

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Dostavba JE Temelín

Originál (kopie) zadání BP

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá dostavbou jaderné elektrárny Temelín. Popisuje specifika skupin zdrojů elektrické energie a jejich výhod a nevýhod obecně a následně i v aplikaci pro prostředí ČR. Práce dále rozebírá možnosti výstavby nových jaderných zdrojů v ČR a proběhlé výběrové řízení na dostavbu JE Temelín. V další části se zabývá reaktory III a III+ generace a jejich bezpečnosti. V poslední části se práce věnuje popisu jednotlivých typů jaderných reaktorů uvažovaných při dostavbě a popisuje některá bezpečnostní specifika jejich řešení.

Klíčová slova

Jaderná energetika, JE Temelín, energetická koncepce, reaktor, dostavba, bezpečnost, III a III+ generace, VVER-1200, AP1000, EPR, Westinghouse, Areva, MIR.1200

Abstract

The present bachelor's thesis deals with the completion of the nuclear power plant Temelín. It describes the specifics of the groups power sources and their advantages and disadvantages in general and, consequently, the application of the Czech Republic. The thesis also discusses the possibility of building new nuclear power plants in the Czech Republic and a tender was held for the completion of the Temelin. The next section deals with the reactors III and III + generation and their safety. The last part deals with the description of individual types of nuclear reactors considered in the completion and describes some of the specifics of their security solutions.

Key words

Nuclear energy, nuclear power plant Temelín, conception of energy, reactor, completion of nuclear power plant Temelín, safety, III a III+ generation, VVER - 1200, AP1000, EPR, Westinghouse, Areva, Mir.1200

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2014

Matouš Kolský

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Emilu Dvorskému CSc. Za to, že se mne ujal s vedením bakalářské práce a také za milý a vstřícný přístup.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
1 DŮVODY DOSTAVBY 3. A 4. BLOKU JE TEMELÍN	9
1.1 ZÁKLADNÍ DŮVOD	9
1.2 SPECIFIKA JEDNOTLIVÝCH ZDROJŮ	9
1.2.1 Voda	10
1.2.2 Uhlí	10
1.2.3 Plyn	10
1.2.4 Obnovitelné zdroje	11
1.2.5 Jádro	13
1.3 ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE V ČR	14
1.3.1 Aktuálně	14
1.3.2 Výhledově	14
1.3.3 Doporučení nezávislé energetické komise	16
1.4 BUDOUCNOST ČR?	17
1.5 NOVÉ JADERNÉ ZDROJE	17
1.5.1 Dostavba JE Temelín	18
1.5.2 Výstavba dalšího bloku JE Dukovany	19
1.5.3 Výstavba další jaderné elektrárny	19
1.5.4 Výhodnost variant	19
1.6 VÝBĚROVÉ ŘÍZENÍ NA DOSTAVBU JE TEMELÍN 2009-2014	20
1.6.1 základní přehled událostí	20
2 BEZPEČNOST REAKTORŮ TZV. III A III+ GENERACE	22
2.1 HISTORICKÉ ROZDĚLENÍ REAKTORŮ	22
2.2 BEZPEČNOST JADERNÝCH REAKTORŮ	24
2.2.1 Vybrané bezpečnostní problémy	24
2.2.2 Hodnocení bezpečnosti	25
2.3 BEZPEČNOST REAKTORŮ III. A III.+ GENERACE	25
3 UVAŽOVANÉ DRUHY JADERNÝCH REAKTORŮ PRO DOSTAVBU JE TEMELÍN	26
3.1 JE TEMELÍN NYNÍ	26
3.1.1 Historie	27
3.1.2 Reaktory PWR (VVER)	28
3.2 MOŽNÍ DODAVATELÉ NOVÝCH BLOKŮ	29
3.2.1 Westinghouse	29
3.2.2 MIR.1200	29
3.2.3 Areva	30
3.3 STÁVAJÍCÍ A NAVRHOVANÉ REAKTORY	30
3.3.1 JETE1,2 - VVER-1000	30
3.3.2 Westinghouse - AP1000	32
3.3.3 MIR.1200 - VVER-1200 (AES-2006)	38
3.3.4 Areva - EPR	43
3.4 SROVNÁNÍ	46
4 ZÁVĚR	49
5 SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	50

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na dostavbu JE Temelín

V první části se práce zabývá možnostmi výroby elektrické energie, použitými zdroji, jejich jednotlivými výhodami a nevýhodami. Dále uvádí jak je to nyní v ČR a zvažuje vhodnost a výhodnost jednotlivých zdrojů pro budoucí využívání včetně vlivu trhu a energetik okolních států. Následně práce uvádí i doporučení nezávislé energetické komise II. V tomto bodě práce hodnotí vhodnost jaderných zdrojů pro ČR. Ke konci této části práce uvádí jaké jsou možnosti výstavby nových jaderných zdrojů a hodnotí která možnost je nejvhodnější. Dále popisuje proběhlé výběrové řízení na dostavbu JE Temelín.

Ve druhé části se práce zabývá generačním vývojem elektrárenských jaderných reaktorů. Specifikuje vybrané otázky z bezpečnosti a z technologií řešení havarijních situací. Na závěr hodnotí bezpečnost III. a III.+ generace jaderných reaktorů a přínos havárií jaderných elektráren k jejich bezpečnosti.

Začátek třetí část práce se zaměřuje na popis JE Temelín a její historie. Také uvádí možné dodavatele nových bloků. Pro stávající jaderné reaktory JE Temelín a typy reaktorů uvažované pro dostavbu popisuje způsoby řešení vybraných otázek z bezpečnosti specifikovaných v předchozí části. Následně je v těchto otázkách porovnává.

1 Důvody dostavby 3. a 4. bloku JE Temelín

1.1 Základní důvod

Jedním ze základních stavebních kamenů moderní civilizace je energie v rozličných formách. Od stabilních dodávek elektrické energie se odvíjí životní úroveň společnosti, ale i konkurenceschopnost ekonomiky, stabilita a sociální úroveň společnosti. To vše samozřejmě za předpokladu, že je dodávka energie nepřerušovaná a zároveň bezpečná, šetrná k životnímu prostředí a za rozumné náklady.

Prvotní důvod proč vůbec uvažovat o dostavbě Jaderné elektrárny Temelín vyplývá už ze základních povinností státní energetiky, takovou dodávku elektrické energie zaručit v současnosti i do budoucna. Jak toho dosáhnout říká státní energetická koncepce, která specifikuje zdroje energie a požadavky na ně a jejich zastoupení v tzv. energetickém mixu. Zároveň ale by energetická koncepce měla brát v úvahu i současný stav a místní podmínky. Aby byla zaručena stálá a stabilní dodávka elektrické energie, měla by být spíše konzervativní a odrážet technologické možnosti především ale ponechávat si možnost využití nových technologií. Nikoliv však podléhat politickému tlaku lobbistických a ideologických skupin, což může vést k ohrožení energetické bezpečnosti a deformací na trhu s elektřinou, jak jsme toho v současné době svědky. [9] [4]

1.2 Specifika jednotlivých zdrojů

Základním faktem, který je třeba mít neustále na paměti je skutečnost, že elektrickou energii nelze efektivně a v dostatečném množství skladovat. Tedy aktuální spotřeba – poptávka musí být kryta i aktuální výrobou – nabídkou. Na nové technologie, umožňující elektřinu ve velkém množství skladovat, svět teprve čeká a nelze předpokládat, že se v dohledné době dočká. [2]

1.2.1 Voda

Jedinou reálně používanou výjimkou jsou přečerpávací a akumulární vodní elektrárny, jež svým založením patří mezi bezemisní obnovitelné zdroje. Ty jsou ale vázány na vodní toky a zásah do krajiny je tak masivní, že nelze v budoucnu počítat s výstavbou nových (možná s výjimkou Číny). Nicméně tyto elektrárny se svou možností regulace a najetí plného výkonu v řádech sekund, hrají prim v oblasti regulace rozvodné soustavy a ke krytí špičkové spotřeby. [2]

1.2.2 Uhlí

Uhelné elektrárny dnes mají sice nižší provozní náklady, slušné možnosti regulace a relativně slušné investiční náklady a dobrou dobu výstavby vzhledem k velkému instalovanému výkonu. Jejich nevýhody ale nakonec převažují. Největší nevýhodou je emisní charakter těchto zdrojů. I přes zavádění filtrace zplodin, která také snižuje účinnost a vyžaduje další investice, se jedná o zdroje s největšími emisemi skleníkových plynů a jiných zplodin, takže je spíše snaha od nich ustupovat. Dalšími nevýhodami je nutnost zásobování velkým množstvím uhlí, které se musí těžit a není ho nekonečné množství. Případně nakupovat a dovážet, což zas rapidně zvedá náklady. [2] [3]

1.2.3 Plyn

Plynové, paroplynové a podobné, na spalování plynu založené, elektrárny jsou na tom s emisemi skleníkových plynů lépe a vynikají dobrou účinností přeměny energií. Také jejich výstavba je relativně investičně levná a rychlá. Bohužel v současné době je cena plynu dost vysoká, takže výroba elektřiny touto cestou je jedna z nejdražších. Boom těžby břidličného plynu se v Evropě nekoná. Dovoz plynu pak vytváří ekonomickou závislost na jiných státech. Vzhledem k tomu, že hojně využívaný plyn z Ruska vede plynovodem přes Ukrajinu a vzhledem k momentálnímu napětí mezi oběma státy, kdy není jasno jak se situace v příštích měsících a letech bude vyvíjet, nelze čekat pokles cen plynu. [2] [9]

1.2.4 Obnovitelné zdroje

Obnovitelné zdroje energie (dále OZE) jsou, jak už říká název, obnovitelné, tedy nevyčerpatelným zdrojem energie. Jde především o využití energie získanou z vody, větru, slunce a z tzv. biomasy. Tyto zdroje mají základní nevýhody v omezeném rozsahu svojí působnosti. Jsou vázány na přírodní podmínky polohou či dobou kdy vyrábí elektřinu. Ekonomicky jsou obnovitelné zdroje nekonkurenceschopné a jejich provoz je držen vysokými dotacemi garantovaných výkupních cen, které v konečném důsledku platí spotřebitel. [3]

Voda

Při využití energie vody jde především o průtočné, akumulční a přečerpávací elektrárny (viz výše). Využívají se od počátků energetiky a budování nových je prakticky nereálné.

Vítr

Větrné elektrárny využívají energie větru k výrobě elektrické energie. Samotná větrná elektrárna je poměrně malá, finančně a časově nenáročná, stavba. Výkon se pohybuje v řádech jednotek MW. Takže k pokrývání významného procenta spotřeby musí jít počet těchto elektráren do tisíců. Tím se poměr rozměrů větrných farem a investiční náročnosti výstavby v poměru k instalovanému výkonu značně zhoršuje. Větrná elektrárna vyrábí elektřinu pouze, když fouká vítr a to ještě podle toho jak fouká (nesmí ani moc ani málo). Proto je samozřejmě je víc než vhodné až nutné je stavět v místech s dobrými větrnými podmínkami, jinak jejich využití ještě klesá. Pro hrají nulové náklady na palivo, nízké na provoz a žádné emise, tedy vysoká ekologie. I když z pohledu ekologie by se dala vést diskuze o tom, jestli pohled na větrnou farmu o několika desítkách až stovkách větrníků není přílišné narušení krajinného rázu. [2]



Obr. 1 Farma VE Kryštofovy Hamry, 21 turbín, 42MW [18]

Slunce

Fotovoltaická elektrárna je vlastně masivní nasazení fotodiod, prvku, který vyrábí z přímého slunečního záření elektrinu. Účinnost solárních panelů je bídná, proto je nutné jich dávat velké množství, což značně zvětšuje zábor půdy nutný získání větších výkonů. Podobně jako větrné elektrárny jsou závislé na větru, tak fotovoltaické elektrárny vyrábí v závislosti na osvětlení a je dobré je budovat v regionech s vyšší dobou využitelnosti slunečního svitu, což se v praxi neděje až tak často. A stejně jako u větrných elektráren jsou výhody v nulových nákladech na palivo, nízkých na provoz a nulových provozních emisích. Byť vezme-li se v úvahu celý životní cyklus solárního panelu od výroby po likvidaci a zábor půdy, na které elektrárny stojí, je ekologie diskutabilní. [2]



Obr.2 FVE Ralsko Ra1, 38,3 MW [19]

Biomasa a ostatní

Využití biomasy je zajímavé, ale nelze jí vyčlenit příliš ze zemědělské produkce, tedy nelze jí využít natolik, aby něco změnila.

