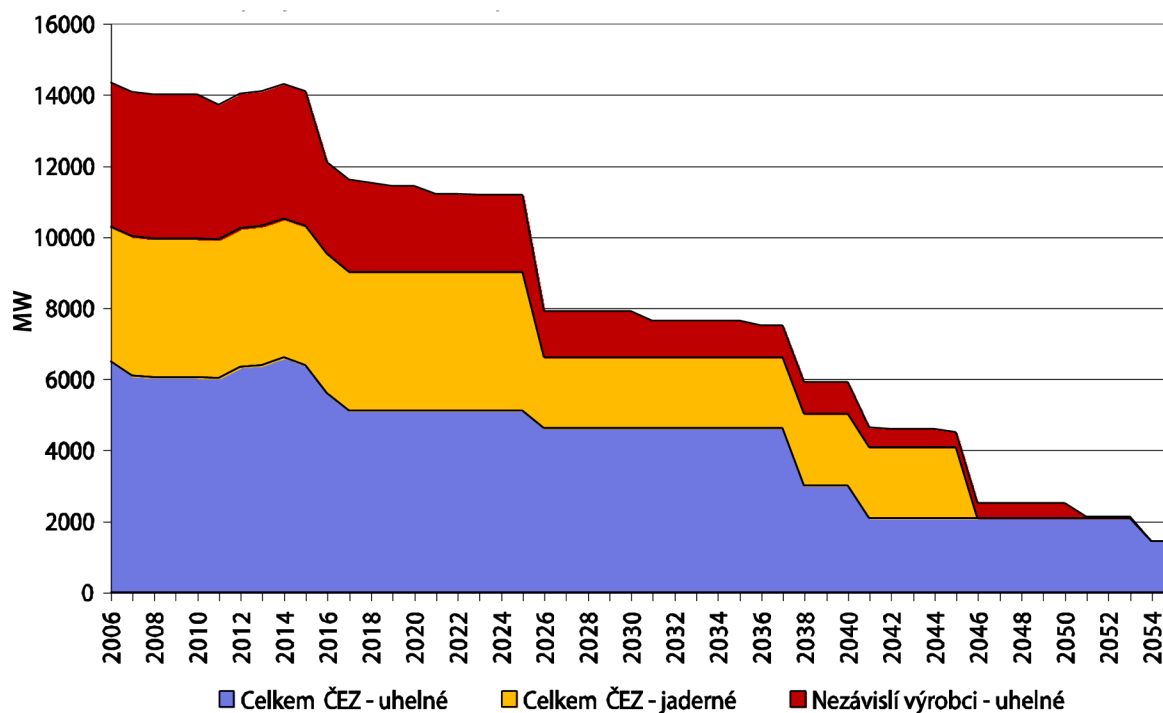
V roce 2009 činilo základní trvalé zatížení v elektrizační soustavě České republiky 4452 MW a spotřebováno tedy bylo v tomto zatížení za rok 2009 přibližně 38,9 TWh elektrické energie. Průběh doby trvání zatížení zobrazuje obr. 17. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4 instalovaný výkon jaderných elektráren v České republice činí 3830 MWe a tyto bloky jsou tedy při jejich uvažované dostupnosti 80% jsou schopny dodat přibližně 26,8 TWh elektrické energie za rok.



Obr. 18 Diagram doby trvání zatížení v ČR za rok 2009 [9]

V případě dostavby jaderné elektrárny Temelín a jejím rozšíření o dva nové bloky o výkonu > 1000 MWe by se jaderná energetika stala majoritním zdrojem elektrické energie v ČR. Navýšením instalovaného výkonu jaderných elektráren o 2×1000 MWe a více by v součtu znamenalo praktický kompletní pokrytí základního zatížení v elektrizační soustavě v ČR (z dnešního pohledu). Nárůst instalovaného výkonu jaderných elektráren by měl být vhodně doplněn modernizovanými hnědouhelnými či paroplynovými bloky tak, aby výpadek některého z jaderných bloků byl dostatečně kompenzován a nebyl ohrožen chod a funkce přenosové soustavy a rovněž byly splněny závazky na regulaci frekvence sítě. Zároveň by navýšení instalovaného výkonu jaderných elektráren umožnilo odstavení některých již nevyhovujících hnědouhelných tepelných elektráren, nebo jejich modernizaci a převedení jejich provozu například do oblastí záloh. Tato opatření by rovněž umožnila snížit spotřebu domácích zásob hnědého uhlí a výrazně omezit emise CO_2 do ovzduší. Vliv nových jaderných bloků na instalovaný výkon v České republice z pohledu autora je zobrazen v tabulce 19.

