

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

STAV A LIMITY VÝSTAVBY JADERNÝCH ELEKTRÁREN VE SVĚTĚ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

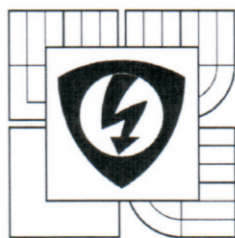
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN NOVÁK

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Martin Novák

Ročník: 3

ID: 125564

Akademický rok: 2011/12

NÁZEV TÉMATU:

Stav a limity výstavby jaderných elektráren ve světě

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Historie vývoje jaderné energetiky.
2. Výstavba JR první generace.
3. I. jaderná éra, reaktory II. generace.
4. Analýza výstavby JR v průběhu jaderné éry; výstavba JR, které jsou nyní v provozu; výstavba posledních let.
5. Popis jednotlivých projektů, které jsou v současnosti ve výstavbě a stručně shrňte projekty ve stádiu přípravy.
6. Definujte rizika a limity výstavby nových jaderných elektráren, zejména s ohledem na havarii na JE Fukušima Dai-iči a německý "phase-out".
7. Rozeberte příčiny zdržení projektů Olkiluoto a Flamanville, stručně také Tian-wan, Kudankulam, Mochovce a Belene.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:




doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

NOVÁK, M. *Stav a limity výstavby jaderných elektráren ve světě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Katovský, Ph.D..

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

STAV A LIMITY VÝSTAVBY JADERNÝCH ELEKTRÁREN VE SVĚTĚ

LIMITS AND A WORLD-WIDE STATUS OF NEW NUCLEAR INSTALLATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN NOVÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAREL KATOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2012

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá rozbořem výstavby jaderných elektráren od počátku jaderné energetiky až po současnou výstavbu. V úvodu této práce jsou uvedeny historické události, které přispěly ke vzniku současné jaderné energetiky. Dále je zde shrnut současný stav jaderné energetiky ve světě a její podíl na celkové výrobě elektrické energie. V úvodu je také provedeno obecné rozdělení jaderných elektráren do generačních stupňů. V rámci výstavby dnes již trvale odstavených, ale také v současnosti provozovaných jaderných elektráren je provedeno rozdělení do dvou generačních stupňů s podrobnějším pohledem na vývoj a výstavbu jednotlivých typů jaderných reaktorů. V práci je charakterizován pojem první jaderná éra s vyhodnocením faktorů ovlivňujících vývoj a výstavbu v různých zemích. Dále je uveden celosvětový stav výstavby jaderných elektráren v současnosti se srovnáním s výstavbou v minulosti. V další části práce je zhodnoceno stáří trvale odstavených a provozovaných jaderných reaktorů s ohledem na jejich obměnu. Jsou zde uvedeny možnosti zvyšování kapacity a délky provozu u jaderných elektráren v provozu. Dále jsou zde uvedeny všechny projekty, které jsou v současné době ve výstavbě. V této práci jsou podrobně rozebrány příčiny zdržení výstavby dvou evropských jaderných elektráren Olkiluoto 3 ve Finsku a Flamanville 3 ve Francii. Vývoj událostí v jednotlivých projektech je zde chronologicky uveden až do současného stavu a je poukázáno na příčiny jejich zpoždění. Součástí podrobného rozboru je i charakterizace jednotlivých aktérů v projektu a jejich rolí. V závěrečné části práce autor popisuje výstavbu některých dalších projektů jaderných elektráren ve světě.

KLÍČOVÁ SLOVA: historie jaderné energetiky; výstavba jaderných elektráren; jaderná éra; stav výstavby; Fukushima; Olkiluoto 3; Flamanville 3; Kudankulam; Tianwan; Mochovce; Belene

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with new nuclear installations from the beginning of nuclear era to the present installations. In the introduction of this thesis are mentioned historical events that led to the current nuclear power engineering. Furthermore, there is summarized the present world-wide state of nuclear energy and its share of the total electrical production. The introduction also contains the basic division of nuclear power plants into generations. Current and past construction of nuclear power plants is divided to the generations with focusing on development and construction of individual nuclear power reactor types. This thesis also characterizes the first nuclear era with evaluation of factors which had influence on development and construction of nuclear power plants in different countries. In next section is a world-wide status of new nuclear installations in comparison with past nuclear installations. The following section contains comparison of age of permanently shutdown reactors and operational reactors with respect to their future replacement. The thesis figures out the possibilities of increasing nuclear power capacity and life extension of nuclear power plants in operation. Furthermore, there is summarization of all projects that are currently in process of construction. This thesis is also focused on analysis of the construction delays of two European nuclear power plants Olkiluoto 3 in Finland and Flamanville 3 in France. Developments in these individual projects are sorted chronologically to the present state with pointing to the cause of delays. The detailed analysis contains the characterization of the main projects participants and their parts in the projects. In the final part of this thesis the author presents a description of construction some other nuclear power plants projects in the world.

KEY WORDS: history of nuclear energy; nuclear power plants construction; nuclear era; construction status; Fukushima; Olkiluoto 3; Flamanville 3; Kudankulam; Tianwan; Mochovce; Belene

OBSAH

OBSAH.....	6
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
1 ÚVOD	11
1.1 HISTORIE JADERNÉ ENERGETIKY	11
1.2 SOUČASNÝ STAV JADERNÉ ENERGETIKY	12
1.3 ROZDĚLENÍ JADERNÝCH ELEKTRÁREN.....	13
2 VÝSTAVBA JR I. GENERACE	15
2.1 LEHKOVODNÍ REAKTORY	15
2.1.1 PWR,VVER.....	15
2.1.2 BWR	15
2.2 PLYNEM CHLAZENÉ REAKTORY.....	16
2.2.1 MAGNOX	16
3 REAKTORY II. GENERACE	17
3.1 LEHKOVODNÍ REAKTORY	17
3.1.1 REAKTORY VVER-440, 1000	17
3.1.2 REAKTORY PWR ZÁPADNÍ KONCEPCE	17
3.1.3 REAKTORY BWR	18
3.1.4 RBMK (LWGR)	19
3.2 TĚŽKOVODNÍ REAKTORY	19
3.2.1 REAKTORY PHWR (CANDU).....	19
3.3 PLYNEM CHLAZENÉ REAKTORY.....	20
3.3.1 AGR.....	20
3.3.2 HTGR	21
3.4 REAKTORY CHLAZENÉ TEKUTÝM KOVEM	21
3.4.1 FBR.....	21
4 VÝSTAVBA JR V PRŮBĚHU I. JADERNÉ ÉRY	23
4.1 PRVNÍ JADERNÁ ÉRA	23
5 CELOSVĚTOVÝ STAV VÝSTAVBY	25
5.1 PRODLUŽOVÁNÍ PROVOZNÍCH LICENCÍ JADERNÁCH ELEKTRÁREN.....	28
5.2 ZVYŠOVÁNÍ KAPACITY JADERNÁCH REAKTORŮ.....	28
5.3 PROJEKTY, KTERÉ JSOU V SOUČASNOSTI VE VÝSTAVBĚ	28
5.4 BUDOUCNOST JADERNÉ ENERGETIKY	29
6 DOPAD FUKUSHIMSKÉ JADERNÉ HAVÁRIE	30
6.1 DOPAD NA CENU	30

6.2 DOPAD NA NOVOU VÝSTAVBU JE	30
7 PŘÍČINY ZDRŽENÍ JEDNOTLIVÝCH PROJEKTŮ	32
7.1 VÝSTAVBA JADERNÉ ELEKTRÁRNY OLKILUOTO 3 VE FINSKU	32
7.1.1 SOUČASNÝ STAV JADERNÉHO PRŮMYSLU VE FINSKU	32
7.1.2 REGULAČNÍ PROCES JADERNÝCH ZAŘÍZENÍ VE FINSKU	33
7.1.3 PROJEKT OLKILUOTO 3 (OL3)	33
7.1.4 PŘÍČINY ZPOŽDĚNÍ PROJEKTU OLKILUOTO 3	34
7.2 VÝSTAVBA JADERNÉ ELEKTRÁRNY FLAMANVILLE 3 VE FRANCII	36
7.2.1 SOUČASNÝ STAV JE VE FRANCII	36
7.2.2 PROJEKT FLAMANVILLE 3 (FL 3)	37
7.2.3 PŘÍČINY ZPOŽDĚNÍ PROJEKTU FLAMANVILLE 3	38
7.3 VÝSTAVBA JE KUDANKULAM V INDII	39
7.4 VÝSTAVBA JE TIANWAN V ČÍNĚ	40
7.5 VÝSTAVBA JE MOCHOVCE 3,4 NA SLOVENSKU	41
7.6 VÝSTAVBA JE BELENE V BULHARSKU	42
8 ZÁVĚR	44
POUŽITÁ LITERATURA	45

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1 Jaderné reaktory podle typu a jejich elektrický výkon (květen 2012) [5][17]</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 1.2 Celkový podíl elektrické energie vyrobené z jaderných zdrojů v jednotlivých zemích. (květen 2012) [5]</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 1.3 Časově zařazené generační rozdělení jaderných elektráren [19]</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 2.1 Principiální schéma reaktoru PWR [30]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2.2 Principiální schéma reaktoru BWR [30]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2.3 Principiální schéma reaktoru MAGNOX [32]</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3.1 Principiální schéma reaktoru RBKM (LWGR) [30]</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3.2 Principiální schéma reaktoru PHWR (CANDU) [30]</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3.3 Principiální schéma reaktoru AGR [30]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3.4 Principiální schéma reaktoru HTGR [30]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3.5 Principiální schéma reaktoru FBR [31]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 4.1 Počet zahájených staveb reaktorů a počet připojení reaktorů k síti [5]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4.2 Světová spotřeba primárních zdrojů energie. [9]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 5.1 Počet v současnosti provozovaných reaktorů, které budou v provozu v období 2010-2058. [5]</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 5.2 Stáří všech 139 reaktorů, které jsou již trvale odstaveny (květen 2012) [5]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 5.3 Stáří všech reaktorů, které jsou v současnosti v provozu (květen 2012) [5]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 6.1 Počet zahájených staveb JE [5]</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 7.1 Podíl JE na výrobě elektřiny ve Finsku (za rok 2011) [5]</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 7.2 Regulační proces jaderných zařízení ve Finsku [36]</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 7.3 Podíl JE na výrobě elektřiny ve Francii (za rok 2011) [5]</i>	<i>36</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 7-1 Důležité události v projektu OL3 [38]</i>	34
<i>Tab. 7-2 Hlavní aktéři a jejich role v projektu OL3</i>	35
<i>Tab. 7-3: Důležité události v projektu FL3 [43]</i>	37
<i>Tab. 7-4 Hlavní aktéři a jejich role v projektu FL3</i>	38
<i>Tab. 7-5 Důležité události výstavby JE Kudakulam [44]</i>	39
<i>Tab. 7-6 Důležité události výstavby JE Tianwan</i>	40
<i>Tab. 7-7 Důležité události výstavby JE Mochovce 3, 4 [50]</i>	41
<i>Tab. 7-8 Důležité události výstavby JE Belene</i>	42

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

(A) BWR	(Advanced) Boiling Light Water Cooled And Moderated Reactor (Pokročilý) Vroucí vodou chlazený a moderovaný reaktor
(A) PWR.....	(Advanced) Pressurized Light Water Cooled and Moderated Reactor (Pokročilý) Tlakovou vodou chlazený a moderovaný reaktor
FBR	Fast Breeder Reactor Rychlý množivý reaktor
GCR (AGR).....	(Advanced) Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor (Pokročilý) Plynem chlazený, grafitem moderovaný reaktor
HTGR	High Temperature, Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor Vysokoteplotní, plynem chlazený, grafitem moderovaný reaktor
LWR	Light Water Cooled and Moderated Reactor Lehkou vodou chlazený a moderovaný reaktor
LWGR	Light Water Cooled, Graphite Moderated Reactor Lehkou vodou chlazený a grafitem moderovaný reaktor
PHWR	Pressurized Heavy Water Cooled and Moderated Reactor Tlakovou těžkou vodou chlazená a moderovaný reaktor
RBMK	Reaktor Bolšoj Moščnosti – Kanálny Kanálový reaktor velkého výkonu (Ruské označení pro sovětský reaktor typu LWGR)
VVER	Vodovodjanoj energetičeskij reaktor Vodo-vodní energetický reaktor (Ruské označení pro reaktor typu PWR)
CANDU	Canada Deuterium Uranium Reaktor kanadské konstrukce pro stěpení přírodního uranu.
JE ..	Jaderná elektrárna

1 ÚVOD

Jaderná energie je čistým zdrojem energie, který neprodukuje oxid uhličitý nebo jiné skleníkové plyny. Z tohoto vyplývá, že je zde minimální negativní dopad na životní prostředí a tím i zvyšuje možnost zlepšení kvality vzduchu tam, kde jsou elektrárny spalující fosilní paliva. Velkou předností jaderné energetiky je i dostatek surovin pro výrobu paliva, kdy při světové zásobě ekonomicky dostupných jaderných paliv mohou bez recyklace tyto zásoby vystačit na 85 let, při využití rychlých reaktorů s recyklovaným palivem až na 2,5 tisíce let. Důležitým faktorem je i to, že základní surovina, Uran, leží v politicky stabilních oblastech světa, zejména v Austrálii a v Kanadě.