Další obnovitelné zdroje jsou příliš specifické a jejich použití je obvykle vázáno na přírodní podmínky. Např. geotermální zdroje, nebo přímořské vodní elektrárny využívající slapových sil.

1.2.5 Jádru

Jaderné elektrárny jsou zdroje, které vyrábí elektřinu levně, vzhledem k vysokému výkonu. Jejich nevýhodou je velká investiční náročnost a dlouhá doba příprav a samotné výstavby. Mají vysoké nároky na bezpečnost provozu a znalostní potenciál obsluhy. Výroba elektřiny jadernými elektrárnami je stabilní s nízkou možností regulace (regulace je pomalá a hlavně neekonomická), hodí se naprosto pro trvalé pokrývání základního zatížení. Jaderné palivo je sice nutno dovážet, lze ho však poměrně jednoduše skladovat i v množství umožňující dlouhodobý provoz (paliva se obvykle mění 1/3 po ročních až 1,5 ročních kampaních). Světoví producenti uranu ve světě jsou obvykle stabilní demokratické státy např. Kanada a Austrálie a taktéž výroba paliva probíhá v rozvinutých zemích. Cena paliva je dlouhodobě stabilní. Ekonomická závislost vzhledem k celosvětovému konkurenčnímu prostředí tedy nevzniká. Provozem jaderných elektráren nevznikají žádné emise skleníkových plynů, jsou tak ekologičtější než většina elektráren. Názory veřejného mínění na jaderné elektrárny se země od země různí. Bohužel používání radioaktivních látek vede v laické veřejnosti k obavám z havárie a tohoto strachu odpůrci jádra a různé lobbystické skupiny rádi záměrně zneužívají. V jaderné energetice civilizovaných zemí jsou kladeny vysoké nároky na bezpečnost provozu a probíhá vzájemná výměna zkušeností jako v žádném jiném průmyslovém odvětví, z každého incidentu jsou vyvozeny důsledky a návrhy opatření. Obecně v zemích, které již nějaké jaderné elektrárny provozují, je jejich podpora veřejnosti vyšší. [2] [9] [3] [4]

1.3 Zdroje elektrické energie V ČR

1.3.1 Aktuálně

Česká republika má poměrně pestré zastoupení zdrojů ve výrobě elektřiny co se týče výčtu různých typů, které se na výrobě podílejí. Co se týče jejich procentuálního zastoupení, to již tak pestré není. Zhruba poloviční zastoupení má výroba v uhelných elektrárnách spalováním především hnědého a v menší míře černého uhlí. Druhou významnou část tvoří cca třetinové zastoupení výroby v jaderných elektrárnách. Dále se na výrobě podílí vodní elektrárny, sloužící hlavně jako regulační prvek k pokrývání špičkových zatížení. Velmi okrajově pak výroba elektřiny v různých typech plynových elektráren a dále také elektřina z OZE.

Stávající energetická koncepce (2004, aktualizace 2012) i její aktuální návrh (aktualizace 2013) stejně tak jako energetická politika EU bere jadernou energetiku jako jeden ze svých pilířů a důležitou součást energetické bezpečnosti. Další ze součástí je přebytečný charakter elektroenergetiky. Ten zajišťuje odolnost elektrické sítě vůči rozsáhlým poruchám na straně zdrojů a případný krátkodobý chod v ostrovním režimu v případě výrazných poruch evropské elektrické sítě. [2] [9] [4]

V tuto chvíli má Česká republika dostatek zdrojů a i dostatečně kvalitní elektrickou síť. Avšak obojí stárne a do budoucna bude potřeba staré zdroje nahrazovat novými. A výstavba nových či prodloužení životnosti starých si vyžádá významné investice. Stejně tak do elektrické sítě je třeba průběžně investovat. [9]

1.3.2 Výhledově

Dlouhodobě dochází nejen v ČR, ale na celém světě k nárůstu spotřeby energií včetně elektrické energie. I přes drobné výkyvy ve spotřebě, které jsou způsobeny vývojem světových ekonomik, je tento trend poměrně jasným ukazatelem budoucího vývoje spotřeby. Případný krátkodobý pokles spotřeby samozřejmě vyloučit nelze, ale pouze na základě nějakých dramatických změn, které nelze predikovat.

Odstávka dosluhujících starých zdrojů či přírůstek spotřeby elektrické energie bude potřeba krýt a je několik cest jak. [9]

Uhlí

Prodlužování životnosti starých uhelných elektráren, nebo výstavba nových není dlouhodobě dobré řešení v souvislosti se ztenčujícími zásobami hnědého uhlí. Příliš nepomůže ani prolomení limitů těžby. A z ekologického hlediska, kvůli vysokým emisím skleníkových plynů. V rámci EU se hovoří i o změnách v systému regulace emisí CO₂, takže provoz uhelných elektráren nemusí být ekonomicky stabilní. [9]

Plyn

Využití zemního plynu brání jeho cena. Palivové náklady jsou u plynu v současnosti vyšší, než u ostatních zdrojů. Do budoucna se to příliš nezmění.

OZE

Výraznému využití obnovitelných zdrojů brání zatím jejich vyšší cena, kdy bez dotací jsou OZE naprosto neekonomické, a v ČR také geografické podmínky. Obnovitelné zdroje je třeba zálohovat i jinými zdroji pro případy, kdy nebudou vhodné podmínky, aby byla zajištěna spolehlivá dodávka elektrické energie. Navíc v době kdy obnovitelné zdroje vyrábí, bývá na trhu přebytek elektřiny z obnovitelných zdrojů jiných států (především z Německa) za nízkou a někdy až zápornou cenu. I tak mají obnovitelné zdroje svoje místo v decentralizovaných aplikacích pro pokrytí samospotřeby či pro speciální aplikace, nebo např. kogenerační výrobu elektřiny a tepla. [2] [4]

Jádro

Jaderná energetika je pro svoje klady vhodným řešením. Svoji spolehlivostí a předvídatelným provozem se hodí k pokrývání základního zatížení. Je to skvělá náhrada dosluhujících velkých uhelných bloků, pro svoji minimální produkci emisí, dlouhou životnost a velký jednotkový výkon. Nevýhody jsou především technologická náročnost výstavby a provozu, včetně palivového cyklu. Náročnost na vzdělanostní potenciál obsluhy. A hlavně náročnost na investice. Tedy celková ekonomická náročnost. [2]

Trh

Nepopíratelný vliv na energetiku ČR má i trh a energetiky okolních států. Především dominující Německo se svoji energetickou koncepcí, označovanou jako Energiewende, spolu s dotační politikou států EU má zásadní vliv na ceny elektřiny na burze. Ta v současnosti nemá se reálným tržními cenami, a už vůbec ne s reálnými náklady na výrobu, nic společného. Německá Energiewende spočívá ve velkém využívání fotovoltaických a větrných elektráren a odstavení jaderných elektráren. To má za následek obrovské přebytky elektřiny v době příznivých podmínek pro OZE. Větrné farmy stojí hlavně na severu Německa v přímořských oblastech, ale spotřeba je větší na jihu. Jelikož Německo nemá zatím postavené dostatečné kapacity vysokonapěťových vedení (plánuje je, ale ještě se nestaví), transportuje elektrickou energii přes sítě sousedů. Tyto přetoky tak ohrožují stabilitu sítě v regionu. Německo je tak jedním z největších exportérů elektřiny. Toto se do budoucna ještě zvýrazní, jak začne Německo odstavovat bloky jaderných elektráren v Bavorsku. To bude mít za následky jak zvýšení přetoků v době příznivých podmínek pro OZE, tak vyšší poptávku na trhu po energii v době špatných podmínek pro OZE. Už nyní je Německo největším exportérem elektřiny, avšak pro Německo to není žádná výhoda, vyváží totiž elektřinu z OZE za nízkou a někdy až zápornou cenu a dováží elektřinu z jaderných a uhelných zdrojů sousedů, tedy i z ČR. Výhodou a příležitostí pro ČR je možnost elektřinu na trhu prodávat se ziskem. Nevýhodou je, že vyvezená elektřina z místních uhelných elektráren má lokální ekologické dopady. [4]

1.3.3 Doporučení nezávislé energetické komise

Optimálním řešením energetické koncepce ČR je podle nezávislé energetické komise II zachovat pestrý energetický mix, podporovat jadernou energetiku a realizovat dostavbu JE. Neexportovat elektřinu vyrobenou z uhlí s nízkou účinností. Brát v potaz, že plyn je surovina z dovozu. OZE implementovat spíše v decentralizovaných soustavách, než na nich stavět energetiku státu. Především pak rozvíjet všechny technologie, přiměřeně ke geografickým a podnebným podmínkám, vyváženě a bez závislosti na jedné či druhé surovině. A ponechávat prostor pro uplatnění nových technologií. Energetické soustavy provozovat propojené s okolím ČR, ale ponechat si možnost samostatného a nezávislého chodu v případě nestandardní situace. Energetiku budovat skutečně ekologickou, nikoliv pod nátlakem ekonomických a

ideologických skupin. [2]

Doporučení a závěry nezávislé energetické komise II jsou opatrné, přesto jasné. Rozhodně nedoporučuje vydat se cestou Německa, ale spíše opačně. Tedy podporovat jadernou energetiku, jež má skutečný ekologický přínos. Prakticky to znamená i výstavbu nových jaderných zdrojů. Dále odstavení dosluhujících uhelných elektráren, nebo jejich modernizace s důrazem na energetickou účinnost a ekologii. Zachování možnosti využívání plynu, ale nespoléhat na něj. A využít OZE pouze za výhodných situací, nikoliv k primární výrobě elektřiny ve velkém měřítku, tak jak se tomu pod nátlakem ekonomických a ideologických skupin dělo doposud.

1.4 Budoucnost ČR?

Podpora jaderné energetiky je více než vhodným řešením energetické koncepce ČR, chceme-li zachovat spolehlivou, nepřerušovanou a bezpečnou dodávku elektrické energie za rozumné náklady a zároveň šetrnou k životnímu prostředí. Zkušenosti s provozem JE a dobrá podpora veřejnosti tomu jen nahrává. Nové jaderné zdroje mohou nahradit dosluhující jaderné i uhelné bloky a pokrývat i přírůstek spotřeby el. energie. Celková ekonomická náročnost výstavby je problém který se dá překonat, bude-li podpora jaderné energetiky dlouhodobě podporovaná státem a zakotvena ve státní energetické koncepci.

1.5 Nové jaderné zdroje

Pro výstavbu nových jaderných zdrojů má České republika jen několik možností

1. Dostavba JE Temelín
2. Výstavba dalšího bloku JE Dukovany
3. Výstavba další jaderné elektrárny

Lokalita pro výstavbu jaderné elektrárny podléhá přísným kritériím. Je vybírána z mnoha hledisek, mezi něž patří např. geologie, hydrologie, seismicita, geografie, hydrogeologie, ale i z hlediska demografie, metrologie, zdrojů vody, silničního a železničního napojení, z hlediska elektrické sítě a mnoha dalších. Po havárii v japonské jaderné elektrárně Fukušima v roce 2011, jsou lokality posuzovány přísněji z hlediska seismicity, hydrologie a základových

poměrů. Vcelku dobře vyhovují lokality stávajících jaderných elektráren Temelín a Dukovany. Nové lokality byly historicky uvažovány např. Blahutovice na severní Moravě jihozápadně od Ostravy, Tetov v Polabí severně od Chvaletic a Počerady na severu Čech. [2]

1.5.1 Dostavba JE Temelín

Původní projekt JE Temelín z roku 1979 počítal se 4 bloky. Po roce 1989 byl projekt z ekonomických důvodů revidován a postaveny byly jen dva bloky s možností budoucí dostavby zbylých dvou. Většina podpůrných systémů, jako je zdroj surové vody, její chemická úprava, napojení na inženýrské sítě, napojení na silniční a železniční síť, vyvedení výkonu, rezervní napájení apod. byla budována právě pro čtyři bloky. Tato připravenost vede k nižším nákladům v případě výstavby dalších bloků.

V elektrárně v současnosti pracují odborníci na provoz a výstavbu a elektrárna má vlastní školicí středisko a simulátor blokové dozorny. Společnost ČEZ v předstihu zahájila výběr vhodných kandidátů z řad vysokoškoláků, aby včas zajistila dostatek kvalitních lidských zdrojů.