Vliv dostavby na ETE a EDU na elektrizační soustavu ČR v krátkodobém horizontu		
výkon nových bloků [MWe]	celkový instalovaný výkon jaderných elektráren [MWe / % ČEZ / % ČR]	dodávka elektrické energie do sítě [TWh/rok] při dostupnosti zdroje 90%
současný stav	3830 / 31,1 / 20,9	26,8
současný stav + 2×1000	5830 / 40,8 / 28,7	45,9
současný stav + 2×1200	6230 / 42,4 / 30,1	49,1
současný stav + 2×1600	7030 / 45,4 / 32,7	55,4
současný stav + 3×1000	6830 / 44,6 / 27,8	53,8
současný stav + 3×1200	7430 / 44,6 / 33,9	58,6
současný stav + 3×1600	8630 / 50,5 / 37,3	68

Tab. 19 Vliv dostavby ETE a EDU na elektrizační soustavu ČR³Obr. 19 Předpokládaný vývoj instalovaného výkonu v ČR⁴ [14]

Při porovnání informací ze zdrojů [14], [3] a [22] a při předpokládané spotřebě elektrické energie cca 80 až 100 TWh/rok okolo roku 2030 pravděpodobně dojde k významnému deficitu instalovaného výkonu a pro pokrytí této spotřeby bude zapotřebí

³ Hodnoty v tabulce zahrnují pouze elektrickou energii vyrobenou v jaderných elektrárnách

⁴ Hodnoty uvedené v grafu nepředpokládají prodloužení životnosti stávajících jaderných elektráren

přibližně 9000 až 11500 MWe instalovaného výkonu s dostupností 100%. Ve skutečnosti je tato dostupnost mnohem menší a je nutné počítat s plánovanými (plánované opravy zařízení, nebo rekonstrukce) i neplánovanými (nehody a jiné nepředvídatelné situace) odstávkami, nízkou dostupností některých obnovitelných zdrojů elektrické energie a podobně.

Dle názoru autora lze na základě výše uvedeného doporučit výstavbu tří nových jaderných bloků s instalovaným výkonem (jednoho bloku) cca 1200 MWe (MIR-1200), nebo dvou nových bloků s instalovaným výkonem cca 1600 MWe (EPR). Dále autor doporučuje před ukončením provozu stávajících bloků jaderné elektrárny Dukovany zahájit přípravné práce pro zahájení výstavby adekvátní náhrady v podobě jaderné elektrárny s reaktory IV. generace. Vhodným typem se jeví jaderný reaktor typu SFR, MSR, nebo VHTR. Záležet bude na zvolené energetické koncepci a vývoji palivového cyklu v ČR a EU. Výběr vhodného typu jaderné elektrárny s reaktorem IV. generace bude rovněž záviset na tom, jestli budou tyto reaktory respektive elektrárny určeny pouze k produkci elektrické energie, nebo budou sloužit zároveň jako zdroj tepla pro průmysl (zejména výroba vodíku) a systémy centrálního zásobování teplem velkých měst. Výběr bude rovněž ovlivněn ekonomickými hledisky spojenými s výstavbou a provozem těchto nových jaderných elektráren.