1.1 Historie jaderné energetiky

Jako počátky jaderné energetiky lze brát významné fyzikálně-chemické objevy na začátku 20. století ve výzkumných laboratořích po celém světě. Tento počátek nového energetického směru započali vědci z Evropy a Spojených států amerických svými postupnými objevy mezi roky 1920 až 1930. Postupně odhalili strukturu jednotlivých prvků, dynamiku jádra a subatomárních částic. Na základě všech těchto poznatků se v lednu roku 1939 podařilo dvěma německým chemikům, Otto Hahnovi a Fritzi Strassmanovi, rozdělit atom uranu na dva nebo více lehčích prvků. Objevili tedy nový typ jaderné reakce - štěpení. Jejich rakouská kolegyně Lisa Meinerová experimentálně ukázala, že se při tomto štěpení jádra uranu uvolní velké množství energie, tedy energie, která drží jádro pohromadě. Brzy poté maďarský fyzik Leo Szilard pracující v New Yorku experimentálně prokázal, že v procesu štěpení uranu pomocí neutronu se vždy emitují další neutrony, které se dále srážejí s jiným jádrem uranu, tedy možnost řetězové štěpné reakce. V květnu roku 1939 ve Francii tento experiment zopakovala skupina vědeckých uprchlíků¹ z různých zemí Evropy a vytvořila několik patentů ve využití řetězové štěpné reakce, a to jak v civilní, tak vojenské oblasti.

Jako prvním na světě se podařilo v prosinci roku 1942 uskutečnit řízenou štěpnou řetězovou reakci² italskému fyzikovi Enrico Fermimu z univerzity v Chicagu. Až v šedesátých letech 20. století byla pozornost soustředěna na výzkum a vývoj technologií pro civilní výrobu elektřiny a pro pohony vodních plavidel. V prosinci 1951 byla vyrobena první elektřina z nukleárního zdroje. Tímto zdrojem byl rychlý množivý reaktor EBR-1³, který byl sestaven v NRTS⁴ ve státě Idaho, USA. Na konci roku 1953 vydal prezident Spojených států amerických Dwight D. Eisenhower spolu s Organizací spojených národů prohlášení o mírovém využití nukleární energie, která vyústila v mezinárodní kooperaci a přispěla tedy k rychlejšímu světovému rozvoji jaderné energetiky. V červnu roku 1954 byl v Sovětském svazu v Obninsku uveden do provozu první prototyp jaderné elektrárny⁵, který byl posléze úspěšně připojen na elektrickou síť. Téhož roku vyplula v USA i první jaderná ponorka Nautilus.

V následujících letech se na elektrickou síť připojily v různých zemích další jaderné elektrárny a to v roce 1956 Calder Hall-1 s GCR ve Velké Británii, elektrárna Shippingport s reaktorem PWR v USA v roce 1957. Roku 1959 následovala elektrárna G-2 ve Francii s GCR

¹ Jean a Irene Joliot-Curie, Hans Halban, Leo Kowaleski

² V rámci projektu Manhattan. Jaderný grafitový reaktor CP-1.

³ Experimental Breeder Reactor-1. Výkon zhruba 100 kW.

⁴ National Reactor Testing Station

⁵ Urano-grafitový kanálový reaktor chlazený lehkou vodou. Výkon pouze 5MW.

reaktorem o výkonu 38 MW. Také byl spuštěn na vodu první ledoborec Lenin v SSSR. S přibývajícím množstvím jaderných elektráren také rapidně rostl i celkový podíl ve světové spotřebě primární energie. Strmost tohoto růstu byla ovlivněna několika faktory, především však ekonomickými a politickými.

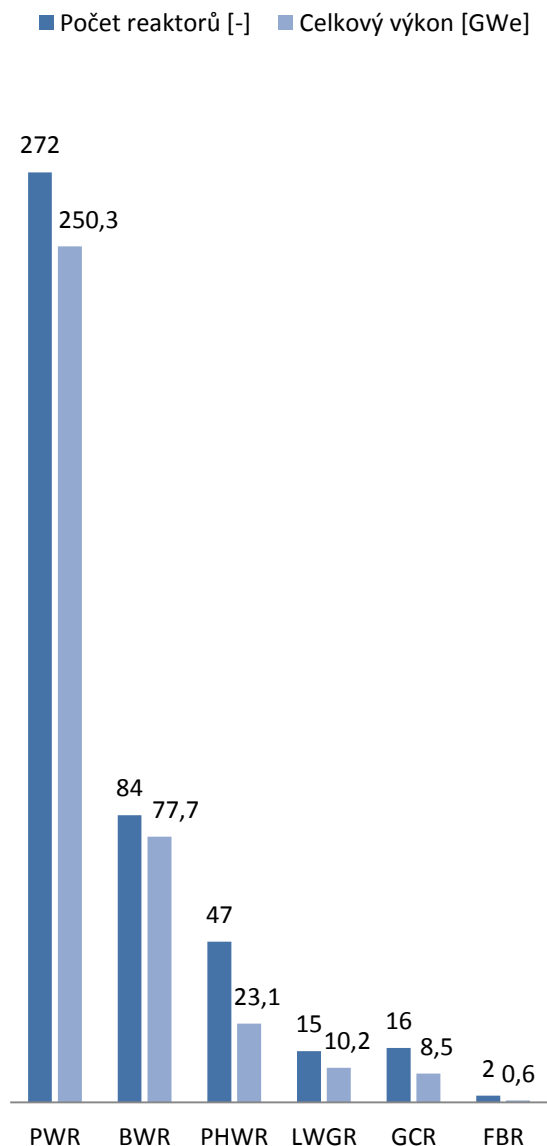
1.2 Současný stav jaderné energetiky

Na začátku roku 2012 je v provozu 436 reaktorů ve 30 zemích po celém světě. Celkový hrubý instalovaný výkon dosahoval hodnoty 370,5 GWe. Tyto reaktory poskytují 13,5 % z celkové světové výroby elektřiny. Dnešní průměrný výkon na instalovanou jednotku se blíží 1000 MWe. V současné době je ve výstavbě 62 nových reaktorů o celkovém výkonu 59,2 GWe. [5]

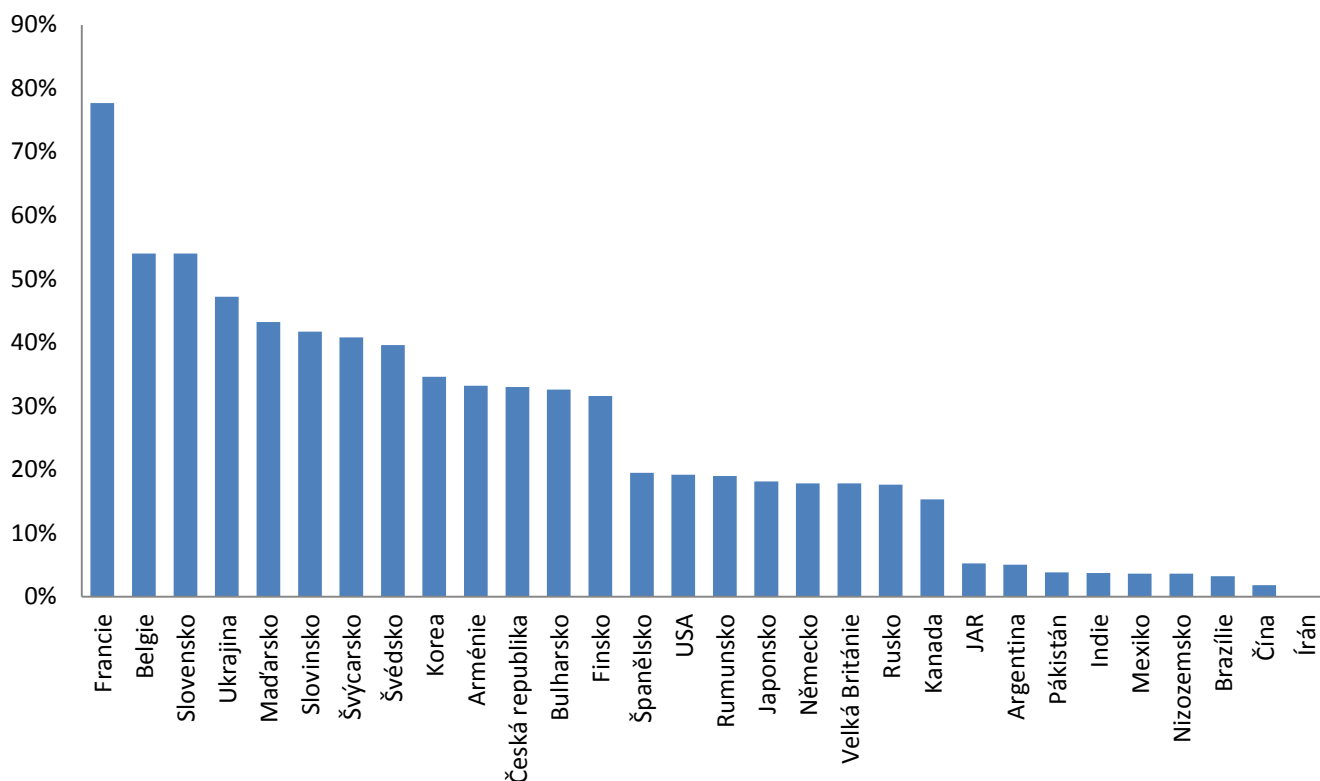
Zastoupení jednotlivých typů lze vidět na Obr. 1.1., z tohoto vyplývá převaha tlakovodních reaktorů s 67 % zastoupením z celkového výkonu. Druhým nejrozšířenějším typem je varný reaktor s 21 %. Na všechny ostatní typy jaderných reaktorů tedy zbylo pouhých 12 %, a když od tohoto čísla odečteme majoritní 6,5 % podíl těžkovodních reaktorů, zbývá na ostatní typy pouhých 5,5 %. [5]

Na Obr. 1.2 můžeme vidět rozdílné podíly vyrobené jaderné energie v jednotlivých zemích světa. Francie je tedy zemí, ve které jsou jaderné elektrárny hlavním zdrojem elektrické energie. Z hlediska nejvyššího počtu provozovaných energetických reaktorů drží prvenství stále USA se 104 reaktory o výkonu 101,4 GWe. USA v současné době staví pouze 1 nový reaktor a v tomhle pohledu je její jaderná energetika spíše v útlumu než v rozmachu. Celkově spolupracuje a využívá jadernou energii 56 států. [5]

Pořadí prvních 8 jaderných velmocí s nejvyšším počtem provozovaných jaderných reaktorů tedy v současnosti vypadá takto: USA, Francie, Japonsko, Rusko, Jižní Korea, Indie, Kanada, Velká Británie. Z hlediska vyrobené elektrické energie dodávané do sítě se nemění pořadí pouze prvních čtyř zemí.



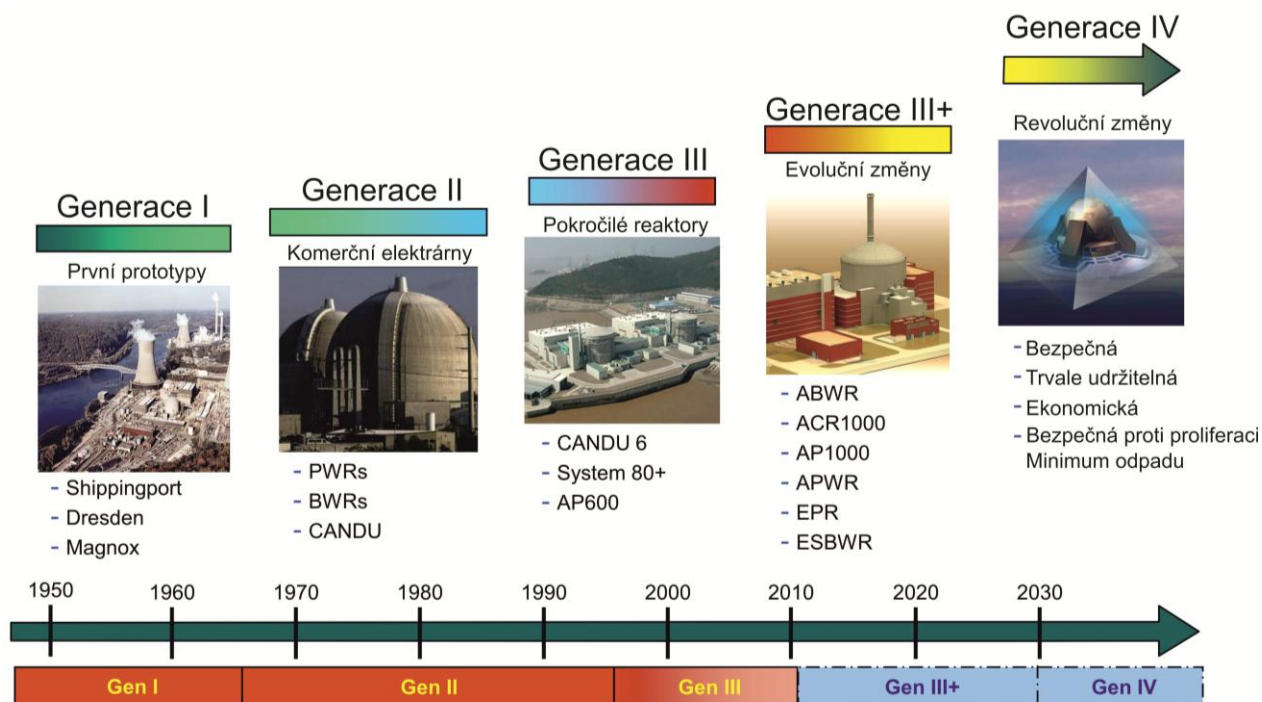
Obr. 1.1 Jaderné reaktory podle typu a jejich elektrický výkon (květen 2012) [5][17]



Obr. 1.2 Celkový podíl elektrické energie vyrobené z jaderných zdrojů v jednotlivých zemích. (květen 2012) [5]

1.3 Rozdělení jaderných elektráren

Podle současného a nejpoužívanějšího rozlišení se dělí veškeré jaderné elektrárny do pěti od sebe rozdílných skupin (Obr. 1.3). Toto rozdělení však nelze brát jako zcela správné a přesné, neboť některé jednotky představují určitý přechod mezi jednotlivými generacemi. Např. jaderná



Obr. 1.3 Časově zařazené generační rozdělení jaderných elektráren [19]

elektrárna Temelín vychází z projektu reaktorů druhé generace, avšak má několik rysů jaderných elektráren III. generace. Do první generace se zařazují průmyslové prototypy komerčních reaktorů postavené v průběhu 50. až 60. let minulého století. Druhou a zároveň nejvíce zastoupenou generaci tvoří v současnosti provozované komerční elektrárny PWR, BWR, CANDU, VVER, RBMK, aj. tvořící základ dnešní jaderné energetiky. III. generaci tvoří pokročilé reaktory vznikající v 90. letech minulého století s mnoha vylepšeními, a to ekonomickými i bezpečnostními. Největší počet těchto jaderných elektráren je ve Východní Asii. Současné vylepšování systémů III. generace vedlo ke vzniku III+. generace, které jsou nyní ve výstavbě nebo se o jejich výstavbě v jednotlivých zemích uvažuje. IV. generace je vyvíjena jako budoucí jaderně energetický systém schopný vyrábět dostatečně hospodárně, bezpečně, s minimálním jaderným odpadem. Také by měl pokrýt energetické potřeby rychle se množící lidské populace. Velké nároky pak kladou na snížení prvotních investic, především pomocí sériové výroby určitých komponent jaderných bloků. Posledním, ale ne méně důležitým, požadavkem je odolnost proti proliferaci.