Pro hraje i dobrá podpora veřejnosti v okolí elektrárny, kdy se dosavadní provoz, i přes nářky odpůrců, ukazuje jako bezproblémový a JE Temelín má pro místní obyvatele pozitivní image a je pro ně dobrým partnerem při realizaci společných projektů. Podpora jaderné energetiky je v celé ČR na dobré úrovni, jak bývá obvyklé v zemích, které provozují jaderné elektrárny. Také díky letitým zkušenostem s vývojem a provozem jaderných reaktorů, které ČR má a možná i také tak trochu natruc rakouským ekologickým aktivistům. Podpora veřejnosti se příliš nezměnila ani po havárii v japonské JE Fukušima v roce 2011. [13]

1.5.2 Výstavba dalšího bloku JE Dukovany

JE Dukovany má v současnosti 4 bloky s reaktory VVER440 s elektrickými výkony 510MW (po využití projektových rezerv byl výkon každého bloku zvýšen až na 510MW). Současné bloky mají životnost do roku 2015, v plánu je prodloužení jejich životnosti do roku 2025 a posléze i do roku 2035. Možnost výstavby 5. bloku zvažuje společnost ČEZ již delší dobu a po událostech z dubna 2014, kdy byl zrušen tendr na dostavbu JE Temelín ještě více. JE Dukovany není na výstavbu připravená tak jako JE Temelín, ale prostor na nový blok tu je. Vzhledem k plánované životnosti reaktorů, je snaha postavit a spustit nový blok, resp. bloky nejdéle v roce 2035 k nahrazení odstavovaných bloků.

Výhody odborného personálu a podpory veřejnosti jsou stejné jako v JE Temelín[2]

1.5.3 Výstavba další jaderné elektrárny

Výstavba úplně nové jaderné elektrárny je z hlediska licencování znatelně náročnější proces, než v případě výstavby nových bloků ve stávajících JE. Samozřejmě by celá výstavba byla náročnější na projekt, vlastní výstavbu a ekonomicky o dost dražší. V tomto případě se dá počítat i s odporem místní veřejnosti. Takže výstavba nové elektrárny není momentálně ve hře. Nicméně např. plány na JE Blahutovice z 80. let počítaly s využitím tepla z jaderné elektrárny k vytápění ostravské aglomerace. Případná výstavba nové JE je spíše otázkou poloviny tohoto století. [2]

1.5.4 Výhodnost variant

Výstavba nového jaderného zdroje formou dostavby JE Temelín je vzhledem k připravenosti lokality nejlepší řešení. S novým blokem v JE Dukovany s do budoucna také počítá, minimálně jako náhrada za stávající bloky. Výstavba další jaderné elektrárny je nejméně pravděpodobnou variantou.

1.6 Výběrové řízení na dostavbu JE Temelín 2009-2014

Společnost ČEZ zahájila v srpnu 2009 výběrové řízení na dostavbu dvou bloků jaderné elektrárny Temelín. Do tendru se přihlásili tři zájemci: americký Westinghouse, francouzská Areva a česko-ruské konsorcium MIR.1200. Krátce poté byla francouzská Areva z tendru vyřazena pro nesplnění podmínek zadávací dokumentace. V souvislosti s turbulentním vývojem cen elektřiny na trhu požádala společnost ČEZ o garanci výkupních cen tzv. Contract for difference, kdy deficit, resp. přebytek vůči garantované ceně je proplácen investorovi ze státního rozpočtu, resp. jej investor vrací do státní kasy. V dubnu 2014 odmítla vláda ČR garantovat výkupní ceny, v souvislosti na to bylo výběrové řízení společnosti ČEZ zrušeno. Vláda ČR a společnost ČEZ však vyjádřili zájem o budoucí rozvoj jaderné energetiky v ČR s tím, že do konce roku chce vláda připravit komplexní plán, který bude vycházet také z aktualizace státní energetické koncepce. Dostavba JE Temelín je v tuto chvíli odložena na neurčito a bude záležet na jednáních vlády. Spekuluje se i o tom, že přednost by dostala výstavba nového bloku v JE Dukovany. [9]

1.6.1 základní přehled událostí

3. srpna 2009 – ČEZ zahájil výběrové řízení na výstavbu dvou jaderných bloků v JETE.

30. října 2009 – ČEZ ukončil příjem žádostí na účast v tendru

9. února 2011 – Vláda schválila kroky nutné k dostavbě Temelína. Patřila mezi ně investice do přenosové soustavy nebo posílení činnosti Státního úřadu pro jadernou bezpečnost.

18. února 2011 – ČEZ posunul termín dokončení dostavby o pět let na rok 2025. Mezi důvody bylo snížení poptávky po elektřině.

31. října 2011 – Zájemci o dostavbu převzali zadávací dokumentaci.

2. července 2012 – Nabídky na dostavbu Temelína podali Westinghouse, Areva a rusko-české Konsorcium MIR.1200, skládající se z firem Škoda JS, Atomstrojexport a Gidropress.

5. října 2012 – ČEZ oznámil, že Areva nesplnila požadavky tendru a byla vyřazena. V tisku se objevila informace, že nabídka negarantovala fixní cenu, Areva to odmítla.

19. října 2012 – Areva předala společnosti ČEZ podrobné námitky proti rozhodnutí o vyřazení ze soutěže.

20. listopadu 2012 – Úřad pro ochranu hospodářské soutěže (ÚOHS) vydal na základě žádosti Arevy předběžné opatření, podle něhož ČEZ nesmí podepsat smlouvu s případným vítězem tendru.

30. listopadu 2012 – ČEZ požádal Státní úřad pro jadernou bezpečnost o povolení pro stavbu dvou nových bloků.

18. ledna 2013 – Ministerstvo životního prostředí vydalo souhlasné stanovisko ke stavbě dvou nových bloků JETE.

24. ledna 2013 – Areva znovu požádala antimonopolní úřad o pozastavení tendru, úřad této druhé žádosti nevyhověl.

25. února 2013 – ÚOHS rozhodl, že ČEZ vyřazením Arevy z tendru neporušil zákon o veřejných zakázkách. Areva podala rozklad.

25. března 2013 – ČEZ odeslal uchazečům o dostavbu Temelína předběžné hodnocení jejich nabídek. Američané vedli v jedné ze čtyř kategorií, která má při výběru dodavatele hlavní váhu.

26. července 2013 – Předseda ÚOHS zamítl odvolání Arevy.

21. října 2013 – Soud v Brně vydal na návrh Arevy předběžné opatření, podle něhož ČEZ nemůže uzavřít smlouvu s případným vítězem tendru.

Listopad 2013 – Evropská komise požádala ČR o dodatečné informace týkající se tendru a vyřazení Arevy.

Prosinec 2013 – Konsorcium MIR.1200 i společnost Westinghouse předaly firmě ČEZ konečné nabídky na dostavbu JETE.

9. dubna 2014 – Vláda vyjádřila zájem pokračovat v rozvoji jaderné energetiky, ovšem bez jakéhokoliv typu státních záruk.

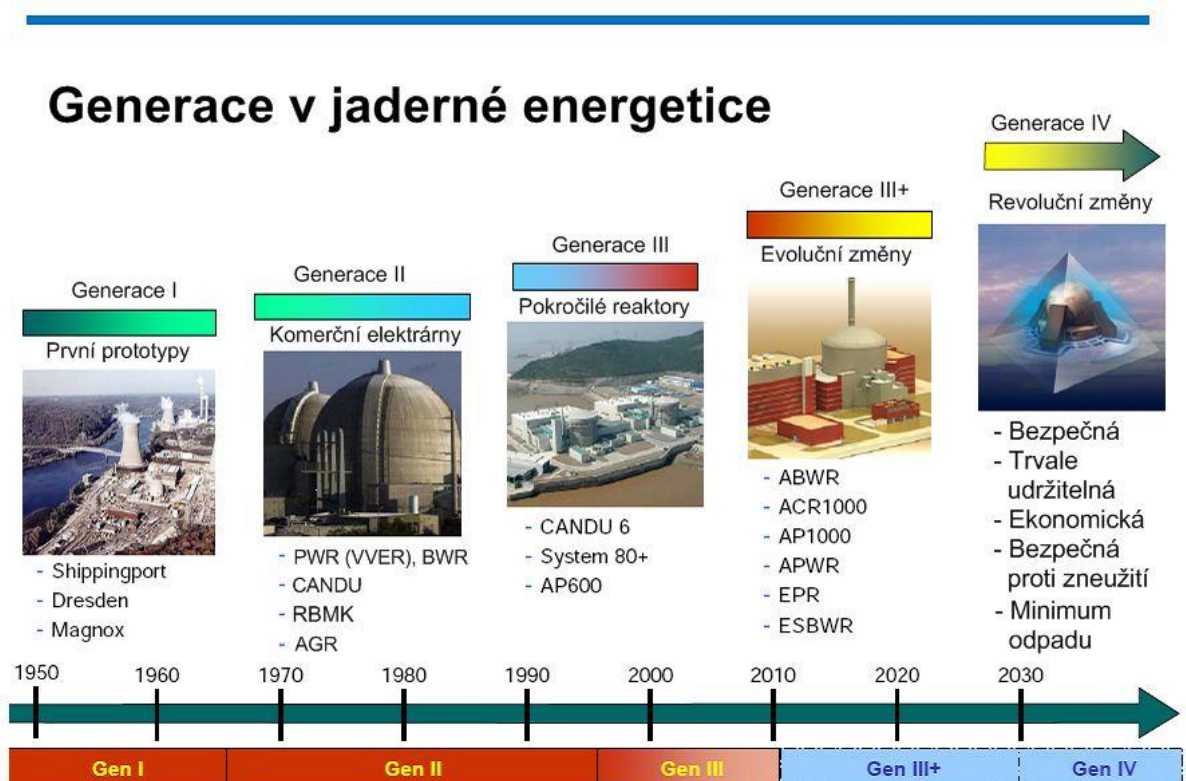
10. dubna 2014 – společnost ČEZ zrušila tendr na dostavbu JETE.

Duben 2014 – Areva stahuje svoje odvolání k soudu proti vyřazení z tendru[12]

2 Bezpečnost reaktorů tzv. III a III+ generace

2.1 Historické rozdělení reaktorů

Jaderné reaktory lze řadit do několika generací.



Obr. 3 Generace jaderných reaktorů [7]

První generací reaktorů jsou typy vyvinuté v padesátých a šedesátých letech minulého století. Velice často se jednalo o kusové prototypově stavěné reaktory. V podstatě se ověřovalo, zda

je možné používat jaderné reaktory k výrobě elektrické energie. Jedná např. o typ Magnox. Reaktory první generace jsou dnes až na výjimky mimo provoz.

Druhá generace představuje většinu dnes fungujících bloků a tvoří páteř jaderné energetiky. Navazovaly na zkušenosti s úspěšnými modely generace I. Elektrárny se už stavěly v sériích, i když každá byla jednotlivě projektována a konstruována. Využívaly však stejné principy a projekty na sebe navazovaly. Jedná se o bloky velkého výkonu PWR, VVER, BWR, AGR, CANDU.

Generací III. a III.+ jsou zdokonalené verze předcházející generace. Tyto reaktory většinou vycházejí z úspěšných modelů reaktorů generace II, ale mají daleko lepší bezpečnostní i uživatelské vlastnosti. Jedná se o standardizované typy, což zjednodušuje povolenací řízení při výstavbě elektrárny a celkově snižuje náklady a čas výstavby. Jednodušší a robustnější konstrukce umožňuje zjednodušení provozu a větší odolnost proti lidským chybám. Lepší uživatelské vlastnosti a delší životnost – standardní by měla být šedesát let. Velmi silně redukovaná možnost nehod s roztavením jádra. Minimální vliv na životní prostředí. Zmenšení spotřeby uranu i objemu radioaktivního odpadu umožňuje vysoké vyhoření paliva. Kompenzovat zhoršování vlastností by měly izotopy absorbující neutrony v palivu, které se v průběhu spalování odbourávají, a jejich úbytek kompenzuje zhoršující se vlastnosti paliva. To umožňuje prodloužení intervalu mezi výměnami paliva. Jako generace III+ se označují reaktory, které mají vylepšené prvky pasivní bezpečnosti tak, že se v případě nestandardní situace reaktor dostane do bezpečného stavu automaticky bez pomoci aktivních částí. Zároveň dochází k dalšímu vylepšením jejich vlastností.