9.2. Volba lokality

Vhodný výběr lokality pro výstavbu nových jaderných bloků je zcela zásadní a je ovlivňován řadou faktorů. Lokalita pro výstavbu jaderné elektrárny musí splňovat několik požadavků:

- geologická stabilita podloží a minimální seismická aktivita (mapa seismických oblastí ČR je vyobrazena na obrázku 20) Seismická aktivita oblastí je důležitá zejména z pohledu konstrukce a integrity kontejnmentu
- dostupnost a vhodná infrastruktura pro dopravu komponent a zařízení elektrárny
- infrastruktura pro zásobování jaderným palivem a případný transport použitého jaderného paliva
- dostupnost vhodného zdroje vody z hlediska kvality a množství (tato podmínka může nepříznivě ovlivnit rozhodnutí o případné výstavbě nového bloku jaderné elektrárny Dukovany
- umístění s minimálním vlivem na obyvatelstvo (tedy nízká hustota osídlení dané oblasti) v případě nehody a úniku ionizujícího záření a produktů štěpení do okolí
- Dostatečné dimenzování přenosové soustavy v dané lokalitě vzhledem k vyvedení výkonu v řádu tisíců MWe

Výběr vhodné lokality je značně omezen rovněž přístupem obyvatelstva. Je velice nepravděpodobné, že by bylo možné v České republice stavět v blízké době jadernou elektrárnu „na zelené louce“. Taková výstavba by se potýkala z řadou komplikací jak ze strany ekologických organizací, tak ze strany obyvatelstva dané oblasti. Ekonomické náklady by rovněž byly značně vysoké vzhledem k nutnosti vybudovat potřebnou infrastrukturu pro stavbu a provoz jaderné elektrárny. Z výše uvedených důvodů lze dle názoru autora pro výstavbu nových jaderných bloků v České republice s výhodou využít a doporučit pouze stávající areály jaderných elektráren Dukovany a Temelín.



Obr. 20 Mapa seismických oblastí ČR [23]

9.3. Přenosová soustava ČR

Budování nových zdrojů (nejen jaderných) elektrické energie je nutno provádět a plánovat i s ohledem na stav přenosové soustavy a zajištění stabilních dodávek elektrické energie. Přenosovou soustavu v České republice provozuje společnost ČEPS a.s. a její struktura je zobrazena v tabulce 20. ČEPS a.s. rovněž zajišťuje na území ČR (kromě provozu, údržby a řízení soustavy) technické řízení systémových služeb (regulace výkonu a frekvence, regulace napětí a řízení výkonových rezerv).

Česká přenosová soustava není uzavřeným systémem, ale je napojena na sítě sousedních států a je součástí UCPTE (Unie pro koordinaci přenosu elektřiny v Evropě), dnes součástí uskupení ENTSO-E. Z toho důvodu je nutno volit výstavbu a volbu nových zdrojů tak, aby nemohlo dojít ke kolapsu přenosové soustavy například neschopností regulace při výpadku některých zdrojů, nebo naopak vlivem náhlého přebytku elektrického výkonu v síti. Elektrizační soustava a tedy i skladba zdrojů elektrické energie musí být schopna regulace, tak aby nedocházelo k odchýlkám ve frekvenci sítě větších než jsou přípustné meze ($50 \text{ Hz} \pm 0,01 \text{ Hz}$) a zároveň musí zabezpečit smluvně stanovenou dodávku elektrického výkonu odběratelům.

Struktura přenosové soustavy ČR (ČEPS a.s.)		
druh	napětí	počet / délka
rozvodná zařízení	420 a 245 kV	38
rozvodná zařízení	123 kV	2
rozvodny	420 a 245 kV	30
transformovny	-	30
vedení	400 kV	2900 km
vedení	220 kV	1440 km
vedení	110 kV	105 km

Tab. 20 Struktura PS ČR [24]

V současné době plánované a připravované rozšiřování přenosové soustavy ČR pro roky 2010 až 2016 zahrnuje rekonstrukci a rozšíření rozvodny Kočín (420 kV), která slouží k vyvedení výkonu jaderné elektrárny Temelín. Rozvodna Kočín byla rovněž projektována s ohledem na instalovaný výkon 4×1000 MWe podle původního projektu jaderné elektrárny Temelín. Ačkoliv není o výstavbě nových jaderných bloků v České republice rozhodnuto, je dle názoru autora nutné s touto možností počítat a plánovat rozšiřování přenosové soustavy tak, aby přenosová soustava byla připravena na připojení těchto nových bloků.