2 VÝSTAVBA JR I. GENERACE

2.1 Lehk vodní reaktory

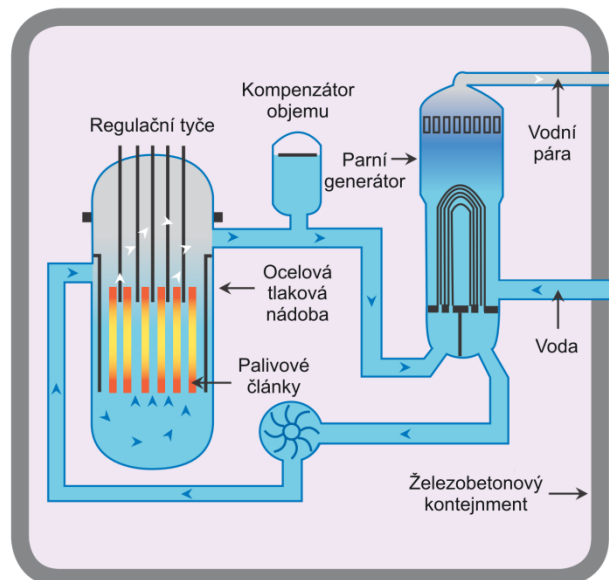
2.1.1 PWR, VVER

Vývoj tlakovodních reaktorů byl zahájen v USA a první prototyp jaderné elektrárny s tímto reaktorem zahájil provoz v roce 1957 (JE Shippingport o výkonu 100 MWe). Zanedlouho byla spuštěna i demonstrační elektrárna Yankee o výkonu 134 MWe, a to v roce 1961. Demonstrační elektrárny s PWR se stavěly v průběhu šedesátých let v Itálii (Seln, 1964), Francii (Sena, 1966), Německu (Obrigheim, 1968) a v dalších zemích. Vývoj a výstavba reaktorů PWR dosáhla velmi rychle stavu, kdy z prototypových demonstračních elektráren bylo možno vytvořit projekt pro průmyslovou výrobu a výkon vzrostl rychle až na 1300 MWe.

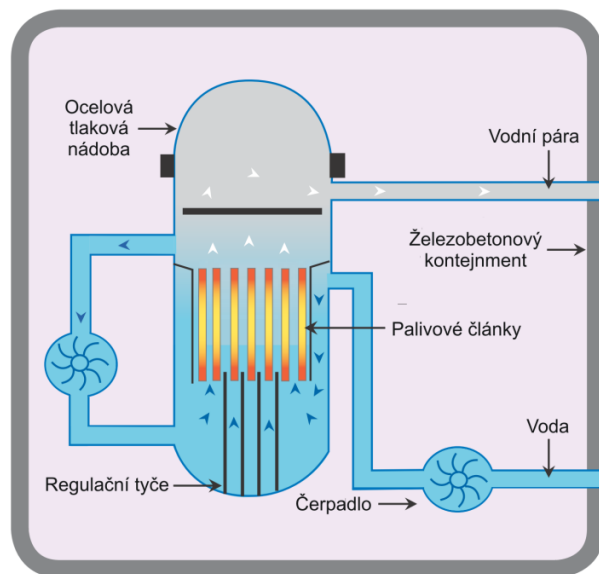
V Rusku byla v srpnu 1959 zahájena výstavba první sovětské jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem VVER o elektrickém výkonu 210 MWe (VVER-210). Za pět let od zahájení výstavby již byl první blok NJE¹ připojen k elektrické síti.

2.1.2 BWR

Ke vzniku varných reaktorů přispěla myšlenka vyrábět vodní páru přímo v aktivní zóně a tím zjednodušit systém přenosu tepelné energie k turbíně generátoru jaderné elektrárny. V padesátých letech byl na půdě USA založen rozsáhlý výzkumný program BORAX, který měl za úkol zkoumat chování reaktoru při změně skupenství vody v aktivní zóně. Pozitivní zkušenosti z provozu experimentálního amerického varného reaktoru EBWR v roce 1956 byly později potvrzeny provozem prototypových elektráren v USA (Dresden-1, 1960) a v Německu (Kahl, 1961). Varné reaktory se vyvíjely velice rychle a jako jediný druh dnes dokáže konkurovat tlakovodním reaktorům.



Obr. 2.1 Principiální schéma reaktoru PWR [30]



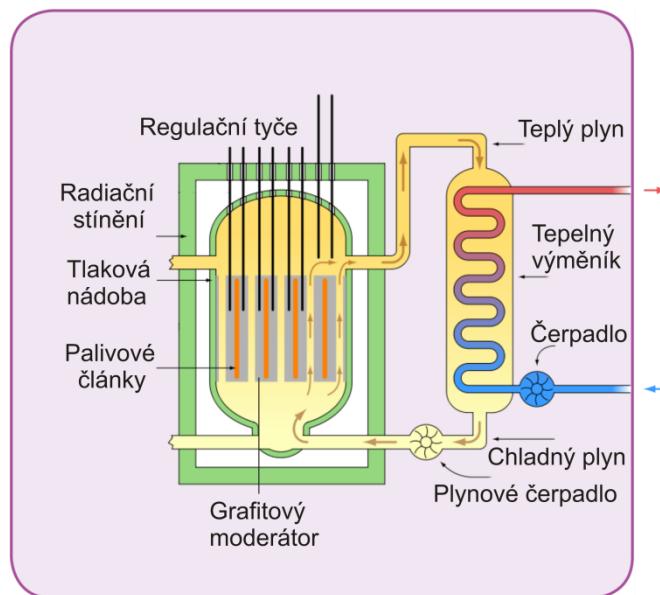
Obr. 2.2 Principiální schéma reaktoru BWR [30]

¹ Novovoronežská JE

2.2 Plynem chlazené reaktory

2.2.1 MAGNOX

V roce 1955 vláda Velké Británie schválila zcela ojedinělý komerční program pro výstavbu jaderných elektráren o celkovém elektrickém výkonu 1400 až 1800 MWe z reaktorů typu Magnox, který byl po Suezské krizi v roce 1956 navýšen až na 6000 MWe. Prvním z osmi prototypových reaktorů tohoto typu byl roku 1956 reaktor v komerční jaderné elektrárně Calder Hall. Tento reaktor byl ve své době jedinou a dostatečně rychlou odpovědí na Suezskou krizi pro Velkou Británii, především z důvodu použitého moderátoru, paliva a díky dalším přírodním zdrojům (přírodní neobohacený uran, grafit jako moderátor, oxid uhličitý pro přenos tepla atd.). Ze začátku měl tento typ velice nízkou tepelnou účinnost (22%). Celkově se ve Velké Británii v průběhu let 1956 až 1971 připojilo 26 reaktorů typu Magnox. Dnes jsou v provozu pouze 2 reaktory Wylfa 1, 2. Z tohoto typu poté vycházeli pokročilé plynem chlazené reaktory AGR. První prototyp AGR byl postaven v roce 1962 ve Windscale.



Obr. 2.3 Principiální schéma reaktoru
MAGNOX [32]

3 REAKTORY II. GENERACE

Tyto reaktory navazují na předchozí prototypy jaderných reaktorů první generace, které byly z velké části stavěny jako kusové prototypy. Většina těchto reaktorů je již mimo provoz. Jako výjimku můžeme brát GCR typu Magnox ve Velké Británii, které končí provozní licence v roce 2012. Většina reaktorů, které jsou v současnosti v provozu, jsou tedy JE II. generace. Tyto elektrárny se již stavěly v sériích, ale každá se svým vlastním projektem a konstrukcí. Principiálně se však jednalo o na sebe navazující projekty.

3.1 Lehkovodní reaktory

3.1.1 Reaktory VVER-440, 1000

Blok **VVER-440** vznikl jako standardizovaný sovětský projekt reaktoru V-213 (typové označení reaktoru) na základě zkušeností s provozem reaktoru I. generace V-230. Jeho bezpečnostní prvky do značné míry vycházeli z požadavků západních zemí. Např. maximální projektová havárie LOCA (prasknutí hlavního cirkulačního potrubí), veškeré jednotky obsahovaly lokalizační havarijní systém (kromě finské jaderné elektrárny Loviisa s kontejnmentem s potlačením tlaku byly všechny jednotky vybaveny barbotážní věží a sprchovými systémy), nouzové dochlazovací systémy byly rozděleny do tří fyzicky separovaných a na sobě nezávislých tras, primární okruh i parní generátory s velkou zásobou vody (zmírňování průběhu přechodového procesu při havárii)

VVER-440 druhé generace bylo spuštěno 18 reaktorových bloků v Rusku (JE Kola 3, 4), Ukrajině (JE Rovno 1, 2), Finsku (JE Loviisa 1, 2), České republice (4 bloky JE Dukovany), Maďarsku (4 bloky JE Paks) a na Slovensku (JE Bohunice V2 1, 2). V současné době probíhá dostavba 2 bloků JE Mochovce, které by měli v letech 2013, 2014 přejít do zkušebního provozu. [5]

Z prvního prototypu **VVER-1000** označeném jako V-187 se vyvinuli jednotky V-302 a V-320. Tyto dva typy mají oproti předchozí generaci např. cirkulační smyčky oddělitelné uzavíracími armaturami, palivové články s pláštěm kazety aj. V současnosti je v provozu pouze jedna jednotka typu V-302 na Ukrajině (South Ukraine-1). Většina reaktorů VVER-1000 je tedy typu V-320. V roce 2011 je v provozu 21 bloků druhé generace (Bulharsko: Kozdoloduy-5, 6; Česká republika: Temelin 1, 2; Rusko: Bakalovo 1-4, Rostov 1, 2; Ukrajina: Khmelnitsku 1, 2, Rovno 3, 4, South Ukraine 3, Zaporozhe 1-6), v dostavbě pak ještě 2 bloky v Rusku (Rostov 3, 4). [5]

3.1.2 Reaktory PWR západní koncepce

Od spuštění první americké demonstrační jednotky Yankee v r. 1961 se základní koncepce těchto reaktorů nezměnila. V průběhu první jaderné éry na vývoji spolupracovali americké firmy Westinghouse, Bobcock-Wilcox a Combustion Engineering. Ostatní výrobci mimo USA vycházeli z koncepce reaktoru od firmy Westinghouse. Jedinou výjimkou byl německý reaktor Mülheim-Kärlich, který vyrobila firma Brown-Boveri ve spolupráci s firmou Babcock-Wilcox. Největším producentem těchto JE byla firma Westinghouse v sedmdesátých letech, kdy uváděla do provozu i 8 reaktorových bloků ročně. V dalších letech ovšem tuto bilanci značně ovlivnila havárie druhého bloku elektrárny Three Mile Island v roce 1979. Průměrný výkon těchto reaktorů překročil 1000 MWe. V osmdesátých a devadesátých letech 20. století se francouzský Framatome přiblížil ve výstavbě jaderných reaktorů americké firmě Westinghouse.

Vývojovou řadu PWR od firmy Westinghouse lze rozdělit do 4 výkonových řad 500 MWe (8 bloků), 700-800 MWe (8 bloků), 985-1149 MWe (9 bloků). Tento vývoj začal na začátku 60. let a výkon se zvyšoval s počtem smyček. 2, 3 i 4 smyčkové uspořádání již mělo své standardizované komponenty. Celý vývoj vyvrcholil standardizovaným projektem SNUPPS¹, podle kterého byly po roce 1970 staveny 4 smyčkové PWR na JE v USA (např. JE Callaway, JE Wolf Creek, ale i JE Sizewell B ve Velké Británii). [27]

PWR firmy Combustion Engineering² má 2 vývojové stupně a to Systém 80 a Systém 80+. Systém 80 byl prvním standardizovaným provedením PWR v USA se 100 % opakovatelností všech dílů. Systém 80+ s větším výkonem 1300 MWe je založen na projektu APR1400 vyvíjeném v Koreji pro budoucí vývoj a export. [27]

PWR od firmy Areva (Framatome) má výkonovou řadu 900 MWe (3 smyčkové uspořádání), 34 téměř identických bloků stojí ve Francii a 7 bloků mimo Francii (Belgie, Jižní Afrika, Jižní Korea, Čína). Další řadou je 1300 MWe (4 smyčkové uspořádání), která využívá veškerých poznatků z 3 smyčkových uspořádání, 20 reaktorů tohoto typu bylo postaveno ve Francii. 1500 MWe je posledním vývojovým stupněm se 4 smyčkovým uspořádáním a je doposud největším provozovaným PWR na světě, ve Francii JE Chooz-B 2 bloky a JE Civaux 2 bloky. [27]

Nejvýkonnější řady od jednotlivých výrobců lze považovat za JE III. generace.