Pro čtvrtou generaci reaktorů se počítá do budoucna s rychlými reaktory, chlazenými sodíkem, héliem, nebo olovem. Perspektivní koncepcí je reaktor chlazený roztavenými solemi, s rozpuštěným uranem v chladiči (např. v soli fluoridu sodného), které bude protékat kanály mezi grafitovým moderátorem. Jinou zajímavou koncepcí je reaktor moderovaný vodou v superkritickém stavu (překračující termokritický bod 22MPa 374°C). A také vysokoteplotní reaktory chlazené héliem. [1] [6]

2.2 Bezpečnost jaderných reaktorů

V jaderné energetice civilizovaných zemí panuje tlak na vysokou míru bezpečnosti provozu jaderných reaktorů. Během historie došlo již k několika vážným i méně vážným haváriím a všechny tyto incidenty ukázaly nutnost nebrat bezpečnostní otázky na lehkou váhu. Riziko jaderné havárie nelze nikdy úplně vyvrátit, je však nutné jej co nejvýše snížit a v případě havárie její následky co nejvíce omezit. Především tři největší havárie, Three Mile Island 1979, Černobyl 1986 a Fukušima 2011 nám dali poznat, co se může při havárii stát, a poukázali, na která specifika je třeba se připravit. Nazveme je vybrané bezpečnostní problémy.

2.2.1 Vybrané bezpečnostní problémy

1. Havarijní zastavení štěpné reakce

Zastavení štěpné reakce je v případě havárie základem. Bez tohoto kroku dojde při nedostatečném chlazení k nárůstu teploty i tlaku a následně k roztavení aktivní zóny a lokálnímu zamoření či dokonce zamoření okolí.

2. Havarijní dochlazování aktivní zóny

I když je zastavena štěpná reakce, k rozpadu atomových jader, který je doprovázený vznikem tepla, dochází ještě řadu let poté. Odstavený reaktor, plný jaderného paliva, stejně jako bazén s vyhořelým palivem je tedy potřeba chladit ještě dlouhou dobu.

3. Ztráta chladiva

V případě velké netěsnosti, např. prasknutí potrubí primárního okruhu dojde k masivnímu úniku chladiva a ztrátě schopnosti chladit aktivní zónu reaktoru. Schopnost uchládit vznikající teplo musí být obnovena, nebo dojde k roztavení aktivní zóny.

4. Únik radioaktivních látek do okolí

Únik radioaktivních látek do okolí může znamenat ohrožení zdraví a je potřeba mu zamezit.

5. Vznik vodíku

Během havárie se vyvíjí vodík (např. při reakci mezi zirkoniovým pokrytím paliva a

chladičem, nebo při radiolytickém rozkladu). Jeho nahromadění v kombinaci se vzduchem vytváří výbušnou směs. Výbuch vodíkové směsi může poškodit důležité součásti reaktoru, jiných důležitých systémů, nebo narušit těsnost ochranné obálky.

6. Tavení aktivní zóny

Dojde-li k nadměrnému zvýšení teploty jaderného paliva, poruší se těsnost pokrytí paliva a radioaktivní štěpné produkty se mohou rozptýlit. Dále pak může dojít k roztavení aktivní zóny, a ta se může protavit skrz nádobu reaktoru a následně i skrz podlahu budovy. Při tom dojde k úniku radioaktivních látek.

7. Ztráta napájení bezpečnostních systémů

Ztráta napájení vyřadí z činnosti aktivní bezpečnostní systémy, což může vést k ohrožení bezpečnosti, např. ke ztrátě schopnosti uchládit aktivní zónu a další problémy s tím spojené.

2.2.2 Hodnocení bezpečnosti

Jedním ze způsobů hodnocení bezpečnosti jsou pravděpodobnostní analýzy. Nejdůležitější veličiny pravděpodobnostních metod jsou CDF - core damage frequency = četnost poškození aktivní zóny LFR - large frequency release = četnost velkého úniku radioaktivních látek a ionizujícího záření do životního prostředí. Obě hodnoty jsou výsledkem součtu pravděpodobností jednotlivých událostí. Obvykle se pohybují v řádech 10^{-5} až 10^{-8} událostí za rok. [13]

2.3 Bezpečnost reaktorů III. a III.+ generace

Bezpečnost u reaktorů III. generace vychází evolučním vývojem z generace II. Na základě celosvětových sdílených zkušeností s provozem jaderných reaktorů a na základě analýz havárií, došlo za 60 let provozu jaderných elektráren k mnoha vylepšením v oblasti bezpečnosti. Především tři velké havárie, Three Mile Island 1979, Černobyl 1986 a Fukušima 2011 dali vývoji bezpečnosti velký podnět. Havárie elektrárny Three Mile Island poukázala na nutnost kvalitního výcviku personálu a symptomatické řízení havarijních událostí. Havárie elektrárny Černobyl poukázala ještě mnohem víc na nutnost zodpovědného chování personálu a bezpečnostní kulturu obecně. Také v oblasti konstrukce reaktoru, ochranné obálky a

problémům s tavením aktivní zóny pomohla tato havárie získat zkušenosti. Poslední havárie jaderné elektrárny Fukušima odhalila zranitelnost bezpečnostních systémů vůči výpadku napájení a nezanedbatelný vliv vznikajícího vodíku. Z těchto havárií sice plynulo v oblasti bezpečnosti velké poučení, ale také znamenaly změny v oblasti veřejného mínění. Jaderná energetika je tak neprávem označována jako potenciálně nebezpečná.

Oproti II. Generaci jaderných reaktorů došlo k výrazným změnám. Z bezpečnostního hlediska je nejdůležitější důraz na pasivní bezpečnostní prvky. Řešení nestandardních či krizových situací probíhá automaticky na základě přírodních zákonitostí a nepotřebuje elektrický či mechanický zásah operátora či kontrolního systému. Je založeno na gravitaci, přirozeném proudění, odolnosti proti tlaku či teplotám. Řeší tak problém s el. napájením havarijních systémů. Jsou aplikovány různé způsoby řešení problémů s tavením aktivní zóny. Další systémy se starají o odplyňování kontejnmentu v případě vzniku vodíku. Kontejnment a celková konstrukce budov zajišťuje odolnost proti pádu letadla a dalším vnějším vlivům, jako jsou třeba zemětřesení nebo hurikány.

Bezpečnost je u reaktorů III. a III.+ generace na vyšší úrovni než u generací předchozích a na mnohonásobně vyšší úrovni než je bezpečnost v jiných nejaderných oborech. [7] [5]

3 Uvažované druhy jaderných reaktorů pro dostavbu JE Temelín

3.1 JE Temelín nyní

Jaderná elektrárna Temelín leží v jižních Čechách cca 5 km jihozápadně od Týna nad Vltavou a cca 25 km severně od Českých Budějovic. Je osazena dvěma reaktorovými bloky s tlakovodními reaktory VVER 1000 typu V320. Technologická voda je odebírána z vodního díla Hněvkovice a vyvedení výkonu je realizováno přes rozvodnu Kočín. Oba bloky vyrábí 1055 MWe každý. Elektrárna má vlastní plnorozsahový simulátor umožňující školení personálu pro běžný provoz i zvládání mimořádných událostí. [14]



Obr. 4 JE Temelín 2x1055MW [20]

3.1.1 Historie

V roce 1979 byl vydán investiční záměr stavby a o rok později bylo rozhodnuto o výběru lokality Temelín. Kontrakt na dodávku, tehdy ještě sovětského technického projektu byl uzavřen v roce 1982 a v roce 1985 byl zpracován úvodní projekt Energoprojektem Praha se čtyřmi reaktorovými bloky. Vlastní stavba pak byla zahájena v roce 1987. V průběhu stavby došlo k různým modifikacím původního projektu. Asi nejvýznamnější bylo zredukování počtu postavených bloků na dva, k čemuž došlo na základě přehodnocení potřeby výkonu po listopadu 1989. K dalším významným úpravám původního sovětského projektu došlo v oblasti bezpečnosti a spolehlivosti, na základě prověrek Mezinárodní agentury pro atomovou energii. Smyslem prověrek bylo posoudit, zda bude JE Temelín plně srovnatelná s provozovanými jadernými elektrárnami ve světě. Bylo doporučeno zejména nahradit původní systém řízení moderním digitálním systémem, provést záměnu původního sovětského paliva a aktivní zóny, nainstalovat plnorozsahový trenažér a další jiné úpravy. Pro dodávku jaderného paliva i pro nové systémy kontroly a řízení byla výběrovým řízením

vybrána americká společnost Westinghouse. Stavba prvního bloku byla dokončena v roce 2000. Reaktor byl zavezen palivem a ještě koncem téhož roku vyrobil první elektřinu. Zkušební provoz byl na prvním bloku zahájen 10. Června 2002 a na druhém bloku 18. Dubna 2003. Začátek provozu se tedy datuje na roky 2002 až 2003. Zkušební provoz byl spojen i s dílčími problémy s palivem a vyvážením turbíny. V průběhu provozu prošel JE Temelín několika úpravami. Např. bylo vyměněno americké palivo za ruské a v roce 2013 byl díky využití projektových rezerv zvýšen tepelný výkon reaktoru a tím došlo navýšení dosavadního výkonu o 80 MWe. Po havárii v japonské jaderné elektrárně Fukušima v roce 2011 došlo k několika dalším úpravám, např. v dubnu 2014 byl nainstalován další záložní dieselgenerátor a některé lehčí stavby byly zodolněny vůči otřesům. [14]

3.1.2 Reaktory PWR (VVER)

Reaktory PWR (Pressurized Water Reactor) resp. ruský typ VVER (vodo-vodjanoj energetičeskij reaktor) patří mezi nejrozšířenější reaktorové typy na světě. Základem těchto reaktorů je tlaková nádoba a v ní je umístěna aktivní zóna reaktoru. Palivo je ve formě pelet UO_2 složených do palivových proutků v povlakové trubce ze slitiny zirkonia. Palivové proutky jsou následně složeny do palivových tyčí. Obohacení paliva izotopem U_{235} je přibližně 3 až 5%. Chladivem i moderátorem je obyčejná (lehká) voda. Do tlakové nádoby je zaústěno několik chladících smyček (6 u VVER-440, 4 u VVER-1000), kterými je voda ohřátá štěpnou reakcí na víc jak 300°C a pod vysokým tlakem víc jak 15 MPa hnána cirkulačními čerpadly do parogenerátoru – tepelného výměníku, kde předává teplo vodě sekundárního okruhu. Sekundární okruh je pak stejný jako u klasické tepelné elektrárny.

Mezi velké přednosti těchto reaktorů patří bezesporu jejich velmi dobrá stabilita a bezpečnostní charakteristiky, především záporný teplotní koeficient reaktivity, kdy zvyšování teploty chladiva/moderátoru vede ke snižování moderačního účinku a tím k útlumu štěpné reakce. Mezi další výhody lze zařadit dvouokruhovou koncepci elektráren s PWR a též dobrou technologickou zvládnutost tohoto typu reaktoru.

Nevýhodami pak je nutnost odstávky reaktoru při výměně paliva, kdy na konci roční, či jeden a půl roční kampaně je potřeba část paliva (např. 1/3; 1/4) vyměnit a aktivní zónu přeskládat. [6] [7]

3.2 Možní dodavatelé nových bloků

3.2.1 Westinghouse

Americká společnost Westinghouse je jedním z předních dodavatelů jaderných technologií, jež jsou základem mnoha fungujících jaderných elektráren na světě. Společnost uvádí, že přibližně 50% ze stávajících 440 jaderných elektráren je na jejích technologiích založeno.

Konsorcium Westinghouse Electric Company LLC a Westinghouse Electric Czech Republic se účastnilo tendru na dostavbu JE Temelín se svým reaktorem AP1000. Bude-li vypsáno nové výběrové řízení, je nanejvýš pravděpodobné, že se Westinghouse přihlásí znovu. [16]



Obr. 5 Logo Westinghouse [16]

3.2.2 MIR.1200

Česko-Ruské konsorcium společností ŠKODA JS a.s., ZAO „ATOMSTROJEXPORT“ a OAO OKB „GIDROPRESS“ vytvořené v roce 2009 s cílem spojit síly a znalosti pro přípravu nabídek a realizaci jaderných bloků. Opírá se o více než padesátiletou zkušenost česko-ruské spolupráce. Konsorcium MIR.1200 má za cíl se výstavbou dvou bloků v JE Temelín etablovat na jaderném trhu a získaných zkušeností využít k získání dalších nabídek ve třetích zemích. [10]



Obr. 6 Logo Mir.1200 [10]

3.2.3 Areva

Francouzská společnost Areva se čtyřicetiletou historií a bohatými zkušenostmi z oblasti jaderné energetiky, přišla do výběrového řízení se svým reaktorem EPR. Z původního tendru byla sice pro nesplnění zadávacích požadavků vyřazena, ale bude-li vypsáno nové výběrové řízení, přihlásí se společnost Areva opět. [8]



Obr. 7 Logo Areva [8]

3.3 Stávající a navrhované reaktory

3.3.1 JETE1,2 - VVER-1000

Primární okruh tvoří samotný reaktor typu VVER-1000, 4 parogenerátory, v každé z cirkulačních smyček jeden, 4 hlavní cirkulační čerpadla a jeden společný kompenzátor objemu. Celý primární okruh je uzavřen v ochranné obálce tzv. kontejnmentu. Temelínský reaktor patří do II. generace, využívá však některých bezpečnostních prvků III. generace. Výše uvedené vybrané bezpečnostní problémy jsou zde řešeny následujícím způsobem:

1. Havarijní zastavení štěpné reakce

Mechanický systém odstavení reaktoru. Systém zajišťuje pád souboru absorpčních tyčí do AZ, a tím převedení AZ reaktoru do podkritického stavu.