9.4. Veřejné mínění a společenská přijatelnost

Velmi významným vlivem pro další rozvoj jaderné energetiky nejen v České republice, ale i ve světě obecně je veřejné mínění o tomto odvětví energetického průmyslu.

Na stagnaci jaderného energetického průmyslu a rostoucí odpor veřejnosti, ekologických organizací i některých politických stran na konci 20. století měly svůj vliv významné havárie v jaderných elektrárnách Three Mile Island⁵ a zejména v jaderné elektrárně Černobyl⁶. Na území bývalého Československa svou roli v tomto ohledu jistě sehrála havárie v jaderné elektrárně Jaslovské Bohunice⁷. Důsledkem těchto událostí byl postupný útlum ve výstavbě nových jaderných zdrojů a postupné ukončování jaderného programu v některých státech

⁵ Havárie se stala v roce 1979 v USA na bloku č. 2 JE Three Mile Island a je hodnocena stupněm 5 (Accident with off-site risk - havárie s rizikem vlivu na okolí) na stupnici INES

⁶ Havárie se stala v roce 1986 na Ukrajině na bloku č. IV JE Černobyl a je hodnocena stupněm 7 (Major accident - nejtěžší možná havárie) na stupnici INES

⁷ Havárie se stala v roce 1977 na Slovensku v JE A1 v Jaslovských Bohunicích a je hodnocena stupněm 4 (Accident without off-site risk - havárie bez vážnějšího vlivu na okolí) na stupnici INES

Důvěra široké veřejnosti v jadernou energetiku musí být ze strany provozovatele (soukromého, nebo státního) budována a udržována zejména naprostou otevřeností, diskuzí se všemi zaujatými stranami, vzděláváním (informovaností)- veřejnosti a prezentací faktických informací o provozu, vzniklých událostech a jejich řešení.

Ačkoli politické uspořádání České republiky po volbách v roce 2006 jakoukoliv výstavbu nových bloků jaderných elektráren vylučuje, je veřejné mínění občanů České republiky jaderné energetice převážně pozitivně nakloněno. Podle průzkumu eurobarometr [15] z února roku 2008 je tomuto způsobu získávání energie pozitivně nakloněno až 64% dotázaných respondentů. Jedná se tak o nejvyšší podporu jaderné energetiky v rámci celé Evropské Unie.

10. Závěr

Diplomová práce se zabývá analýzou možností užití jaderných reaktorů III a IV. generace v České republice. Cílem práce je zhodnotit současný stav jaderné energetiky v České republice a doporučení, nebo doporučení konkrétních typů jaderných elektráren v krátkodobém a střednědobém horizontu.

Jaderná energetika má v České republice bezpochyby své místo. Za dobu svého provozu jaderné elektrárny Temelín a Dukovany prokázaly, že jsou spolehlivým a levným zdrojem elektrické energie. Rovněž český průmysl a věda v nedávné minulosti prokázaly schopnost vyrábět a podílet se na vývoji jaderných energetických zařízení.

Výběr budoucích typů jaderných reaktorů respektive elektráren by měl vzhledem k finančnímu objemu plánovaných zakázek probíhat transparentně. Dodavatelé musí u svých projektů splnit veškeré požadavky na technickou a jadernou bezpečnost a tyto požadavky musí být bezpodmínečně plněny v celé fázi výstavby od projektu po uvedení do provozu. Posuzována by rovněž měla být i míra spoluúčasti českých firem na výstavbě. Objektivně nelze žádnou z představených koncepcí předem zavrhnout. Každá z koncepcí jaderných elektráren III. generace prošla jistým vývojem zohledňujícím stav a požadavky na jadernou energetiku země, která se na vývoji podílela. Jaderné elektrárny s reaktory IV. generace přinášejí značné inovace jak v konstrukci, tak v použitých materiálech. Vývoj však stále pokračuje a konkrétní zhodnocení jednotlivých typů dle názoru autora není možné.