3.1.3 Reaktory BWR

Jako typický představitel komerčního provedení jaderné elektrárny s BWE lze považovat JE Dresden-2, který byl uveden do provozu v USA roku 1970. Tento projekt je zdokonalením reaktoru I. generace Dresden-1. Oproti tomuto prototypu se podařilo firmě General Electric (GE) zčtyřnásobit elektrický výkon, ale fyzické rozměry se zvýšily pouze o 20%. Na vývoji BWR reaktorů se nejvíce podílely americká společnost General Electric (GE), japonští výrobci Hitachi a Toshiba, švédská firma Asea-Atom a italští konstruktéři. Z této spolupráce se podařilo vyvinout ABWR. Tento projekt byl realizován výstavbou dvou bloků jaderné elektrárny Kashiwazaki. První blok byl uveden do provozu v roce 1996 a druhý o rok později. Jednalo se o první jednotky reaktorů III. generace.

BWR je ve světě druhý nejrozšířenější typ reaktoru. V současné době je v provozu 84 bloků o celkovém výkonu 77,7 GWe. Průměrný čistý elektrický výkon na jeden blok je tedy přibližně 900 MW. Nyní je tento typ reaktoru provozován v 9 zemích a to: USA (35 bloků o celkovém výkonu 34 GWe), Japonsko (26 bloků, 25 GWe), Švédsko (7 bloků, 6,5 GWe), Tchaj-wan (4 bloky 3,1 GWe) Finsko, Německo, Mexiko, Indie, Švýcarsko po dvou blocích. [5]

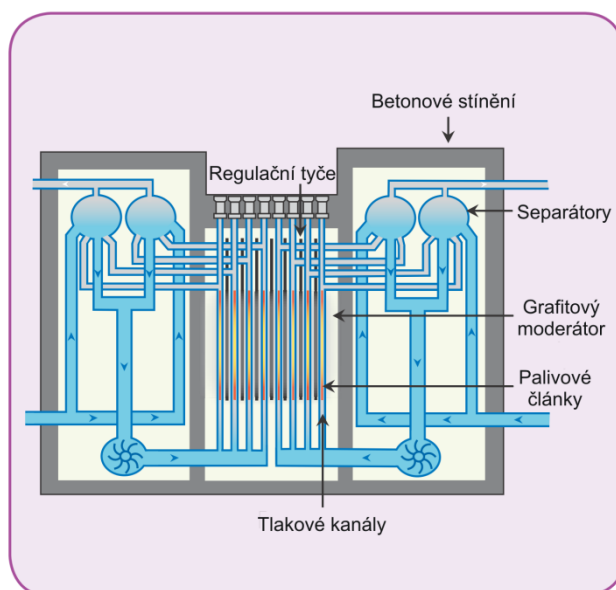
Na budoucí výstavbu a provoz JE tohoto typu, ale i ostatních JE má jistě vliv Fukushima jaderná havárie v březnu roku 2011. Důležité ovšem je zmínit příčinu a tedy dosud největší zaznamenané zemětřesení v Japonsku a následnou vlnu tsunami. Jednalo se tedy o živelnou pohromu.

¹ Standart Nuclear Unit Power Plant System

² V roce 2010 byl Nuclear Business zakoupen firmou Westinghouse

3.1.4 RBMK (LWGR)

První reaktor tohoto typu byl v první jaderné elektrárně Obninsk v roce 1954 v bývalém SSSR. Ovšem první reaktory o dostatečném výkonu byly postaveny v Belayarsku. Z těchto reaktorů se rychle vyvinuly dva projekty o elektrickém výkonu 1000 MWe a dva o výkonu 1500 MWe. Tento velice rychlý vývoj byl umožněn především tím, že tento typ reaktoru nemá velkou tlakovou nádobu, která byla v té době technologicky náročná na výrobu. Dalším faktorem, který ovlivnil rychlost přechodu reaktoru z prototypu do komerčního využití, bylo použité palivo ve formě přírodního nebo slabě obohaceného uranu ve formě oxidu uraničitého. Po Černobylské havárii v roce 1986 zastaven další vývoj a výstavba tohoto reaktoru. Jediná JE s tímto typem reaktoru ve výstavbě je JE Kursk 5, pravděpodobnost dostavby je však téměř nulová. V současné době je tedy v Rusku v provozu 11 reaktorových bloků RBMK o čistém elektrickém výkonu 11 GWe, a to v JE Kursk 1-4, JE Leningrad 1-4 a JE Smolensk 1-3. Všechny tyto bloky mají výkon 1000 MWe. [5]

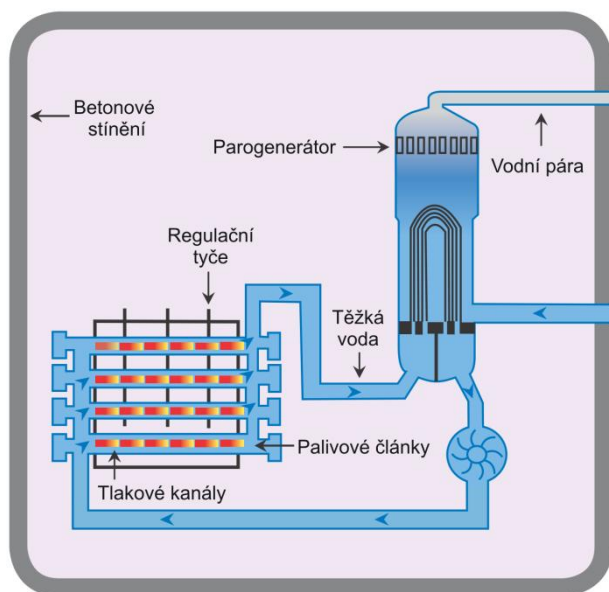


Obr. 3.1 Principiální schéma reaktoru RBKM (LWGR) [30]

3.2 Těžkovodní reaktory

3.2.1 Reaktory PHWR (CANDU)

Tento těžkovodní reaktor byl vyvinut v Kanadě, kde byl výzkum zahájen již v roce 1945. Jde o reaktor moderovaný a chlazený těžkou vodou v horizontálních tlakových kanálech, ve kterých se jako palivo používá přírodní uran. Kanada se tedy snažila vyhnout závislosti jaderné energetiky na zahraničních dodávkách obohaceného uranu. První experimentální reaktor ZEEP¹ byl spuštěn v roce 1945 o dva roky později pak reaktor NRX² o tepelném výkonu 47 MW a ve své době nejvyšší hustotou neutronového toku. V roce 1957 byla tato výzkumná základna doplněna reaktorem NRU o tepelném výkonu 95 MW, který umožnil výstavbu malé



Obr. 3.2 Principiální schéma reaktoru PHWR (CANDU) [30]

¹ Zero Energy Experimental Pile

² National Reactor Experiment

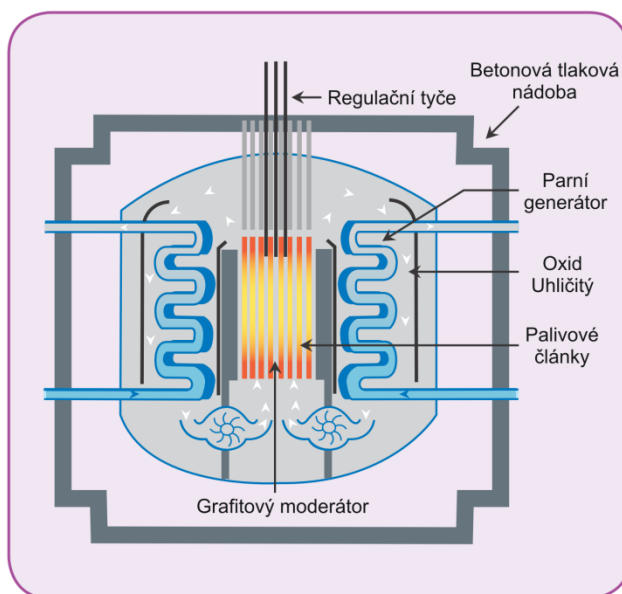
demonstrační elektrárny NDP¹. Tato malá elektrárna (elektrický výkon 22 MWe) byla spuštěna v roce 1962 ve městě Rolphton v Ontariu. Větší prototyp o výkonu 200 MWe byl uveden do provozu v roce 1967. Z těchto dvou prototypů vychází projekty všech současných kanadských těžkovodních reaktorů typu CANDU.

Za jadernou elektrárnu HWR II. generace lze považovat JE Pickering A. Tato elektrárna se začala stavět v roce 1965 a poslední čtvrtý blok byl spuštěn v roce 1973. Celkový elektrický výkon přes 2000 MWe. V roce, kdy byla připojena k síti tato elektrárna, dosáhla pozoruhodného součinitele využití, kdy jednotlivé bloky dosáhly hodnot 93,7 %, 86 % a 90 %. V roce 1971 byla zahájena výstavba další kanadské elektrárny Bruce s tímto typem reaktoru. O kanadský těžkovodní reaktor projeví zájem i některé další země, které požadovali nezávislost na zahraničních dodávkách obohaceného uranu. V Kanadě je v současné době v provozu 18 reaktorů o celkovém výkonu 12,6 GWe. Ve světě pak provozuje tento typ reaktoru Pákistán (Kanupp 125 MWe), Argentina (JE Embalse- 600 MWe), Jižní Korea (Wolsong 1-4 597-708 MWe), Čína (Qinshan 3 1, 2 2x650 MWe) a také v Rumunsku (Cernavoda 1, 2 2x650 MWe). V Indii je v provozu celkově 17 reaktorů typu PHWR o výkonu 3,8 GWe, který principiálně vychází z typu CANDU. Průměrný výkon na jednotlivý blok v Indii tedy dosahuje pouhých 230 MWe. [5]

3.3 Plynem chlazené reaktory

3.3.1 AGR

Reaktor tohoto typu vycházel z britského prototypu AGR² o výkonu 30 MWe, který dodával energii do sítě v letech 1963 až 1981. Oproti typu Magnox má vyšší tepelnou účinnost (okolo 40%) díky vysoké teplotě chladiva (přes 600°C). Tento reaktor byl vyvíjen výhradně pro komerční využití. Komerční elektrárny s reaktory AGR pak byly stavěny s dvěma bloky o výkonech 620-660 MWe. Celkově bylo postaveno 7 jaderných elektráren mezi roky 1970 až 1980. V současnosti jsou tedy ve Velké Británii v provozu reaktory Dungeness B 1, 2 (2x545 MWe), Hartlepool 1, 2 (2x545 MWe) Heysham I. 1, 2 (2x580 MWe), Heysham II. 1, 2 (2x615), Hinkley point B 1, 2 (2x610 MWe) ten však pracuje pouze na 70% tedy 420 MWe, Hunterston B 1, 2 (2x610 MWe) také na 70%, Toness 1, 2 (2x625 MWe). [28]



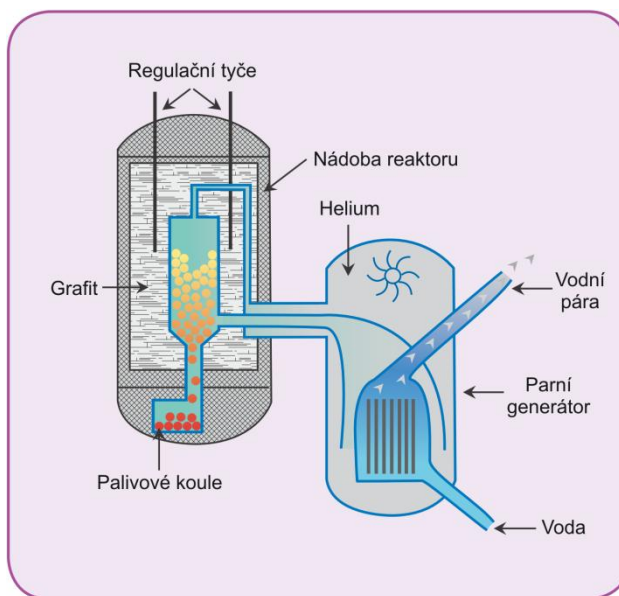
Obr. 3.3 Principiální schéma reaktoru AGR [30]

¹ Nuclear Power Demonstration Station

² Windscale Advanced Gas-cooled Reactor

3.3.2 HTGR

Za první generaci vysokoteplotních plynem chlazených reaktorů a tedy první experimentální reaktory tohoto druhu lze považovat jednotky Dragon (Velká Británie), Peach Bottom-1 (USA), AVR 15 (Německo). Reaktor Dragon byl prvním prototypem tohoto typu vůbec. Výstavba začala roku 1959 jako mezinárodní projekt Evropské organizace pro Ekonomickou spolupráci a byl uveden do provozu v roce 1965 a o rok později dosáhl svého maximálního tepelného výkonu 20 MW. Tento reaktor ukončil provoz v březnu 1976. Souběžně s tímto projektem byly stavěny i dva experimentální reaktory v Německu a USA. Výstavba AVR 15 začala v roce 1961 v KFA jaderném výzkumném středisku v Jülichu a maximálního elektrického výkonu 15 MWe bylo dosaženo v roce 1966 a o rok později byl připojen k veřejné síti. Za 21 let svého provozu tento reaktor vyrobil 1,67 bilionů kWh elektrické energie. První americký reaktor HTGR Peach Bottom dosáhl kritického stavu v březnu 1966 a do komerčního provozu byl uveden v červnu 1967. Z ekonomických důvodů byl trvale odstaven roku 1974. Za dobu svého komerčního provozu vyrobil 1385 GWh elektrické energie.