2. a 3. Havarijní dochlazování aktivní zóny a Ztráta chladiva

Pasivní systém havarijního chlazení aktivní zóny reaktoru. Tento systém je tvořen čtyřmi hydroakumulátory a slouží k rychlému zaplavení AZ při havarijních situacích, které jsou spojeny s náhlým poklesem tlaku v primárním okruhu.

Aktivní systémy, které jsou, stejně jako všechny systémy související s jadernou bezpečností ztrojené (3 x 100%)

- Nízkotlaký havarijní systém chlazení AZ. Systém slouží k havarijnímu dochlazování AZ a k dlouhodobému odvodu zbytkového tepelného výkonu reaktoru.
- Vysokotlaký havarijní doplňovací systém. Systém slouží k potlačení havárií s rychlým nárůstem výkonu reaktoru.
- Vysokotlaký systém havarijního chlazení AZ. Systém slouží k udržování AZ v podkritickém stavu při zachování vysokého tlaku a k chlazení AZ při malé a střední havárii typu LOCA (loss of coolant accident), tj. při havárii spojené se ztrátou chladiva.

Systém ochrany primárního okruhu při převýšení tlaku. Systém zabraňuje porušení integrity primárního okruhu prostřednictvím kompenzátoru objemu a jeho pojišťovacích ventilů.

4. Únik radioaktivních látek do okolí

Ochranná obálka - kontejnment – mohutná železobetonová konstrukce z předpjatého betonu s vnitřním pokrytím 8mm vrstvou nerezové oceli. Kontejnment je hermetizován a s trvalým podtlakem tak brání úniku radionuklidů do okolí v případě havárie. Další funkcí kontejnmentu je ochrana vůči vnějším vlivům, ať již přírodním (vichřice, extrémní srážky), nebo jiným (výbuchy, pád letadla).

Sprchový systém ochranné obálky. Aktivní systém je též umístěn pod stropem reaktorového sálu uvnitř kontejnmentu. Systém zajišťuje snížení tlaku v hermetických prostorech po havárii typu LOCA, tj. zabraňuje únikům radioaktivních látek do životního prostředí.

5. Vznik vodíku

V původním projektu není řešen vůbec, po Fukušimě vydán příkaz dovybavit systémem pro odvod vodíku všechny JE do roku 2016. Má jít o systém periodického odvodu vodíku z kompenzátoru objemu.

6. Tavení aktivní zóny

Funkci zachycení taveniny plní samotný kontejnment.

7. Ztráta napájení bezpečnostních systémů

Nezávislý na el. napájení je systém havarijních tyčí pro zastavení štěpné reakce. Doběh hlavních cirkulačních čerpadel na základě setrvačnosti, dále nejsou vzhledem ke svému příkonu (4 x cca 7MW) zálohována. Další chlazení AZ probíhá přirozeným pasivním oběhem chladiva přes parogenerátory. Pasivní je i systém havarijního chlazení AZ ze 4

hydroakumulátorů. Ostatní systémy jsou zálohovány dieselgenerátory. [13]

Hodnoty pravděpodobnostních ukazatelů u bloků JETE 3 a 4 jsou [13]

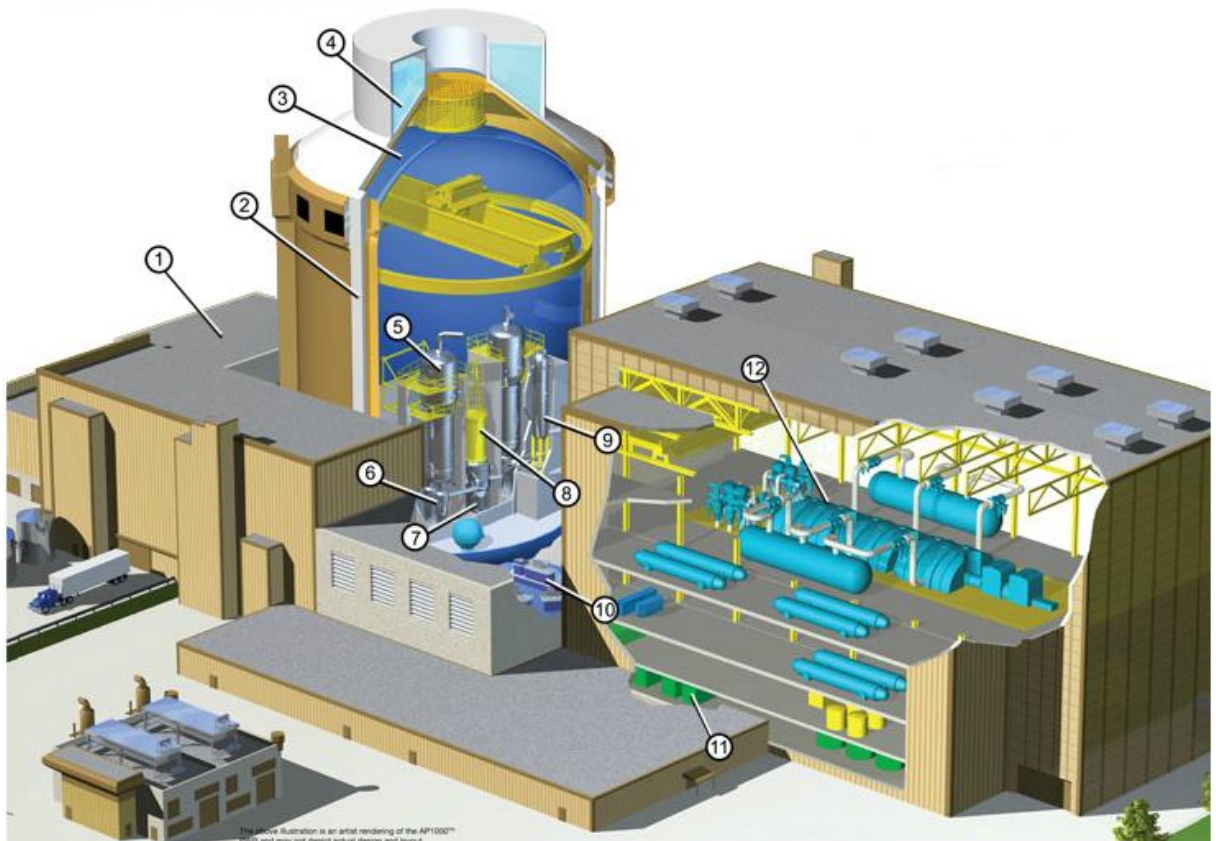
CDF: 3.32×10^{-5}

LFR: 4.4×10^{-6}

3.3.2 Westinghouse - AP1000

Reaktor AP1000 je standardizovaný tlakovodní reaktor III.+ generace vycházející z modelu AP600. V USA je licencován od roku 2006, certifikace EUR, která osvědčuje, že může být postaven i v Evropě získal v roce 2007. V současnosti se 4 bloky s AP1000 staví v Číně a připravuje se smlouva na dalších 8. Dále se 4 bloky staví v USA. V Evropě jedná Westinghouse s několika dalšími zákazníky včetně Polska, ČR a Velké Británie.

AP1000 využívá pasivních bezpečnostních systémů pro zvládnutí projektových havárií. Ty jsou schopny převést a udržet blok v bezpečném stavu i bez zásahu personálu blokové dozorny či potřeby vnější dodávky elektrického proudu. Namísto spoléhání se na tzv. aktivní komponenty, jakými jsou např. čerpadla či dieselgenerátory, používají jako zdroj energie přírodní fyzikální zákony - gravitaci, přirozenou cirkulaci a pohon pomocí expanze stlačeného plynu. V případě natavení aktivní zóny je projekt schopen uchládit taveninu uvnitř reaktorové nádoby a zabránit tak jejímu protavení. Elektrárna by se tak měla v případě konstrukční poruchy sama odstavit a zůstat odstavená i bez zásahu operátora a bez potřeby dodávky el. proudu nebo třeba zapojení externích čerpadel [11] [16].



Obr.8 Blok AP1000 1) Prostor manipulace s palivem 2) Betonový plášť 3) Ocelový kontejnment 4) Nádrž s vodou pro pasivní chlazení kontejnmentu 5) Parogenerátory 6) Čerpadla chladiva reaktoru 7) Reaktor 8) Integrovaná hlava reaktoru 9) Kompenzátor objemu 10) Hlavní řídicí místnost 11) Čerpadla napájecí vody 12) Turbína [16]

Společnost Westinghouse uvádí, že celá koncepce reaktoru AP1000 má ve srovnání se standardním tlakovodním reaktorem o 50% méně bezpečnostních ventilů, o 80% méně bezpečnostního potrubí, o 85% méně kabeláže pro účely řízení, o 35% méně čerpadel a o 45% menší zastavěný prostor. Dále umístění hlavních cirkulačních čerpadel ve spodní části parogenerátoru. Ochranou obálku – kontejnment tvoří vnitřní ocelová nádoba obehnaná betonovým pláštěm[16]

Tab.1 Základní technická data bloku AP1000 [11]

Celková data	
Výkon, hrubý [MW _e]	1200
Výkon, čistý [MW _e]	1117
Tepelný výkon [MW _t]	3415
Primární okruh	
Počet hlavních cirkulačních smyček	2 horké větve / 4 studené větve
Průtok primárním okruhem [m ³ /s]	19,87
Provozní (nominální) tlak [MPa]	15,5
Sekundární okruh	
Průtok páry při nominálních podmínkách [kg/s]	1886
Teplota/tlak páry [°C / MPa]	272,78 / 5,76
Aktivní zóna reaktoru	
Výška aktivní zóny [m]	4,267
Ekvivalentní průměr aktivní zóny [m]	3,04
Počet palivových souborů	157
Počet svazků s absorpčními elementy	69
Množství paliva [t UO ₂]	95,97
Tlaková nádoba reaktoru	
Vnitřní průměr válcového tělesa [mm]	4038,6
Tloušťka stěny válcového tělesa [mm]	203
Celková výška [mm]	13944
Hlavní cirkulační čerpadla	
Počet	4
Nominální průtok [m ³ /h]	17886
Kompensátor objemu	
Celkový objem [m ³]	59,5
Projektový tlak [MPa]	17,1
Parní generátory	
Počet	2
Typ	vertikální s trubkami tvaru U
Maximální vnější průměr [mm]	6096
Celková výška/délka [mm]	22460
Vnitřní hermetická obálka	
Provedení	ocelový
Objem [m ³]	58333
Vnější ochranná obálka	
Provedení	železobeton

Vybrané bezpečnostní otázky – AP1000

U reaktoru AP1000 jsou vybrané bezpečnostní otázky řešeny takto

1. Havarijní zastavení štěpné reakce

Standardní mechanický systém odstavení reaktoru. Systém zajišťuje pád souboru absorpčních tyčí do AZ, a tím převedení AZ reaktoru do podkritického stavu.

2. Havarijní dochlazování aktivní zóny

Kromě aktivních systémů využívá unikátní pasivní systém chlazení aktivní zóny a pasivní systém chlazení kontejnmentu, viz níže.

3. Ztráta chladiwa

Kromě aktivních systémů využívá pasivní systém chlazení aktivní zóny a pasivní systém chlazení kontejnmentu, viz níže.

4. Únik radioaktivních látek do okolí

Kontejnment je dvouplášťový. Vnější betonový plášť a vnitřní ocelová nádoba. Mezi nimi je prostor pro proudění vzduchu.

5. Vznik vodíku

Je řešen technologií pasivních autokatalytických rekombinátorů NIS-PAR. Tato technologie využívá rekombinace vodíku k zamezení vzniku vodíkového plynu nebo jiných hořlavých plynů, jako je oxid uhelnatý, které mohou vytvářet výbušné prostředí. Funguje zcela pasivně, sama se spouští při nízkých teplotách i v prostředí plném páry. Proces je řízen na základě přirozeného proudění tepla vzniklého při rekombinaci vodíku.