11. Seznam použitých zdrojů

- [1] IAEA 2008, 'International status of prospect of nuclear power', *www.iaea.org*, no. 09-00891, prosinec, pdf, cit. leden 2010, dostupné z <<https://www.iaea.org/books>>.
- [2] WNA 2009, *Advanced Nuclear Power Reactors*, online, cit. leden 2010, dostupné z <<http://www.world-nuclear.org/info/inf08.html>>
- [3] MPO ČR 2009, 'Aktualizace státní energetické koncepce České republiky', *www.mpo.cz*, říjen 2009, pdf, cit. leden 2010, dostupné z <www.mpo.cz>.
- [4] Mišák J 2010, 'Evolution of safety assessments approaches for Gen III systems and implications for future systems', *www.ujv.cz*, pdf, cit. březen 2010, dostupné z <<http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/INPRO/Files/2010-Feb-DF-WS/22-Misak.pdf>>.
- [5] Fennern, L.E. 2006, 'ESBWR core and neutronics', *www.nuclear.gov*, pdf, cit. duben 2010, dostupné z <<http://www.nuclear.gov/np2010/pdfs/esbwrReactorCoreNeutronics.pdf>>.
- [6] Susumu Ueda, Kiyoshi Nmabu, Weiss E.H. 1999, 'Design Features of APWR in Japan', *www.iasmirt.org*, pdf, cit. duben 2010, dostupné z <<http://www.iasmirt.org/SMiRT15/S01-3>>.
- [7] Cummins W.E., Corletti, M.M, Schulz, T.L. 2003, 'Westinghouse AP1000 Advanced Passive Plant', paper presented at Proceedings of ICAPP '03, Cordoba, Spain, květen 4-7, 2003, *Cordoba, Spain*. Westinghouse Electric Company, LLC, s. 10.
- [8] Meneely T. 2009, 'AP1000 design overview', *www.westinghousenuclear.com*, pdf, cit. leden 2010, dostupné z <www.atomeromu.hu/download/1676/AP%201000%20reaktor.pdf>.
- [9] ERÚ 2009, *Měsíční zprávy 2009*, online, cit. březen 2009, dostupné z <http://www.eru.cz/user_data/files/statistika_elektro/mesicni_zpravy/2009/prosinec/obsah.htm>.
- [10] Harms A. A. a kolektiv, 2000, *Principles of nuclear fission*, pdf, cit. březen 2010, dostupné z <<http://www.worldscibooks.com/physics/4447.html>>.
- [11] AREVA, 'UK-EPR Fundamental safety overview', <http://www.epr-reactor.co.uk>, vol. 2 - Design and safety, pdf, cit. duben 2010. dostupné z <<http://www.epr-reactor.co.uk>>
- [12] Asmolov, V.G. 2009, 'Development of NPP designs based on the VVER technology', Paříž, Zář 2009, *Paříž*, Rosatom .s. 24.
- [13] Altshuller, A 2007, *NPP - 2006 with reactor VVER-1200/491*, PDF, cit. duben 2010, dostupné z <http://www.reak.bme.hu/MTAEB/files/konferencia_20070308/tpresent/Atomstroyexport_03_SPbAEP_NPP-2006.pdf>.
-

- [14]. Pačes, V. a kolektiv 2008, 'Zpráva Nezávislé odborné komise pro posouzení energetických potřeb České republiky v dlouhodobém časovém horizontu', Verze k oponentuře, 30.9.2008, pdf, cit. duben 2010, dostupné z <www.vlada.cz>.
- [15] EUROBAROMETER 2008, *Attitudes towards radioactive waste*, pdf, cit. květen 2010, dostupné z <http://ec.europa.eu/public_opinion/archives/ebs/ebs_297_en.pdf>.
- [16] Matal, O. 2001, *Jaderné reaktory a jejich chlazení*, VUT v Brně, CERM s.r.o., Brno, s. 117, ISBN - 80-214-2028-6
- [17] www.gepower.com
- [18] www.westinghousenuclear.com
- [19] www.areva.com
- [20] www.nei.org
- [21] www.wikipedia.org
- [22] www.cez.cz
- [23] ČSN EN 1998-1:2006, Eurokód 1 - část 8. Praha :ČNI, 2006. s. 170
- [24] www.ceps.cz
- [25] www.nuclearinfo.net
- [26] www.mpo.cz
- [27] www.surao.cz
- [28] British Nuclear Fuels Limited 2004, 'Manufacturing Nuclear Fuel', www.bnfl.com, pdf, cit. duben 2010, dostupné z <http://www.bnfl.com/UserFiles/File/150_1.pdf>.
- [29] www.sujb.cz
- [30] www.world-nuclear.org
- [31] www.mnes-us.com
- [32] www.csvts.cz/cns/news/041214t.htm
- [33] IAEA, 'Thorium fuel cycle - Potential benefits and challenges', www.iaea.org, IAEA-TECDOC-1450, květen 2005, pdf, cit. leden 2010, dostupné z <<https://www.iaea.org/books>>.