Obr. 3.4 Principiální schéma reaktoru HTGR [30]

Za mezník výstavby HTGR můžeme považovat JE Fort St. Vrain-1 v USA. Tato JE měla elektrický výkon 330 MWe a v provozu byla deset let. Německá JE THTE 300 s kulovými palivovými články o výkonu 300 MWe byla v provozu 13 let. Tyto JE jsou dnes již trvale odstaveny a takto krátké doby provozu byly zapříčiněny ryze ekonomickými důvody, protože je provoz tohoto typu JE zatím vysoce finančně náročný. Budoucnost reaktoru dnes spočívá v jeho využití jako zdroje tepla v neelektrické spotřebě primární energie a v průmyslových technologických procesech (využití helia o teplotě 950°C v různých průmyslových procesech).

3.4 Reaktory chlazené tekutým kovem

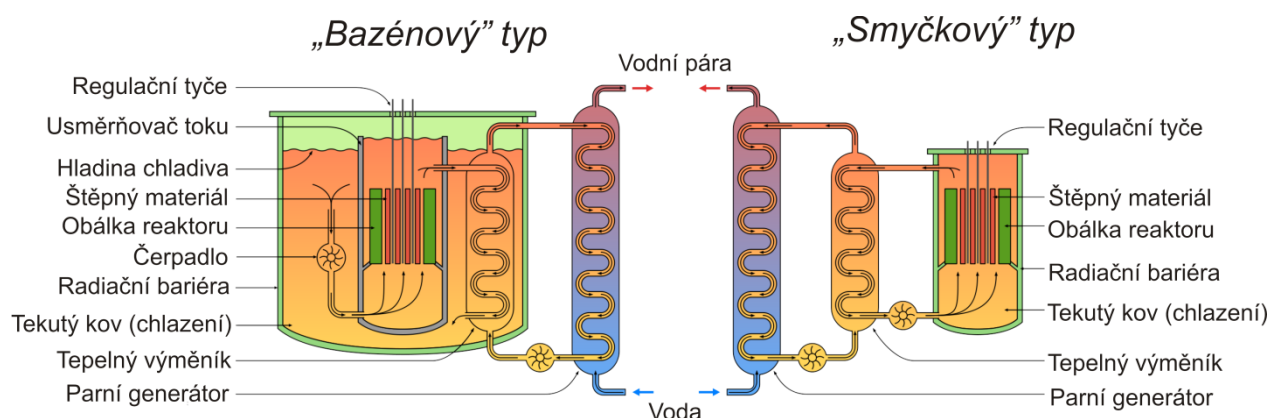
3.4.1 FBR

Tyto reaktory jsou velice perspektivním typem, neboť je reálnou odpovědí na řešení energetických problémů v příštím století. Především díky možnosti využívání přírodních zdrojů jaderných paliv. Ovšem oproti ostatním typům jsou základní problémy v inženýrské oblasti a tyto technické problémy můžou řešit jen technicky nejvyspělejší země světa. Na rozdíl od odlišných typů tepelných reaktorů, kde se projevovala mezinárodní konkurence, je vývoj těchto FBR ve všech zemích velice podobný.

Prvním experimentálním reaktorem tohoto typu, který dokázal generovat elektrickou energii, byl americký EBR 1 (v provozu 1951-1963, 200 kW_e). Komerčním typem potom byla JE Enrico Fermi 1 (v provozu 1966-1972), krátký provoz byl zapříčiněn havárií v roce 1966

(ztráta chlazení). Tento americký program pokračuje výstavbou několika nových testovacích reaktorů v Arkansasu (SEFOR¹), Agonne (TREAT²) a Hanfordu (FFTF³)

O evropský rozvoj FBR se zasadily především ve Velké Británii, Francii, Německu a Rusku. UKAEA vybudovala několik výzkumných reaktorů např. reaktor DFR⁴ (14 MWe, trvale odstaven 1959). Následoval reaktor PFR⁵ s elektrickým výkonem 254 MWe, který byl připojen k elektrické síti v roce 1975 a trvale odstaven byl až roku 1994. Ve Francii byl postaven podobný prototyp Phénix (255 MW, 1973-2010), který následoval Super-Phénix (1200 MWe, 1986-1998). V Japonsku byl postaven prototyp MONJU (280 MWe), který je již delší dobu odstaven. Komerční FBR, které jsou v současnosti v provozu: Čína (CEFR 20 MWe) a Rusko (BN-600, Beloyarsky 3, 560 MWe).[10]



Obr. 3.5 Principiální schéma reaktoru FBR [31]

¹ Southwet Experimental Fast Oxide Reactor

² Transient Reactor Test Experiment

³ Fast Flux Test Facility

⁴ Dounreay Fast Reactor

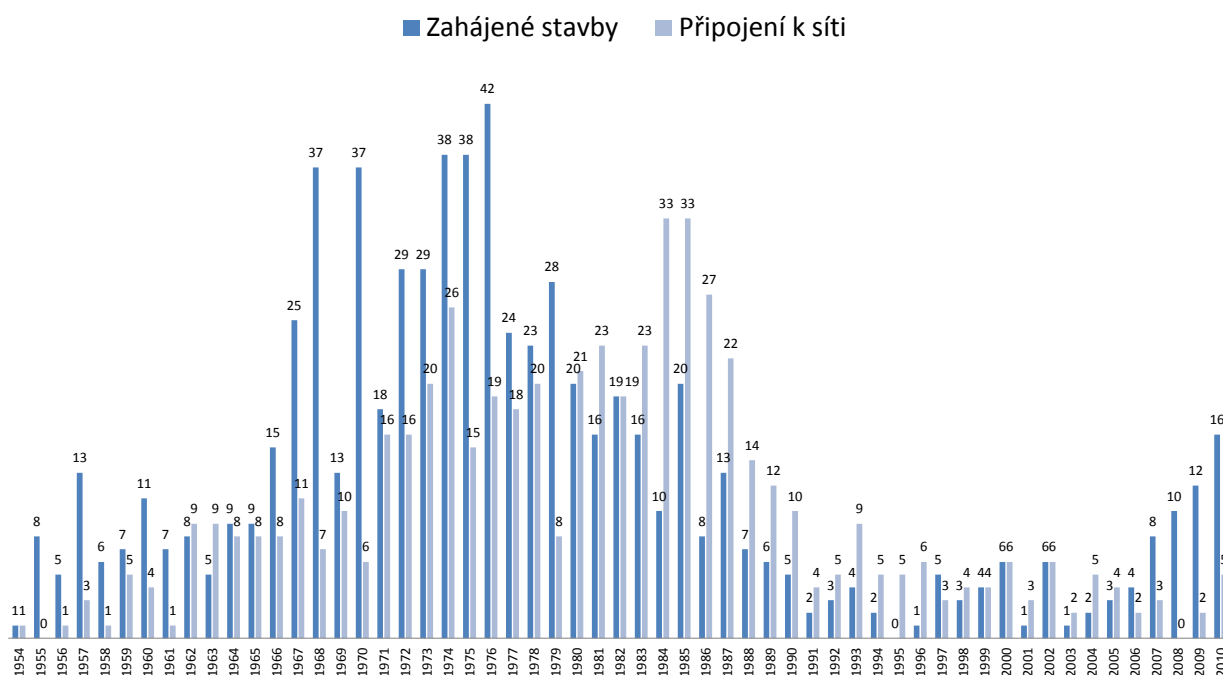
⁵ Prototype Fast Reactor

4 VÝSTAVBA JR V PRŮBĚHU I. JADERNÉ ÉRY

4.1 První jaderná éra

Za 1. jadernou éru lze považovat obrovský rozvoj jaderné energetiky v druhé polovině minulého století. V počátcích rozvoje bylo hlavním důvodem pro výstavbu energetických reaktorů výroba plutonia pro vojenské účely. V tomto období byla postavena řada reaktorů moderovaných grafitem¹. V amerických a ruských reaktorech byla k odvodu tepla použita voda. V britských a francouzských jednotkách byl použit oxid uhličitý². Tento rozdíl značně poznamenal další vývoj v jednotlivých zemích.

Dalším faktorem ovlivňující počáteční vývoj byl přístup k obohacovacím kapacitám. Velké jaderné velmoci se soustředily na použití obohaceného uranu, naopak snaha o co nejvyšší nezávislost na obohacovacích kapacitách vedla v Kanadě a Velké Británii k vývoji reaktorů na přírodní neobohacený uran. Hrozba nedostatku fosilních paliv, na kterých byla a je většina zemí závislá, vedla k výstavbě jaderných elektráren. Především ve Velké Británii v důsledku Suezské krize, kde se odehrál ojedinělý rozvoj tehdy nejjednoduššího a nejbezpečnějšího typu, plynem chlazeného reaktoru s přírodním uranem, moderovaný grafitem³. Tento typ byl v průběhu činnosti zdokonalován a jako důkaz o úspěchu této koncepce lze brát, že většina těchto britských reaktorů pracuje ještě dnes.



Obr. 4.1 Počet zahájených staveb reaktorů a počet připojení reaktorů k síti [5]

¹ USA: NPR, Velká Británie: 4 bloky 50MWe Chapelcross, Francie: 2 bloky 39MWe a 6 bloků 100MWe .

² Nedostatek kvalitní čisté vody ve Velké Británii

³ GCR

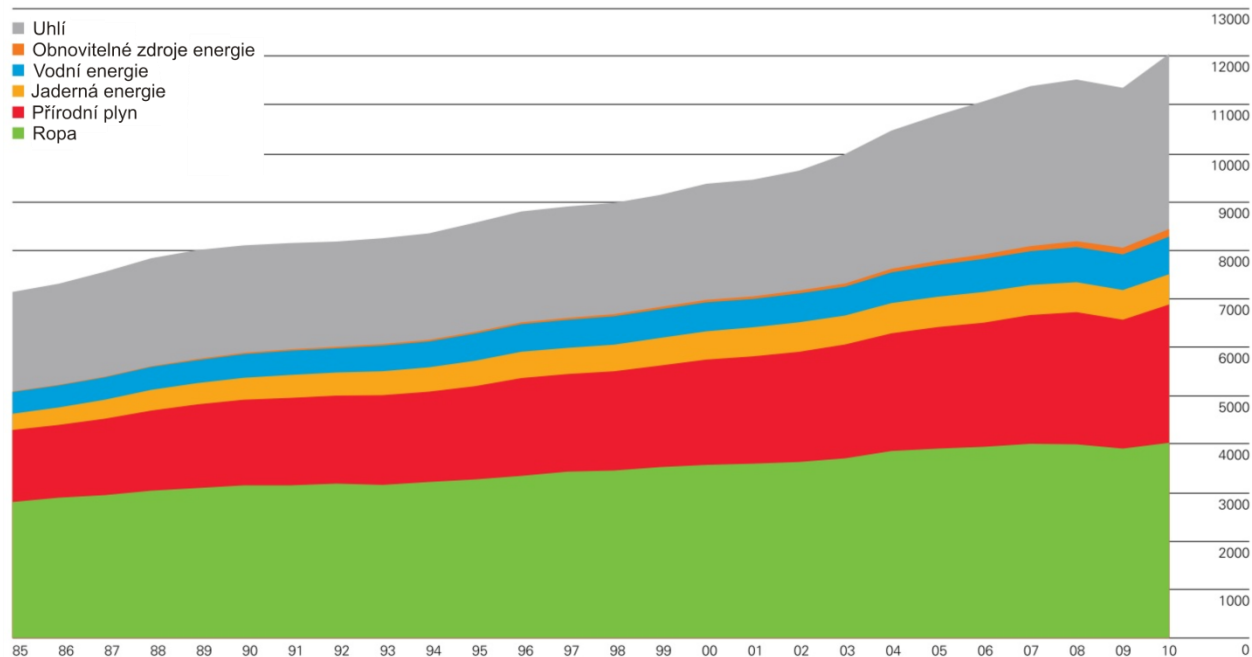
Dostatek levných a kvalitních fosilních paliv v USA a SSSR umožnil navrhnout koncepci jaderné energetiky s daleko delší perspektivou a širokou základnou. V USA byl tedy v prvním desetiletí vývoj soustředěn na prototypy reaktorů jako optimálního zdroje blízké budoucnosti. Výstavba grafitových reaktorů¹ ve Velké Británii a ve Francii vrcholí v šedesátých letech a maximální zastoupení tohoto typu reaktoru je v roce 1965 s 54% podílem. Toto prvenství skončilo roku 1971, kdy jeho celkový podíl postupně klesá až na 17%. To především díky lehkovodním reaktorům², jejichž podíl dosahuje téměř 70 %. Tyto reaktory jsou moderovány a chlazený vodou. Dalším komerčně využitým typem byl sovětský grafitový reaktor s tlakovými kanály chlazený vodou a těžkovodní reaktor kanadského typu³. Sedmdesátá léta se vyznačují velkým rozvojem jaderných elektráren s tlakovodními a varnými reaktory⁴. Jejich zastoupení v jaderné energetice rostlo rovnoměrně.