6. Tavení aktivní zóny

Pro zabránění rizik spojených s protavením aktivní zóny skrz nádobu reaktoru umožňuje projekt AP1000 v případě překročení přípustné teploty zaplavit dutinu pod nádobou reaktoru vodou z odpadní nádrže jaderného paliva. Toto chlazení by mělo zajistit, aby se roztavené kusy aktivní zóny neprotavily skrz nádobu reaktoru a následně skrz kontejnment.

7. Ztráta napájení bezpečnostních systémů

Projekt AP1000 využívá krom standardních aktivních bezpečnostních systémů, zálohovaných dieselgenerátory, také unikátní pasivní systémy. Pasivní systém chlazení aktivní zóny a pasivní systém chlazení kontejnmentu funguje s recirkulací chladicí vody, a umožňuje tak dlouhodobý provoz, bez el. energie. [16]

Hodnoty pravděpodobnostních ukazatelů u AP1000 jsou [16]

CDF: 5×10^{-7}

LFR: 6×10^{-8}

Pasivní systém chlazení aktivní zóny

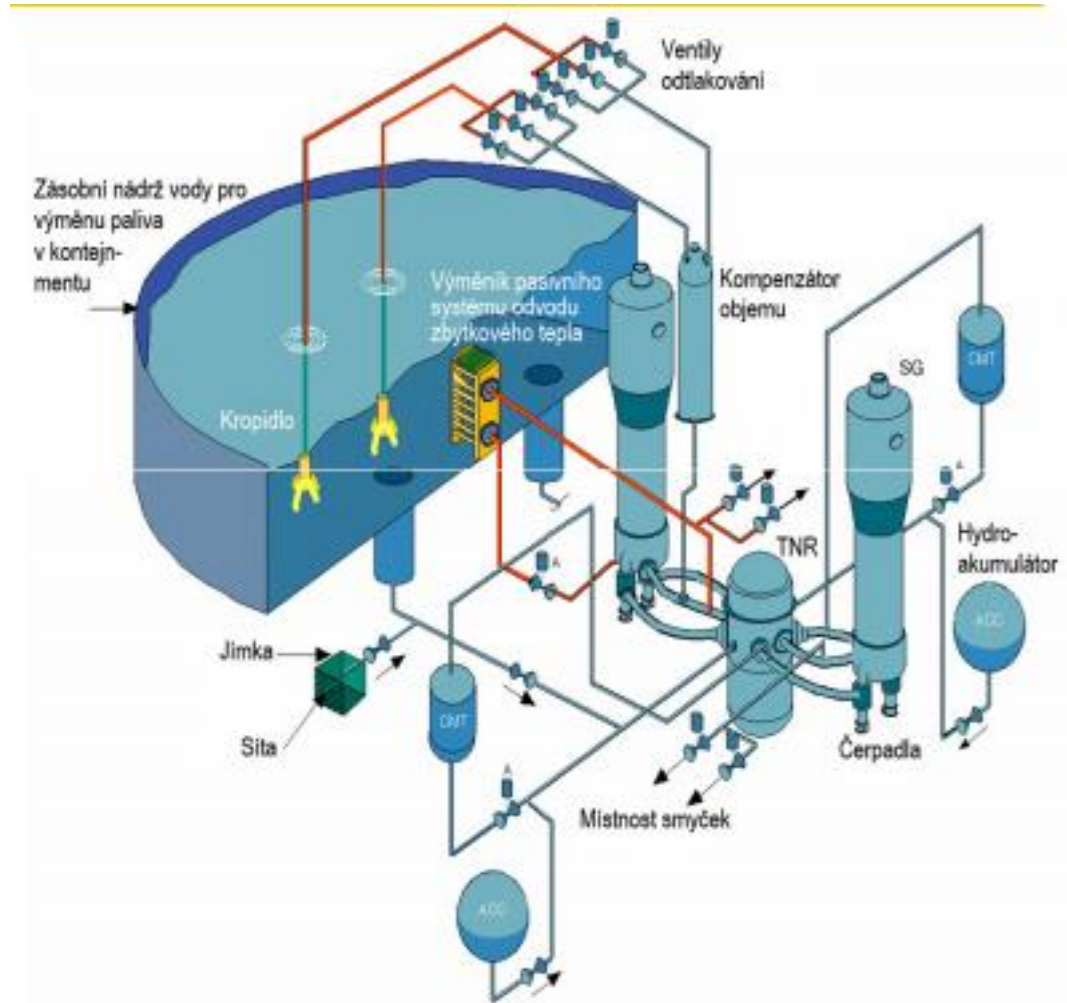
Systém zajišťující přívod chladiva k reaktoru, její bezpečnostní vstřikování a pasivní odvod zbytkového tepla. Chladivo je přiváděno do nádrže v aktivní zóně z akumulátorů a rezervoárů vody v kontejnmentu. To vše probíhá v několika krocích.

V první fázi na únik chladiva z primárního okruhu reaguje kompenzátor objemu. Pokles hladiny v kompenzátoru uvede do činnosti nádrž v aktivní zóně. Její studená větev se ohřeje a tím pohání vstřikování vody přímo do aktivní zóny. Rozdíl hustoty horkých a chladných kapalin nastartuje cirkulační tok ochlazování uvnitř reaktoru.

V druhé fázi se aktivuje systém odvodu zbytkového tepla do odpadní nádrže jaderného paliva přes tepelný výměník.

V třetí fázi dojde k zahájení automatického snižování tlaku kdy je odpařené chladivo z kompenzátoru rozstřikováno do odpadní nádrže jaderného paliva. Do aktivní zóny je pod tlakem vstřikována voda z akumulátorů přes nádrž v aktivní zóně.

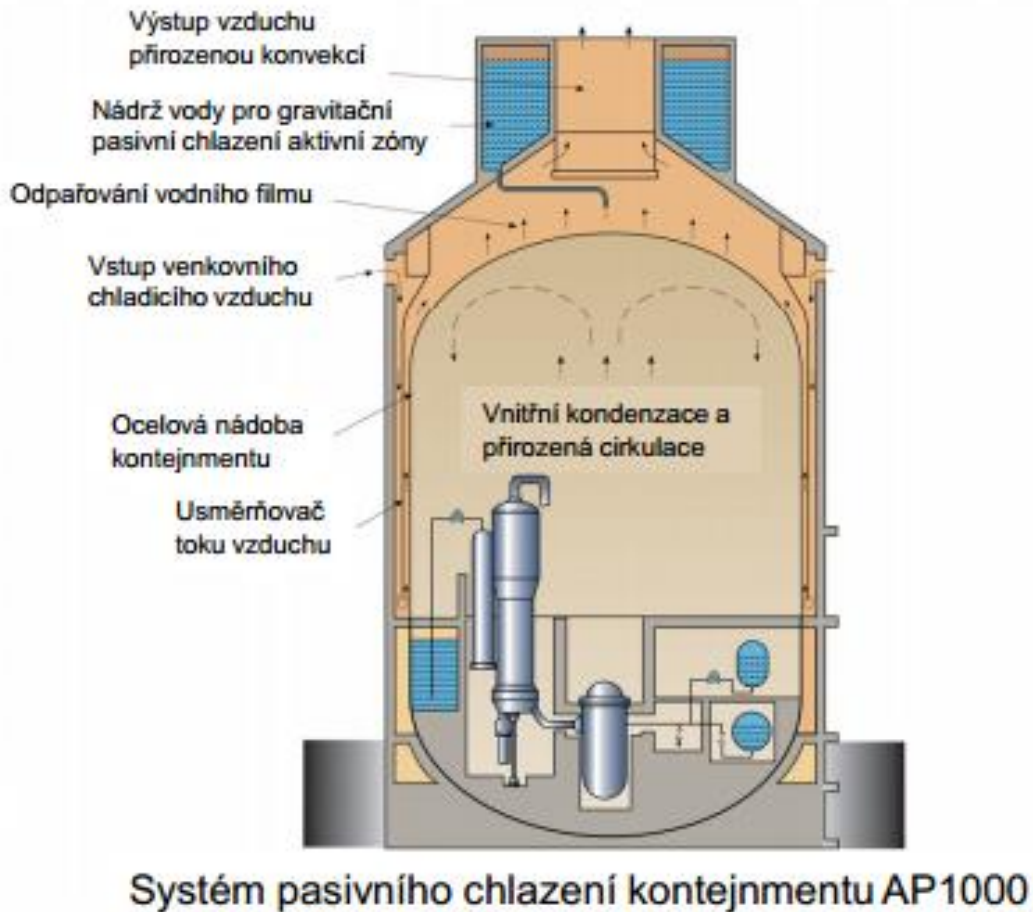
Čtvrtá fáze již počítá s odpařováním chladiva přímo do prostoru kontejnmentu a doplňováním vody do nádrže v aktivní zóně z odpadní nádrže jaderného paliva. Zkondenzovaná pára ze stěn kontejnmentu je přiváděna do odpadní nádrže jaderného paliva a z jímky v dolní části kontejnmentu do nádrže v aktivní zóně. Dochází takto k recirkulaci pro dlouhodobé dochlazování. [16]



Obr. 9 Pasivní systém chlazení aktivní zóny [16]

Pasivní systém chlazení kontejneru

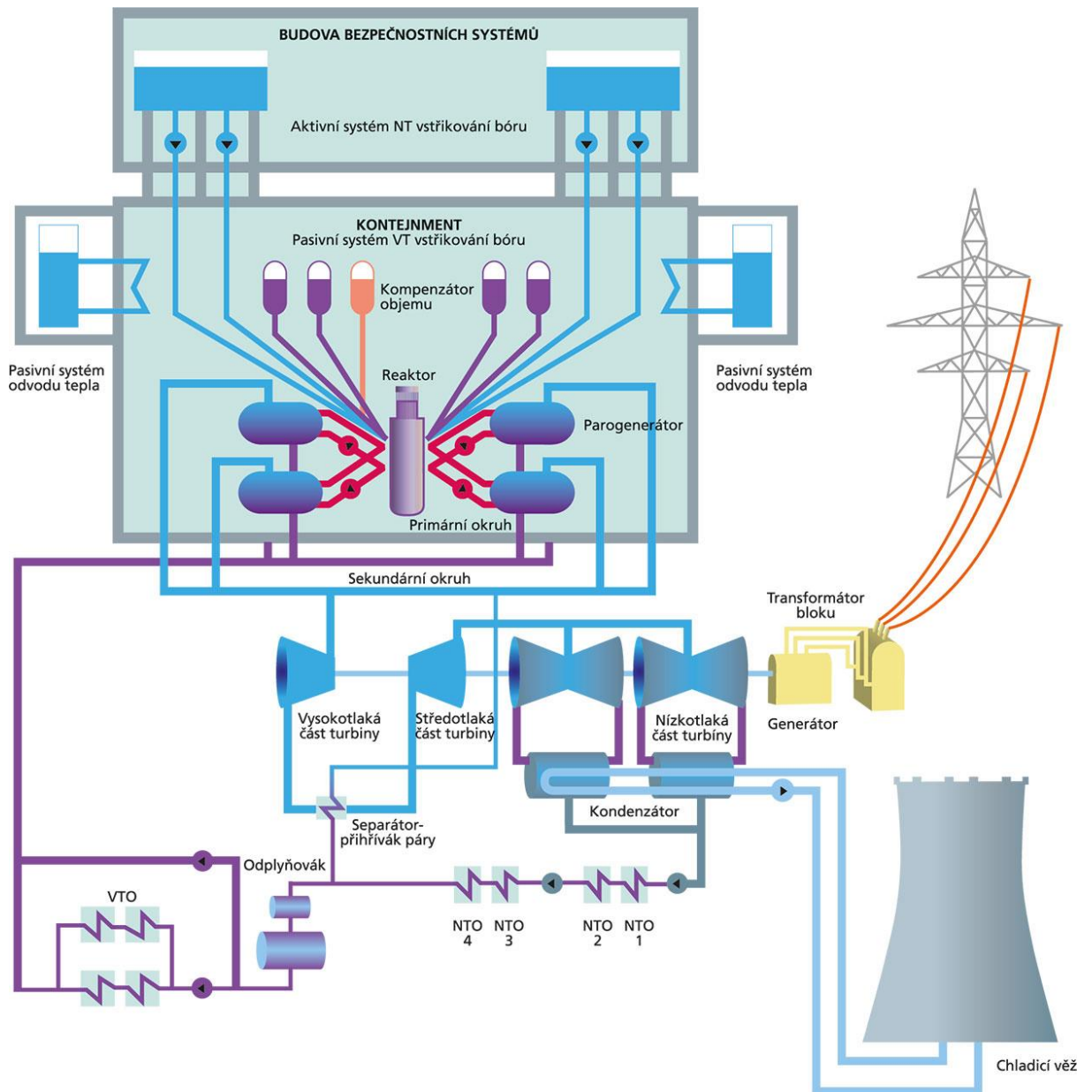
Na systém pasivního chlazení aktivní zóny navazuje systém pasivního chlazení kontejneru. Dojde-li k havárii s únikem, nebo řízeným odpařováním do kontejneru, je do něj uvolněno obrovské množství tepelné energie. Pára kondenzující na stropu a stěnách ocelové nádoby kontejneru jí předává teplo, které je odebráno přirozenou cirkulací vzduchu mezi pláští kontejneru. V případě velkého množství tepla je nádoba skrápěna gravitačním odtokem z nádrží vody na střeše kontejneru. Zásoba vody je na 72 hodin s možností připojení externího zdroje vody. [16]



Obr. 10 AP1000 chlazení kontejnmentu

3.3.3 MIR.1200 - VVER-1200 (AES-2006)

VVER-1200 (označovaný také jako AES-2006) je tlakovodní reaktor III.+ generace evolučně vyvinutý z reaktorů VVER-1000 (V provozu ve střední a východní Evropě, v ČR oba fungující Temelínské bloky). Projekt je licencován v Rusku, certifikaci EUR získal v roce 2007. V současné době probíhá výstavba těchto bloků v Novoroněžské a Leningradské elektrárně.