[34] Schneider, M a kolektiv 2009, 'The World Nuclear Industry Status Report 2009', *www.bmu.de*, srpen 2009, pdf, cit. duben 2010, dostupné z http://www.bmu.de/files/english/pdf/application/pdf/welt_statusbericht_atomindustrie_0908_en_bf.pdf.

[35] GIF 2002, 'A Technology Roadmap for generation IV Nuclear Energy Systems', <http://www.gen-4.org/>, no. GIF-002-00, prosinec, pdf, cit. leden 2010, dostupné z <http://www.gen-4.org/Technology/roadmap.htm>

[36] www.gen-4.org/Technology/systems/

12. Seznam použitých zkratek a symbolů

AGR	Advanced Gas - Cooled Reactor - pokročilý plynem chlazený reaktor
ABWR	Advanced Boiling Water Reactor - pokročilý varný reaktor
BWR	Boiling Water Reactor - varný reaktor
CANDU	Canada Deuterium - Uranium reactor - těžkou vodou chlazený a moderovaný reaktor
CDF	core damage frequency - frekvence poškození aktivní zóny
EPR	European Pressurized Reactor - evropský tlakovodní reaktor
ENTSO-E	european network of transmission system operators for electricity - evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektrické energie
ESBWR	Economic Simplified Boiling Water Reactor - zjednodušený varný reaktor
GCR	Gas - Cooled Reactor - plynem chlazený reaktor
GFR	Gas - Cooled Fast Reactor - plynem chlazený rychlý reaktor
INES	international nuclear and radiological event scale - mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí
LFR	Lead - Cooled Fast Reactor - olovem chlazený rychlý reaktor
LOCA	loss of coolant accident - událost se ztrátou chladiva
LWR	Light Water Reactor - lehkou vodou chlazený a moderovaný reaktor
LWGR	Light Water Graphite Moderated Reactor - lehkou vodou chlazený, grafitem moderovaný, varný reaktor
MOX	mixed oxide fuel - směsné oxidické palivo
MSR	Molten Salt Reactor - reaktor chlazený roztavenými solemi
NT	nizkotlaký díl turbíny
OZE	obnovitelné zdroje energie
PBMR	Pebble Bed Modular Reactor - modulární reaktor s kuličkovým, keramickým palivem
PWR	Pressurized Water Reactor - tlakovodní reaktor
PHWR	Pressurized Heavy Water Reactor - těžkou vodou chlazený a moderovaný reaktor
PS	přenosová soustava
SCWR	Supercritical Water - Cooled Reactor - reaktor chlazený vodou s nadkritickými parametry
SFR	Sodium - Cooled Fast Reactor - sodíkem chlazený rychlý reaktor
ST	středotlaký díl turbíny
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
VHTR	Very High Temperature Reactor - reaktor pracující za velmi vysokých teplot
VVER	lehkou vodou chlazený a moderovaný energetický reaktor
VT	vysokotlaký díl turbíny

13. Seznam použitých veličin

Veličina	Značka	jednotka
čas	t	[s]
délka	l	[m]
energie	E	[eV], [J]
frekvence	f	[Hz]
hmotnost	m	[kg]
měrný objem	v	[m ³ /kg]
otáčky	o	[min ⁻¹]
průtok hmotnostní	M	[kg/s]
průtok objemový	Q	[m ³ /s]
rychlost	v	[m/s]
teplota	t, T	[°C], [°K]
tlak	p	[Pa]
výkon	P	[W]
zrychlení gravitační	g	[m/s ²]