Později od roku 1980 se již začal více prosazovat tlakovodní reaktor a jeho podíl dodnes neustále narůstá. Nejlepší roky první jaderné éry lze zařadit do období 1967 až 1987, kdy počet zahájených staveb jaderných elektráren je v průměru 23 za rok (Obr. 4.1) a dosavadní maximum bylo roku 1976, kdy počet postavených jaderných jednotek dosáhl čísla 42. [17]

I přes veškeré počáteční ambice všech zúčastněných stran se jaderná energie v bilanci světových primárních zdrojů energie prosazuje pomalu (Obr. 4.2).

Světová spotřeba

Ekvivalentní energii milionu tun ropy (1 toe = 11,63 kWh)



Obr. 4.2 Světová spotřeba primárních zdrojů energie. [9]

¹ GCR a ACR

² LWR

³ LWGR a HWR

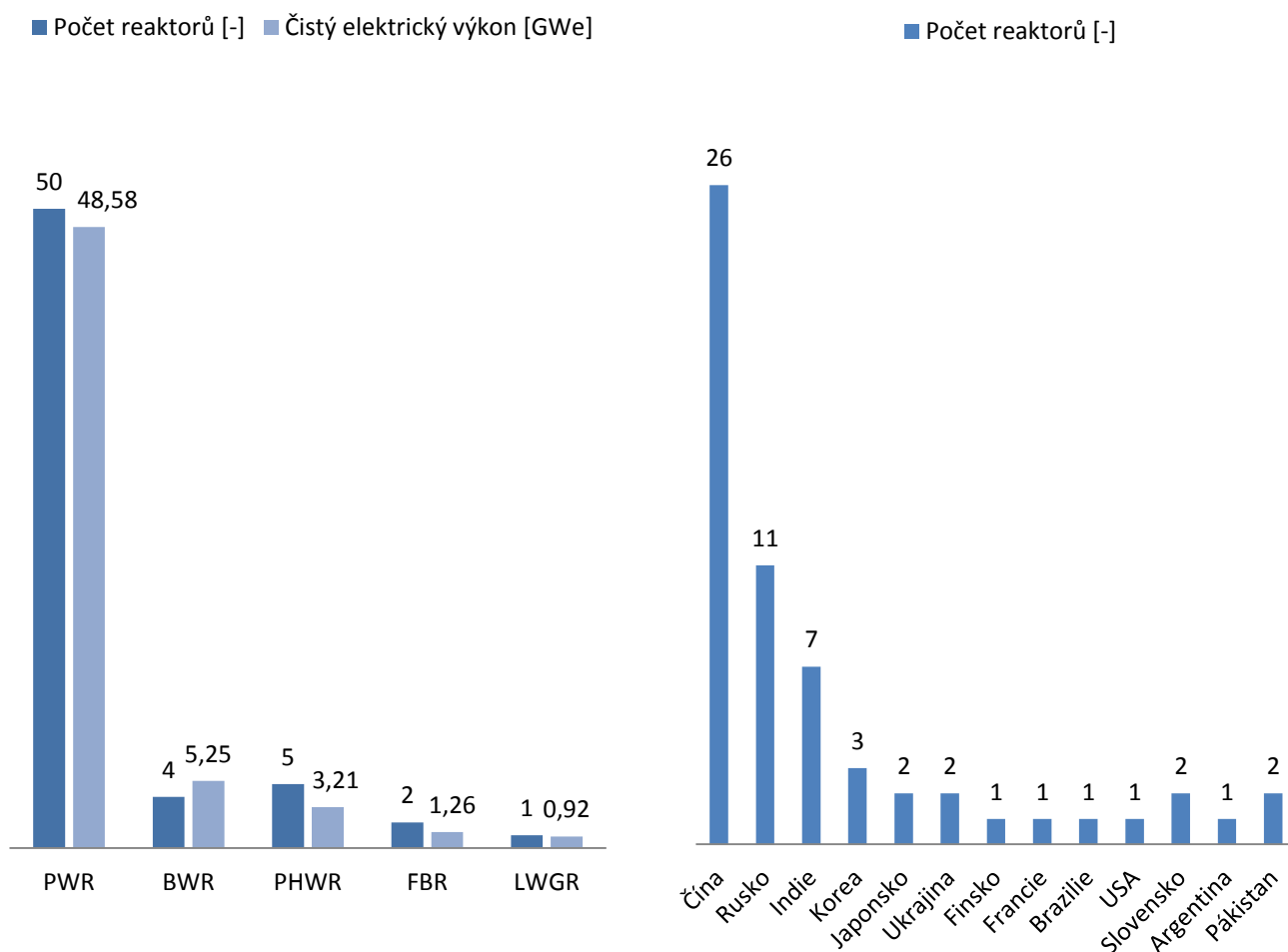
⁴ PWR a BWR

5 CELOSVĚTOVÝ STAV VÝSTAVBY

V současné době kapacita připojených i nových jaderně-energetických zdrojů roste. Není to však dramatický růst. Momentálně je ve světě ve výstavbě 62 nových jaderných jednotek o výkonu 59,2 GWe ve 13 zemích s průměrnou hodnotou elektrického výkonu na jeden blok 950 MWe. Především zásluhou asijských zemí, Číny a Indie, s velkou populační explozí, kde je požadavek na nové zdroje energie v krátkodobém časovém úseku. Mezi země s největším počtem rozestavěných JE patří také Rusko, které v současnosti staví 11 nových jaderných bloků. [5]

Majoritní podíl ve výstavbě nových jaderných jednotek drží podle očekávání tlakovodní reaktory (50 bloků o celkovém výkonu 48,58 GWe). Dále jsou ve výstavbě 4 bloky BWR (5,25 GWe) a 5 bloky PHWR (3,21 GWe), (Obr. 5.). [5]

K dalšímu zvyšování a udržení výkonové kapacity patří také rozsáhlé modernizace stávajících jaderných elektráren a prodlužování provozních licencí (především v USA).



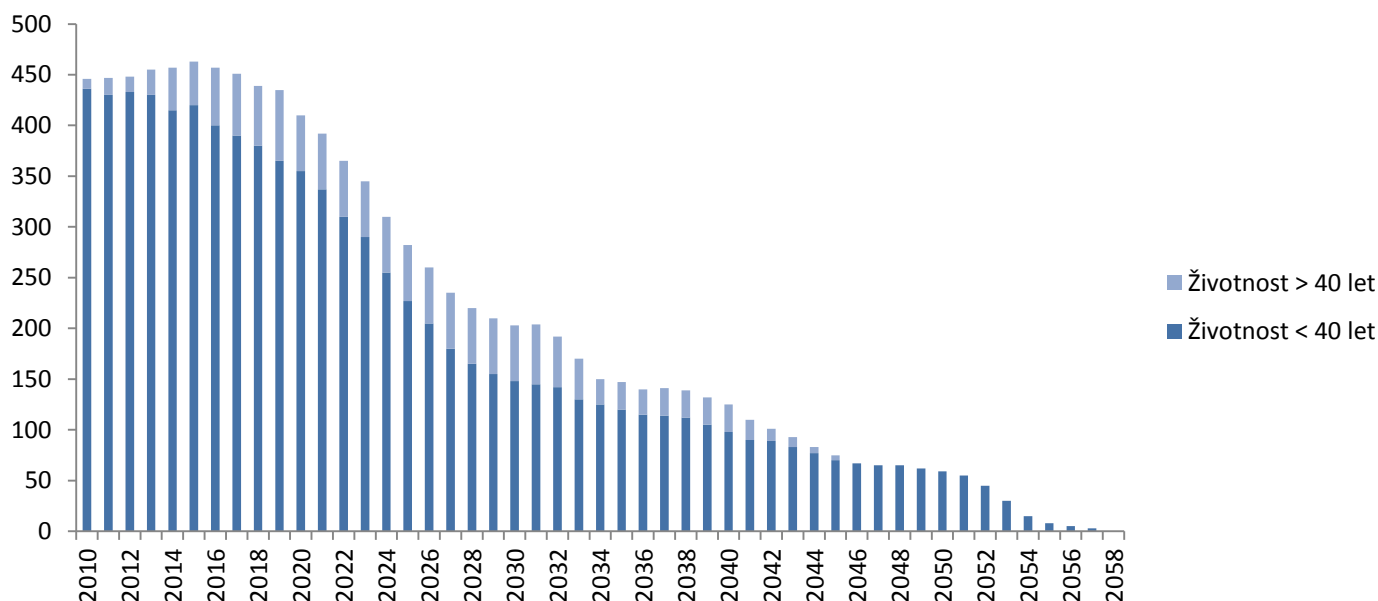
Obr. 5.1 Reaktory ve výstavbě podle typu
(květen 2012) [5]

Obr. 5.2 Reaktory ve výstavbě podle zemí
(květen 2012) [5]

Pro srovnání je vhodné uvést, že na konci roku 1987 vedla IAEA 120 jednotek jako reaktory ve výstavbě a na vrcholu výstavby JE v roce 1979 to bylo 233 jednotek o výkonu více než 200 GW. V roce 2004 bylo ve výstavbě už jen 26 reaktorů, což bylo nejméně reaktorů ve výstavbě od začátku jaderné éry v 50. letech.

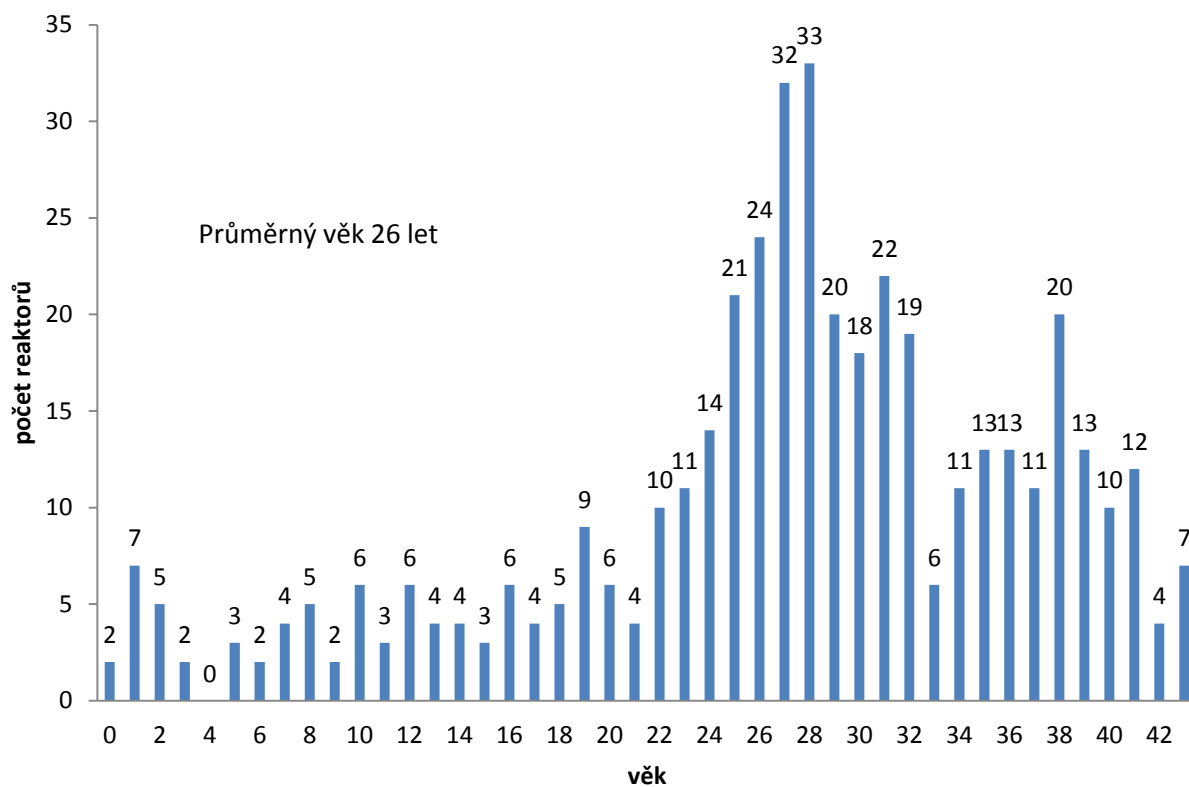
S absencí většího počtu nově postavených reaktorů a nových připojení k elektrické síti se průměrný věk JE v provozu neustále zvyšuje a momentálně dosahuje hodnoty 26 let. Provozní věk jaderných reaktorů některých provozovatelů JE dosahuje i 40 let¹. V roce 2010 bylo vydáno OECD časové rozložení životnosti JE v budoucích letech (Obr. 5.1).

Věk všech 139 trvale odstavených jaderných reaktorů můžeme vidět na Obr. 5.2, z něho vyplývá, že 32 jednotek bylo v provozu po více než 30 let a dokonce 15 reaktorů více než 40 let. Většina z těchto reaktorů je typu MAGNOX a nachází se ve Velké Británii. Velká část z nich byla použita pro výrobu plutonia k výrobě jaderných zbraní. Jsou to tedy jaderné reaktory o malém výkonu (50-225 MWe), které pracovali s velmi nízkým vyhořením paliva a tedy nejsou srovnatelné s velkými reaktory o výkonech 900 MWe nebo 1300 MWe, které mají mnohem vyšší nároky na odolnost materiálu. První prototypy reaktorů byly v provozu pouze několik let nebo i méně, zkušenosti s dlouholetým provozem jsou tedy malé. Průměrný věk všech reaktorů, které byly již trvale odstaveny, je 23 let.