Obr. 11 Mir.1200 schéma [10]

Bezpečnostní koncepce jaderné elektrárny je založena na aktivních bezpečnostních systémech, které mají k dispozici normální napájení i nouzové (havarijní) napájení z dieselgenerátorů. Bezpečnostní systémy se skládají ze čtyř zcela nezávislých kanálů. Kanály jsou od sebe fyzicky oddělené ohnivzdornými bariérami po celé délce a jsou umístěné v od sebe oddělených prostorách. K odvrácení těžkých havárií nebo utlumení jejich následků slouží navíc pasivní systémy, které fungují bez zásahu personálu jaderné elektrárny a nepotřebují elektrické napájení. Pasivní systémy fungují na základě přírodních sil, například gravitace, nebo přirozeného oběhu teplotně rozdílného chladiva. [10] [15]

Tab. 2 Základní technická data bloku VVER-1200 [11]

Celková data	
Výkon, hrubý [MW _e]	1198
Výkon, čistý [MW _e]	1113
Tepelný výkon [MW _t]	3200
Primární okruh	
Počet hlavních cirkulačních smyček	4
Průtok primárním okruhem [m ³ /s]	23,9
Provozní (nominální) tlak [MPa]	16,2
Sekundární okruh	
Průtok páry při nominálních podmínkách [kg/s]	1780
Teplota/tlak páry [°C / MPa]	286 / 7
Aktivní zóna reaktoru	
Výška aktivní zóny [m]	3,73
Ekvivalentní průměr aktivní zóny [m]	3,16
Počet palivových souborů	163
Počet svazků s absorpčními elementy	121
Množství paliva [t UO ₂]	87
Tlaková nádoba reaktoru	
Vnitřní průměr válcového tělesa [mm]	4250
Tloušťka stěny válcového tělesa [mm]	200
Celková výška [mm]	11185
Hlavní cirkulační čerpadla	
Počet	4
Nominální průtok [m ³ /h]	21500
Kompensátor objemu	
Celkový objem [m ³]	79
Projektový tlak [MPa]	17,6
Parní generátory	
Počet	4
Typ	horizontální s trubkami tvaru U
Maximální vnější průměr [mm]	5100
Celková výška/délka [mm]	13820
Vnitřní hermetická obálka	
Provedení	Předpjatý beton s ocelovou výstelkou
Objem [m ³]	74169
Vnější ochranná obálka	
Provedení	železobeton

Vybrané bezpečnostní otázky – VVER-1200

U reaktoru VVER-1200 jsou vybrané bezpečnostní otázky řešeny takto

1. Havarijní zastavení štěpné reakce

Standardní mechanický systém odstavení reaktoru. Systém zajišťuje pád souboru absorpčních tyčí do AZ, a tím převedení AZ reaktoru do podkritického stavu.

2. Havarijní dochlazování aktivní zóny a 3. Ztráta chladiva

Havarijní dochlazování je řešeno systémy havarijního chlazení, vysokotlakého a nízkotlakého vstříkávání. Systém havarijního chlazení spoléhá v první fázi na množství zásobníků natlakované chladicí vody s koncentrovanou kyselinou boritou, která je v případě nutnosti vstříknuta přímo do reaktoru. V druhé fázi pak na dalších zásobnících, kde je vyšší tlak zajištěn jejich fyzickým umístěním do vyšší polohy.

4. Únik radioaktivních látek do okolí

ochranná obálka – kontejnment, který je u VVER-1200 dvouplášťový s vnější vrstvou o tloušťce 120 cm a vnitřní vrstvou o tloušťce 80 cm železobetonu s regulovatelným předpínáním. Vnitřní povrch je navíc pokrytý ocelovou výstelkou. Kontejnment by tak měl odolat i pádu těžkého letadla typu Boeing 747

5. Vznik vodíku

Hromadění vodíku zabraňují rekombinátory, které katalyzují jeho spalování s kyslíkem za vzniku tepla a vodní páry. Množství a výkonnost rekombinátorů je s ohledem na projektové a nadprojektové havárie.

6. Tavení aktivní zóny

Pro zachycení roztavené aktivní zóny souží u VVER-1200 lapač taveniny Coria. Lapač taveniny je kovová nádoba, která je umístěna pod reaktorem. V něm jsou naskládány kazety se speciální směsí – tzv. „obětní“ látkou. Pokud z nějakého důvodu klasické systémy bezpečnosti jaderné elektrárny selžou a palivo se roztaví, tato tavenina steče do lapače a zůstane tam tak dlouho, jak bude nutné pro odstranění důsledků havárie. V průběhu celé této doby se lapač ochlazuje nezávisle na reaktoru a obětní materiál zastavuje řetězovou reakci.

Lapač taveniny také podstatnou měrou redukuje výskyt vodíku během nehody, což je velmi důležité pro eliminaci rizika výbuchu.

7. Ztráta napájení bezpečnostních systémů

VVER-1200 využívá stejných pasivních a aktivních systémů, zálohovaných dieselgenerátory, jako starší VVER-1000, navíc přidává další pasivní systémy chlazení a odvodu tepla. [10] [15] [17]

Hodnoty pravděpodobnostních ukazatelů u VVER-1200 jsou [10]

CDF: 5.94×10^{-7}

LFR: 1.8×10^{-8}

Systém havarijního sprchování

V projektu VVER-1200 je obsažen rozprašovací systém kyseliny borité, která zastavuje řetězovou reakci. Tento systém je instalován pod střechou reaktorového sálu a zajištěn ventilem citlivým na teplo. Pokud teplota v místnosti stoupne nad normální stav, ventil se roztaví a v důsledku gravitace z nádrží rozprašovacího systému začne vytékat voda. [10] [15] [17]

Systém pasivního odvodu tepla parogenerátory a systém pasivního odvodu tepla z kontejnmentu

Pasivní systém odvodu tepla z reaktoru v případě úplné ztráty el. napájení a i v případě nefunkčnosti systémů záložního napájení. Brání přechodu do nadprojektové havárie. Odebírá teplo z parogenerátorů a odvádí jej do nádrží havarijního odvodu tepla umístěných po obvodu kontejnmentu. Obdobným způsobem odvádí teplo z vnitřku kontejnmentu přes tepelné výměníky do nádrží havarijního odvodu tepla. [10] [15] [17]

3.3.4 Areva - EPR

Projekt tlakovodního reaktoru III.+ generace EPR vychází z francouzských a německých reaktorů N4 a KONVOI. Reaktor EPR je licencován ve Francii, Finsku a Číně, kde probíhá i výstavba nových bloků s tímto typem reaktoru. Licencování dále probíhá v USA a Velké Británii. Certifikaci EUR má od roku 1999. Francouzská energetická společnost EDF počítá s tímto typem reaktoru při obnově svých jaderných elektráren. [8] [9]

Tab. 3 Základní technická data bloku EPR [11]

Celková data	
Výkon, hrubý [MW _e]	1750
Výkon, čistý [MW _e]	1650
Tepelný výkon [MW _t]	4500
Primární okruh	
Počet hlavních cirkulačních smyček	4
Průtok primárním okruhem [m ³ /s]	31,47
Provozní (nominální) tlak [MPa]	15,5
Sekundární okruh	
Průtok páry při nominálních podmínkách [kg/s]	2552
Teplota/tlak páry [°C / MPa]	292,5 / 7,71
Aktivní zóna reaktoru	
Výška aktivní zóny [m]	4,2
Ekvivalentní průměr aktivní zóny [m]	3,767
Počet palivových souborů	241
Počet svazků s absorpčními elementy	89
Množství paliva [t UO ₂]	144
Tlaková nádoba reaktoru	
Vnitřní průměr válcového tělesa [mm]	4870
Tloušťka stěny válcového tělesa [mm]	250
Celková výška [mm]	13722
Hlavní cirkulační čerpadla	
Počet	4
Nominální průtok [m ³ /h]	28320
Kompenzátor objemu	
Celkový objem [m ³]	75
Projektový tlak [MPa]	17,6
Parní generátory	
Počet	4
Typ	vertikální s trubkami tvaru U
Maximální vnější průměr [mm]	5168
Celková výška/délka [mm]	24621
Vnitřní hermetická obálka	
Provedení	Předpjatý beton s ocelovou výstelkou
Objem [m ³]	80000
Vnější ochranná obálka	
Provedení	železobeton

Reaktor EPR se vyznačuje využitím čtyř samostatných bezpečnostních subsystémů označovaných jako divize bezpečnostních prvků. Divize bezpečnostních prvků jsou projektovány se čtyřnásobnou redundancí svých mechanických i elektrických součástí jakož i podpůrných systémů měření a regulace. Výsledkem je, že každá divize těchto prvků dokáže zajistit veškeré bezpečnostní funkce elektrárny zcela samostatně.

Každý bezpečnostní objekt reaktoru EPR obsahuje následující subsystémy:

- vstříkování vody do reaktorové nádoby;
- nouzová napájení parogenerátoru vodou;
- dodávka elektrické energie a systémy kontroly a řízení[8]



Obr. 12 reaktor EPR [8]

Vybrané bezpečnostní otázky - EPR

U reaktoru EPR jsou vybrané bezpečnostní otázky řešeny takto

1. Havarijní zastavení štěpné reakce

Standardní mechanický systém odstavení reaktoru. Systém zajišťuje pád souboru absorpčních tyčí do AZ, a tím převedení AZ reaktoru do podkritického stavu.

2. Havarijní dochlazování aktivní zóny a 3. Ztráta chladiva

Každý ze čtyř dochlazovacích systémů může chladit aktivní zónu pomocí dvou subsystémů: Systému havarijního vstřikování, který chladí přímo aktivní zónu, nejprve ze zásobníku vody s obsahem bóru tvořeného čtyřmi tlakovými hydro-akumulátory a potom z velké nádrže umístěné ve spodní části budovy reaktoru, tzv. vnitrokontejnmentové nádrže na skladování vody pro výměnu paliva.

Systému havarijního napájení, který dokáže prostřednictvím sekundárního okruhu chladit parogenerátor a který využívá čtyř vodních nádrží, jedné v každém z bezpečnostních objektů. Tyto nádrže pak lze doplnit vodou z požární nádrže.

4. Únik radioaktivních látek do okolí

Kontejnment je dvouplášťový s vnějším pláštěm z armovaného betonu a vnitřním pláštěm z předpjatého betonu se silnou kovovou výstelkou na vnitřním povrchu. Hermetická zóna reaktoru EPR je navržena se záměrem omezit radiologické důsledky havárie pro okolní obyvatelstvo. Tyto důsledky se snižují díky kovové výstelce, která brání radioaktivnímu materiálu v úniku a také díky mezikruhovému prostoru mezi dvojitým betonovým pláštěm reaktoru, ve kterém zůstanou všechny plynné odpady pod kontrolou.

5. Vznik vodíku

Při závažné havárii by se do prostoru ochranné obálky mohlo uvolnit velké množství vodíku. Proto je vnitřní plášť obálky zhotovený z předpjatého betonu a navrženy tak, aby odolal tlakům, které by mohly vznícením vodíku vzniknout. Součástí ochranné obálky je také katalytický rekombinátor vodíku, který brání hromadění vodíkového plynu a předchází riziku jeho vznícení.