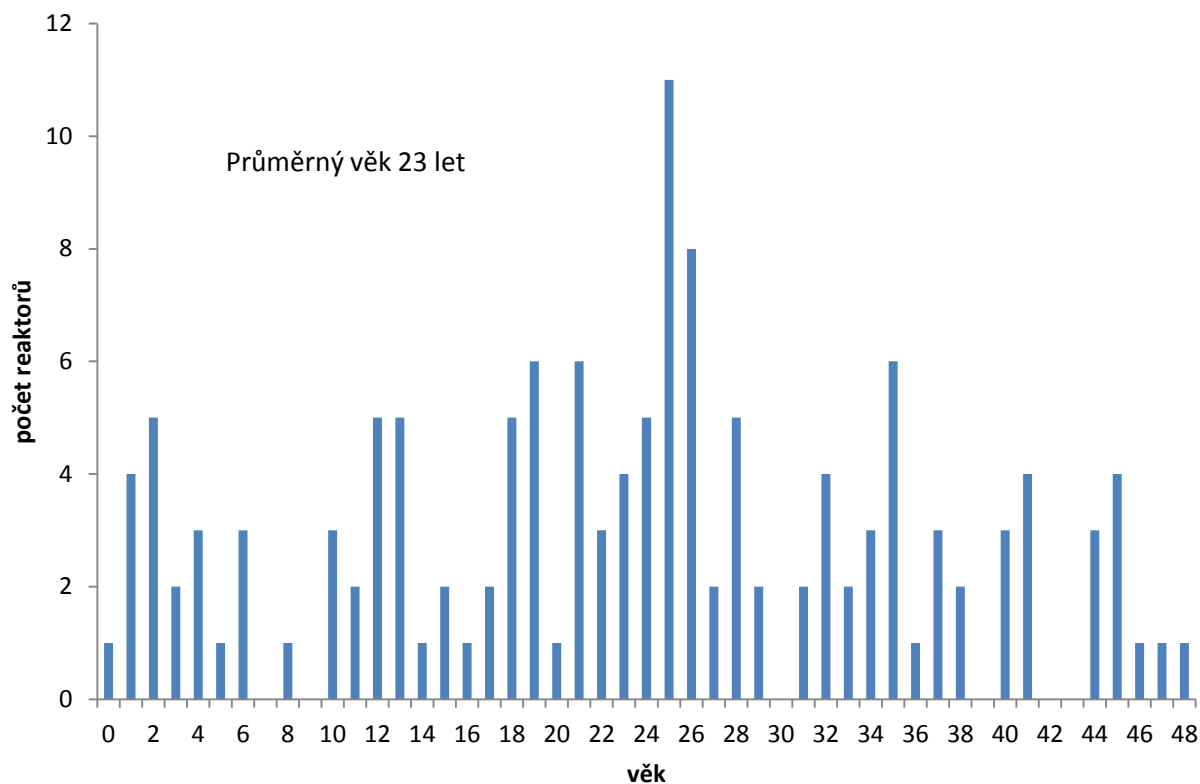


Obr. 5.1 Počet v současnosti provozovaných reaktorů, které budou v provozu v období 2010-2058. [5]

¹ Věk reaktoru počítán od data připojení k síti až po odpojení



Obr. 5.3 Stáří všech reaktorů, které jsou v současnosti v provozu (květen 2012) [5]



Obr. 5.2 Stáří všech 139 reaktorů, které jsou již trvale odstaveny (květen 2012) [5]

5.1 Prodlužování provozních licencí jaderných elektráren

Životnost většiny postavených jaderných elektráren byla navrhována na 25 až 40 provozních let. Ovšem po odborném zhodnocení jednotlivých elektráren bylo prohlášeno, že mnoho z těchto elektráren může být provozováno mnohem déle. V USA byla provozní licence prodloužena více jak 60 reaktorům, jejich životnost vzrostla ze 40 na 60 let. Většina provozovatelů zbylých jaderných elektráren počítá s obdobným prodloužením licence. [15]

Po Fukushimašské havárii je zřejmé, že otázka doby provozu jaderných elektráren a prodlužování provozních licencí je znova přehodnocována. Všechny 4 bloky JE Fukushima byli připojeny k elektrické síti v letech 1971 až 1974. Licence prvního bloku byla prodloužena o dalších 10 let v únoru 2011 tedy měsíc před touto havárií. Německá vláda zareagovala na Fukushimašskou havárii okamžitým odstavením svých nejstarších reaktorů a vzhledem k politické situaci v Německu je velice nepravděpodobné, že by tyto reaktory byly opět uvedeny do provozu. Je tedy zřejmé, že tyto události mají vliv i na již udělené prodloužení provozní licence.

5.2 Zvyšování kapacity jaderných reaktorů

Jako vysoce efektivní a ekonomicky dostupnou cestu ke zvýšení výrobní kapacity jaderných elektráren je možné uvést modernizaci těch stávajících. Touto cestou se vydalo mnoho zemí, jako hlavní představitelé můžeme uvést: USA, Belgie, Švédsko.

Od roku 1977 v USA schválila USNRC¹ 139 modernizací o celkovém výkonu 6020 MWe. Některé z těchto modernizací měly za následek zvýšení kapacity až o 20 %. Španělsko začalo program zdokonalení svých 9 reaktorů, aby přidalo 810 MWe (11 %). Například pro 7,4 % zdokonalení jaderné elektrárny Almaraz bylo potřeba finanční zdroje ve výši 50 miliónů USD. Ve Švýcarsku se obdobným způsobem podařilo zvýšit výrobní kapacitu o celých 13,4 %. Finsko dokázalo zvýšit výkon elektrárny Olkiluoto o 29% na 1700 MWe. Základní výkon této elektrárny typu BWR začínal na dvou blocích o výkonu 660 MWe. Také další finská JE Loviisa se dvěma VVER-440 (PWE) reaktory, byla zmodernizována, a tím byl přidán výkon 90 MWe (10 %). Ve Švédsku zmodernizovali všechny tři jaderné elektrárny. V roce 2006 až 2011 došlo v Ringhals k navýšení výkonu o zhruba 400 MWe v příštích 25 letech je v plánu modernizace s výsledným navýšením o 600 MWe. Na 3. bloku jaderné elektrárny Oskarshamn byly dokončeny modernizace za 313 miliónů EUR a tento blok má nyní výkon 1450 MWe (navýšení o 21 %) a další 27 % navýšení výkonu na bloku číslo 2 právě probíhá. Na další švédské jaderné elektrárně Forsmark 2 bylo v roce 2010 dokončeno navýšení výkonu o 120 MWe (12 %). [15]

5.3 Projekty, které jsou v současnosti ve výstavbě

Největší počet rozestavěných a plánovaných staveb se nachází na asijském kontinentu, tedy v zemích s rychle se rozvíjející ekonomikou, která požaduje stále více elektrické energie. Téměř každá země s existujícím jaderným programem má plány na nové jaderné reaktory.

V Číně je v plánu v letech 2012-2016 připojit k síti 26 jaderných reaktorů, všechny typu PWR. Rozmezí výkonů je od 650 MWe do 1750MWe. Většina reaktorů je postavena jako CPR-1000 generace II+, což je v Číně značně vylepšený 3 smyčkový model M310 (900 MWe), od firmy Areva. Čína je již téměř soběstačná ve výrobě komponent pro tento model, ovšem práva k duševnímu vlastnictví má stále francouzská Areva. Zbylé tlakovodní reaktory jsou typu

¹ United States Nuclear Regulatory Commission

AP-1000 (1250 MWe) III. generace. Vzhledem k energetickému plánu vybudovat jaderné zdroje o celkovém výkonu 60 GWe do roku 2020, potom 200 GWe do roku 2030 a 400 GWe do roku 2050, lze předvídat jako zemi s největším počtem provozovaných reaktorů Čínu. [11]

V **Indii** je nyní ve výstavbě 7 reaktorů (4 bloky PHWR, 2 bloky PWR typu VVER 1000 a 1 FBR), jako země s populační explozí má vysoký potenciál na další jaderné zdroje. Stejně jako Čína má i Indie obrovské plány pro svůj jaderný program s výslednou produkcí více než 25 % elektrické energie z jaderných zdrojů do roku 2032. [12]

Rusko v současnosti staví 7 bloků PWR (2 bloky VVER 1000/V-320, a 5 bloků VVER 1200) a 1 blok FBR v Beloyarsku (BN-800). Dále je ve výstavbě první plovoucí jaderná elektrárna s názvem Akademik Lomonosov (2 bloky každý o výkonu 35 MWe). Mezi reaktory ve výstavbě vede IAEA i 1 blok LWGR (Kursk-5), ale pravděpodobnost jeho dokončení je téměř nulová. Expandující nukleární program má mít za výsledek zdvojnásobení elektrické energie z jaderných zdrojů do roku 2020. [13]

Japonsko, i přes přírodní katastrofu a jadernou havárii v JE Fukushima, v současnosti dostavuje 2 bloky ABWR (JE Shimane 1373 MWe 3, JE Ohma 1 1383 MWe). U dalších 3 reaktorů měla být zahájena stavba v polovině roku 2011, avšak tyto projekty byly odloženy. Dalších 9 reaktorů o celkovém výkonu přes 13 GWe je v plánu v dalších letech s tím, že uvedení do provozu je plánováno na rok 2022, jejich budoucnost je však nyní nejistá. [14]

Jižní Korea má ve výstavbě 3 bloky PWR (1 bloky typu OPR-1000 a 2 bloky APR-1400) Poslední z těchto reaktorů má být uveden do provozu v roce 2017. [16]

V dalších zemích je rozestavěno 9 reaktorů PWR:

- **Finsko** – Olkiluoto 3, 1600 MWe, do provozu 2014
- **Francie** – Flamanville 3, 1600 MWe, do provozu 2016
- **Pákistán** – Chasnupp 3, 4, 2x315 MWe, do provozu 2016,2017
- **Slovensko** – Mochovce 3, 4, 440 MWe, do provozu 2013,2014
- **Ukrajina** – Khmelnytsky 3, 4, 1000 MWe, do provozu 2016,2017
- **USA** – Watts Bar 2, 1165 MWe
- **Argentina** – Atucha 2 745 MWe do provozu 2012 [15]

5.4 Budoucnost jaderné energetiky

Když připočteme k 62 v současnosti rozestavěným reaktorům dalších 160 i více reaktorů, které mají být dostaveny v příštích 10 letech a přes 200 dalších projektů v dalších letech, můžeme říci, že globální jaderný průmysl je na prahu druhé jaderné éry. I přes fukushimské neštěstí se tyto plány významně nezměnily. Země se zavedeným jaderným programem se snaží nahradit starší reaktory stejně jako zvýšit svou jadernou kapacitu. Přibližně 25 zemí zvažuje nebo se již rozhodlo pro výrobu části elektrické energie z jaderných zdrojů. Stále se však očekává největší kapacitní růst (přes 80 %) v zemích, které již svůj jaderný program mají. Podle zprávy The WNA Nuclear Century Outlook [29] je možný nárůst elektrické kapacity generované z jaderných zdrojů ze současných 366 GWe na přinejmenším na 1140 GWe do roku 2060 při optimistické vizi až na 3600 GWe. [15]

6 DOPAD FUKUSHIMSKÉ JADERNÉ HAVÁRIE

Za uplynulých 30 let ovlivnily vývoj jaderné energetiky 3 události: Three Mile Island (březen 1979), Černobyl (duben 1989) a tzv. 11. září (září 2001). Tyto události změnily přístup k jaderné bezpečnosti a vedly k přehodnocení projektových plánů jaderných elektráren. Ovšem trvalo více než 10 let, než tyto nové projekty JE dokázaly bezpečnostně a hlavně technologicky zareagovat na každou z těchto událostí. Je tedy velice pravděpodobné, že události v březnu 2011, které se staly ve Fukushima, budou mít nezanedbatelný vliv na další vývoj jaderných elektráren.

6.1 Dopad na cenu

V roce 2008 a 2009 byly zrušeny vypsané tendry na nové JE v Kanadě a Jižní Africe z důvodu ceny obdržených nabídek (AP 1000, EPR), které skoro dvojnásobně překročily očekávanou cenu. Tyto dva typy reaktorů neuspěly také ve Spojených Arabských Emirátech v roce 2009, kdy tendr vyhrál korejský APR 1400. Tyto neúspěchy nových reaktorů, zdá se rozvrátili optimistické vize, že generace III.+ mohou být bezpečnější, ale přitom jednodušší a levnější.