6. Tavení aktivní zóny

Součástí reaktoru EPR je prostor k rozprostření materiálu z aktivní zóny, v němž se tavenina ze zóny zadrží, aby nepronikla až k základům budovy. V případě těžké LOCA havárie, kdy dojde k roztavení aktivní zóny a následně i úniku části taveniny z reaktorové nádoby, bude tento nebezpečný materiál pasivními prostředky zadržen a shromážděn. Pomocí vody ze zásobní nádrže v kontejnmentu je pak bezpečně dochlazován ve speciálně vyprojektovaných prostorách budovy ochranné obálky reaktoru.

7. Ztráta napájení bezpečnostních systémů

EPR využívá pasivních a aktivních systémů, zálohovaných dieselgenerátory, jako starší typy reaktorů, navíc přidává další pasivní systémy chlazení a odvodu tepla. [8]

Hodnoty pravděpodobnostních ukazatelů u EPR jsou [8]

CDF: 5.3×10^{-7}

LFR: 2.7×10^{-8}

3.4 Srovnání

Reaktory společností Westinghouse, Areva a konsorcia MIR.1200 přináší oproti stávajícím Temelínským reaktorům značná vylepšení ve všech oblastech. V oblasti bezpečnosti je patrné evoluční vylepšení předchozích konstrukcí i poučení z mimořádných situací a havárií.

Všechny tři návrhy přidávají aktivní, ale zejména i pasivní havarijní systémy chlazení aktivní zóny reaktoru. Zejména unikátní systém společnosti Westinghouse počítá s možností trvalé recirkulace chladících médií uvnitř kontejnmentu bez nutnosti el. napájení a s nutností doplňování chladící vody až po 72 hodinách.

Ztráta chladiva je u všech návrhu řešena množstvím nádrží s chladící vodou využívajících k činnosti gravitace a soustavou havarijních hydroakumulátorů pod tlakem. Tyto systémy v rámci filosofie bezpečnosti reaktorů III. generace nevyžadují ke své činnosti el. napájení.

Odolnější dvouplášťový kontejnment je součástí také všech tří projektů. Společnost Westinghouse počítá u svého reaktoru AP1000 s vnějším betonovým pláštěm, jež má chránit vůči vnějším vlivům a vnitřním kovovým pláštěm, který plní funkci hermetické obálky a je součástí systému chlazení kontejnmentu. VVER-1200 od konsorcia MIR.1200 a EPR od společnosti Areva má vnější i vnitřní plášť z betonu s kovovou výstelkou na vnitřním plášti. Projekty společnosti Westinghouse, Areva a konsorcia MIR.1200 počítají v případě havárie se vznikem nadměrného množství vodíku a jeho uvolňování do kontejnmentu. Ve všech třech projektech je problém vodíku řešen pasivními katalytickými rekombinátory.

Rozdílný přístup je v projektech na problémy s tavením aktivní zóny. Zatímco AP1000 od

Westinghouse řeší chlazení taveniny a její zadržení uvnitř nádoby reaktoru, EPR od Arevy má vyprojektované prostory na lapení a dochlazování taveniny. VVER-200 od MIR.1200 má lapač taveniny s obětním materiálem, který taveninu naředí, zastavuje štěpnou reakci a snižuje vývin vodíku.

Všechny návrhy počítají s možným výpadkem el. napájení a mají redundantní počet záložních dieselgenerátorových zdrojů v oddělených prostorách. Navíc využívají, oproti předchozím generacím, větší množství pasivních systémů, které využívají fyzikálních principů jako je gravitace, přirozené proudění, rozdíl tlaků, apod. a nepotřebují ke své činnosti napájení el. proudem.

Projekt AP1000 společnosti Westinghouse využívá především pasivních bezpečnostních systému. Pasivními systémy řeší i těžké havárie. MIR.1200 u svého reaktoru VVER-1200 využívá kombinace pasivních a aktivních bezpečnostních systémů. EPR od společnosti Areva se spoléhá spíše na aktivní bezpečnostní systémy.

V hodnocení pravděpodobnostními ukazateli jsou na tom všechny tři projekty obdobně v četnosti poškození aktivní zóny (CDF). V četnosti velkého úniku radioaktivních látek a ionizujícího záření (LFR) je na tom VVER-1200 nejlépe, následuje EPR a pak AP1000. Rozdíly ale nejsou veliké, řádově jsou na tom stejně. Všechny projekty přísluší ke III.+ generaci a vykazují výrazné zlepšení v obou parametrech oproti reaktoru II. generace VVER-1000

Tab 4. Srovnání pravděpodobností CDF, LFR [8] [10] [13] [16]

	JETE 3,4 VVER-1000	Westinghouse AP1000	MIR.1200 VVER-1200	Areva EPR
CDF - četnost poškození aktivní zóny	3.32×10^{-5}	5×10^{-7}	5.94×10^{-7}	5.3×10^{-7}
LFR - četnost velkého úniku do životního prostředí	4.4×10^{-6}	6×10^{-8}	1.8×10^{-8}	2.7×10^{-8}

Tab 5. Srovnání řešení vybraných bezpečnostních otázek [8] [10] [13] [16]

	JETE 3,4 VVER-1000	Westinghouse AP1000	MIR.1200 VVER-1200	Areva EPR
Havarijní zastavení štěpné reakce	Standardní mechanický systém - pád absorpčních tyčí do AZ	Standardní mechanický systém - pád absorpčních tyčí do AZ	Standardní mechanický systém - pád absorpčních tyčí do AZ	Standardní mechanický systém - pád absorpčních tyčí do AZ
Havarijní dochlazování aktivní zóny	Aktivní a pasivní systémy doplňování. Aktivní odvod tepla parogenerátory	Pasivní systém chlazení AZ + pasivní systém chlazení kontejnmentu	Aktivní a pasivní systémy doplňování. Aktivní + pasivní systém odvodu tepla parogenerátory	Aktivní a pasivní systémy doplňování. Aktivní odvod tepla parogenerátory
Ztráta chladiva	Pasivní a aktivní systémy doplňování	Pasivní systémy doplňování	Pasivní a aktivní systémy doplňování	Pasivní a aktivní systémy doplňování
Únik radioaktivních látek do okolí	Železobetonový kontejnment s předpjatého betonu. Vnitřní ocelové pokrytí	Dvouplášťový kontejnment. Vnější plášť - železobeton. Vnitřní plášť - ocelová nádoba	Dvouplášťový kontejnment. Vnější plášť - železobeton. Vnitřní plášť - předpjatý železobeton s ocelovou výstelkou	Dvouplášťový kontejnment. Vnější plášť - železobeton. Vnitřní plášť - předpjatý železobeton s ocelovou výstelkou
Vznik vodíku	Bude dovybaven systémem odvodu vodíku z kompenzátoru objemu	Katalitické rekombinátory	Katalitické rekombinátory	Katalitické rekombinátory
Tavení aktivní zóny	Zachycení pouze kontejnmentem	Chlazení taveniny přímo v reaktorové nádobě. Zaplavení dutiny pod reaktorem	Lapač taveniny s obětní látkou. Chlazení tepelným výměníkem lapače.	Lapač taveniny. Chlazení vodou ze zásobní nádrže
Ztráta napájení bezpečnostních systémů	Zálohování dieselgenerátory (3x100% , rozšiřuje se na 4x100%)	Spoléhá na pasivní systémy. Nesystémové dieselgenerátory (2x100%)	Zálohování dieselgenerátory (4x100%)	Zálohování dieselgenerátory (4x100%)

4 Závěr

Základní otázka dostavět JE Temelín či nikoliv se v podstatě rovná otázce volby cesty, po které se státní energetické koncepce vydá. Jaderná energetika představuje jednu z nejvýhodnějších cest pro zajištění energetické bezpečnosti státu a bylo by chybou se jí zříci z důvodů politického tlaku zájmových skupin. Výběrové řízení společnosti ČEZ na dostavbu JE Temelín bylo zrušeno. Zde je prostor pro stát, aby nové výběrové řízení zaštil jasně definovanou dlouhodobou energetickou koncepcí a podporou v rámci Evropské Unie.

Tato práce si neklade za cíl fundovaně rozhodnout, který z projektů je ze stran bezpečnosti výhodnější, jelikož to je zcela mimo přípustný rozsah bakalářské práce a vyžadovalo by analýzy o několika set stranách a práci týmů několika desítek lidí. V případě, že bude projekt dostavby jaderné elektrárny Temelín opět oživen, na podrobnou analýzu jednotlivých projektů jistě dojde. Otázka bezpečnosti bude také hrát svou roli, ale jelikož je bezpečnost všech tří projektů na obdobné úrovni, bude jen částí ke konečnému výběru. Pravděpodobně daleko větší důraz budou mít ekonomické aspekty, jako je konečná cena projektu, úroveň zapojení místního průmyslu, či jiné výhody, které vítěz tendru poskytne.

5 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BROMOVÁ, Edita, SOVADINA, Michal, VARGONČÍK, Dušan. *Jaderná energie a energetika*. Simopt. 2013. 65s. ISBN 978-80-87851-01-2
- [2] DRÁBOVÁ, Dana, PAČES, Václav, a kol. *Perspektivy české energetiky - Současnost a budoucnost*. Praha: Novela bohemic, 2014. 334 s. ISBN 978-80-87683-26-2.
- [3] WÁGNER, Vladimír. *Česká energetika míří i bez soutěže o Temelín k jádru*. [online]. [Cit. 15.5.2014]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/nazor-ceska-energetika-miri-i-bez-souteze-o-temelin-k-jadru-pai-/veda.aspx?c=A140425_124725_veda_mla
- [4] WÁGNER, Vladimír. *Česko vyváží elektřinu ve velkém. Vyplácí se nám to?* [online]. [Cit. 15.5.2014]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/jak-se-pocita-cena-elektriny-d12-/tec_technika.aspx?c=A140204_234241_tec_technika_mla
- [5] WÁGNER, Vladimír. *Jaderná energetika na prahu roku 2014* [online]. [Cit. 15.5.2014]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=7383>
- [6] WAGNER, Vladimír. *Reaktory III. generace aneb jaké reaktory se staví teď a budou stavět v nejbližších desetiletí*. [cit. 2014-1-27]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/transmutace/generaceIII.htm>
- [7] WÁGNER, Vladimír. *Reaktory III. generace* [online]. [Cit. 15.5.2014]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=3531>
- [8] *Areva česká republika*. [online]. [Cit. 15.5.2014]. Dostupné z: <http://cz.areva.com/>
- [9] *Dostavba elektrárny Temelín*. [online]. [Cit. 15.5.2014]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/zvazovana-dostavba-elektrarny-temelin.html>
- [10] *MIR.1200*. [online]. [Cit. 15.5.2014]. Dostupné z: <http://www.mir1200.cz/>
- [11] *Nový jaderný zdroj v lokalitě Temelín včetně vyvedení výkonu do rozvodny Kočín – Dokumentace vlivů záměru na životní prostředí*. [Cit. 15.5.2014]. Dostupné z: http://media.cez.cz/webdav/storage/videothumb/EIA_NJZ_ETE_final.pdf
- [12] *Souhrn hlavních událostí tendru na dostavbu Temelína*. [online]. [Cit. 15.5.2014]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2014/04/souhrn-hlavnich-udalosti-tendru-na-dostavbu-temelina/>
- [13] *Technické provedení JE Temelín* [online]. [Cit. 15.5.2014]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/technologie-a-zabezpeceni/8.html>
- [14] *Temelín*. [online]. [Cit. 15.5.2014]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete.html>
- [15] *VVER-1200 Reactor Plant and Safety Systems* [online]. [Cit. 15.5.2014]. Dostupné z: http://www.rosatom.ru/en/resources/6fb124004ad7d68ebd14bf283a1923f8/3.2.Fil_Gi_droppress_VVER-1200.pdf
- [16] *Westinghouse AP1000* [online]. [Cit. 15.5.2014]. Dostupné z: <http://ap1000.westinghousenuclear.cz/>
- [17] *Zastřeno na projekt MIR 1200* [online]. [Cit. 15.5.2014]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2013/11/zaostreno-na-projekt-mir-1200/>
- [18] *SDP Litvínov - Reference* [online]. [Cit. 15.5.2014]. Dostupné z: <http://sdplitvinov.cz/stavby-pro-vyrobu-energie-z-obnovitelných-zdroj-1/farma-ve-krystofovy-hamry>
- [19] *Fotovoltaické elektrárny* [online]. [Cit. 15.5.2014]. Dostupné z: <http://www.fotovoltaickepanely.eu/fotovoltaika/nejvetsi-ceske-elektrarny/>
- [20] *Zeměpis pro ZŠ* [online]. [Cit. 15.5.2014]. Dostupné z: <http://zemakrcb.blogspot.cz/2012/11/poznavacka-cr.html>