Jedním z bezpečnostních požadavků na JE po 11. září je to, že JE musí bezpečně přežít náraz velkého dopravního letadla. Tento požadavek měl za následek zesílení kontejnmentu. Evropské regulační orgány dále požadují u nově stavěných reaktorů systém, který by bezpečně zabránil protavení a úniku aktivní části reaktoru v případě jeho poškození a roztavení. U nových projektů EPR a MIR 1200 je to zabezpečeno tzv. lapačem coria (roztavené jaderné palivo). Francouzská Areva následně oznámila, že díky těmto bezpečnostním inovacím stoupla cena JE oproti předchozí II. generaci PWR o více než 15 % a významně se jí tak snížila konkurenceschopnost na mimoevropských trzích. Vzhledem k těmto událostem vyvíjí Areva a EDF ve spolupráci s Čínou nový typ reaktoru pro o výkonu 1000 MW, který bude více konkurence schopný, zejména pro čínský trh, kde jsou jiné bezpečnostní požadavky. [33]

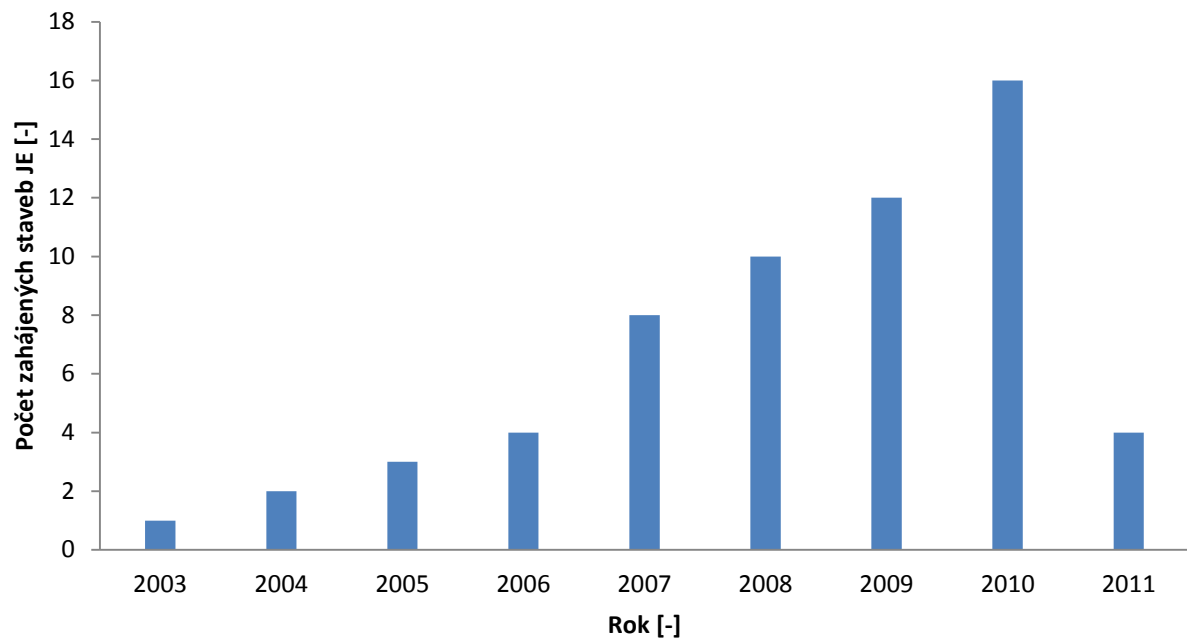
6.2 Dopad na novou výstavbu JE

V letech 2035-2050 bude většina v současnosti provozovaných JE trvale odstavena (viz. Obr. 5.1). To tedy znamená, že pro udržení jaderného podílu ve výrobě elektrické energie je potřeba značné výstavby nových JE v průběhu první poloviny 21. století.

Při pohledu na země OECD¹ s existujícím jaderným programem je zde mnoho zemí, kde je plán na výstavbu nových JE pro nahrazení těch stárnoucích. Ovšem vzhledem k Fukushima havárii se postoj některých z nich zásadně změnil (Německo, Švýcarsko, Itálie, Španělsko a zřejmě i Belgie). Současná situace v Japonsku, která je zemí s třetím největším jaderným programem na světě, a odklonem Německa od jaderné energetiky, je velice pravděpodobné, že tyto události budou mít významný vliv na budoucí vývoj celého jaderného odvětví. [33]

Při pohledu na Obr. 6.1 můžeme vidět, že události v Japonsku v roce 2011 ovlivnily vzrůstající trend výstavby nových jaderných elektráren. Mnoho projektů bylo odloženo a je znovu přehodnocováno, avšak z pohledu budoucí výstavby se nadále očekává velký nárůst.

¹ Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD česky Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj)



Obr. 6.1 Počet zahájených staveb JE [5]

7 PŘÍČINY ZDRŽENÍ JEDNOTLIVÝCH PROJEKTŮ

7.1 Výstavba jaderné elektrárny Olkiluoto 3 ve Finsku

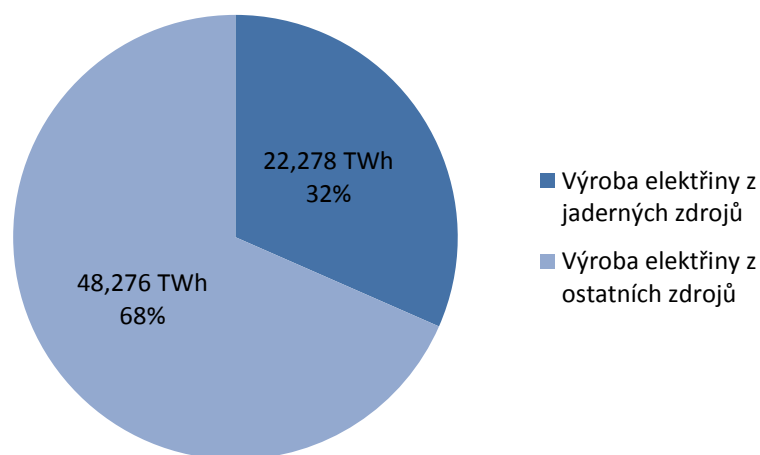
7.1.1 Současný stav jaderného průmyslu ve Finsku

K dnešnímu dni jsou v provozu všechny čtyři finské jaderné reaktory, které byly postaveny na přelomu 70. a 80. let minulého století, tedy těsně za obdobím vrcholu výstavby JE ve světě. Ve východním Finsku to byly bloky 1, 2 JE Olkiluoto, které byly dokončeny v roce 1978 respektive 1980 a v jižním Finsku bloky 1, 2 JE Loviisa, které byly dokončeny v roce 1977 a 1980. [5]

JE Loviisa byla vůbec první jadernou elektrárnou ve Finsku. První blok přešel do komerčního provozu v únoru 1977 a druhý blok v listopadu 1980. Oba bloky jsou typu VVER-440, které v originálním provedení dodávají do sítě 2x440 MWe. JE Loviisa byla první jadernou elektrárnou, kde spolu spolupracovali jaderné velmoci ze západu i východu v oblasti jaderné technologie. Reaktor, turbína, generátor i další hlavní komponenty pochází z bývalého Sovětského svazu a byly doručeny ruským Atomstroyexport. Bezpečnostní, kontrolní, ale i ovládací systémy jsou však západní koncepce. Kontejnment s ledovým kondenzátorem byl vytvořen podle patentů americké společnosti Westinghouse. Finské jaderné bezpečnostní normy byly vytvářeny souběžně s výstavbou této první JE. [34]

Oba bloky JE Olkiluoto jsou totožného typu BWR a jejich elektrický výkon dodávaný do elektrické sítě je 860 MW. Tyto jednotky byly dodány švédským AB Asea Atom (dnes Westinghouse Atom AB). Hlavními subdodavateli byly zejména firmy z Finska a Švédska. JE Olkiluoto 1 byla doručena formou zakázky na klíč. Výstavbu druhého bloku JE Olkiluoto řídila naopak Teollisuuden Voima Oy¹. Tyto 2 bloky byly postupně uvedeny do provozu v září 1978 a v říjnu 1980. [35]

Finský průmysl je vysoce závislý na dodávce levné elektrické energie. V současné době je cílem Evropské unie ve Finsku snížit produkci skleníkových plynů spalováním tuhých paliv a produkovat 38% ze své celkové vyrobené elektrické energie z obnovitelných zdrojů do roku 2020. Finská státní energetická strategie do budoucna počítá s jadernými zdroji, ovšem jejich financování je zcela na soukromých investorech.[36]

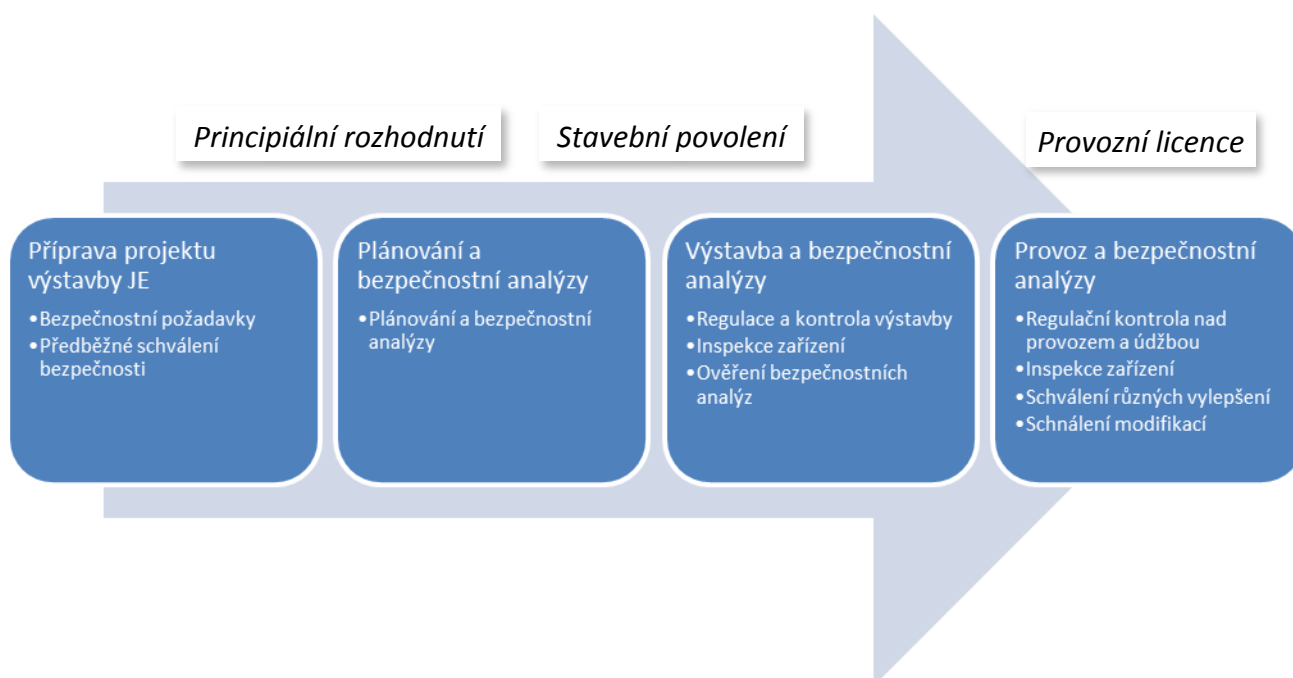


Obr. 7.1 Podíl JE na výrobě elektřiny ve Finsku (za rok 2011)
[5]

¹ Teollisuuden Voima Oy^s (TVO) – akciová společnost založena 1969, která vyrábí elektrickou energii pro své akcionáře, kterými jsou z 80% energetické společnosti Fortum Power and Heat a Pohjolan Voima

7.1.2 Regulační proces jaderných zařízení ve Finsku

Licenční proces k povolení výstavby a provozu jaderných zařízení, jako jsou JE, je podrobně znázorněn na Obr. 7.2. Dohled nad dodržением bezpečnostních požadavků a udělování příslušných povolení má ve Finsku na starosti regulační úřad pro jadernou bezpečnost STUK¹.



Obr. 7.2 Regulační proces jaderných zařízení ve Finsku [36]

7.1.3 Projekt Olkiluoto 3 (OL3)

V září 2002 vypsala TVO výběrové řízení, do kterého se zapojili tři společnosti: francouzská Areva, americký General Electric a ruský Atomstroyexport, ten ovšem nesplňoval jeden ze základních požadavků na celkový výkon. TVO jako vlastník JE vybrala jako hlavního dodavatele konsorcium Areva a Siemens s tím, že JE bude dodána formou stavby na klíč. Areva jako dodavatel jaderného zařízení a Siemens jako dodavatel turbínové soustavy. Areva v tomto tendru zvítězila se svým typem reaktoru EPR², který má čistý elektrický výkon přes 1600 MWe.

Studie o proveditelnosti JE OL3 se začaly vytvářet v dubnu 1998 a plánovaný začátek komerčního provozu byl zamýšlen na jaro 2009. Doba potřebná k získání veškerých licencí umožňující začátek výstavby byla u OL3 26 měsíců. Na konci roku 2003 byl podepsán kontrakt na dodání JE OL3 na klíč v hodnotě 3 miliardy EUR. Výkopové práce začaly v únoru 2004. 14. ledna 2005 bylo vydáno stavební povolení městem Eurajoki. V únoru 2005 převzalo stavbu konsorcium Areva a Siemens od TVO, která byla zodpovědná za přípravné stavební práce.

Na začátku roku 2006 již bylo oznámeno šesti měsíční zpoždění oproti původnímu plánu z důvodu problémů se základy hlavní budovy reaktoru. 2. ledna 2006 zastavení betonovacích

¹ STUK - Finský státní úřad pro jadernou bezpečnost

² European Pressurized water Reactor

práci z důvodu nedostatku kontroly samotných betonovacích prací, ale i kontroly používaných přísad. Další zpoždění bylo způsobeno stavební dokumentací, která byla podle STUK nedostatečná.

V červnu 2006 vydal STUK vyšetřovací zprávu, kde uvádí, že v mnoha částech projektu není dosaženo adekvátní kvality a kontrolní mechanismy jsou nedostatečné. V průběhu roku 2007 bylo oznámeno posunutí začátku provozu na přelom roku 2010-2011. V břenu 2007 bylo předěláno všech osm chladících potrubí reaktoru. Další zpoždění zavinil špatný způsob svařování ocelového lineru kontejnmentu. V září 2009 jsou kompletní masivní betonovací práce celého kontejnmentu.

Na začátku roku 2010 bylo oznámeno, že výstavba hlavních budov dosáhla 90%. Areva oznámila ztrátu 2,3 miliard EUR z projektu OL3 a posunula datum dokončení na rok 2012.

Poslední informaci o začátku komerčního provozu podala TVO na tiskové konferenci na konci roku 2011, kdy uvedla, že na základě informací o postupu prací od konsorcia Areva a Siemens je datum zahájení komerčního provozu posunuto na začátek roku 2014. [37] [38]

Datum	Událost
11/2001	TVO podala žádost o povolení výstavby nové JE
12/2003	Podepsána smlouva mezi TVO a konsorciem Areva a Siemens o dodání JE OL3
2/2004	Výkopové a přípravné práce
7/2005	Počátek výstavby a konkrétních betonovacích prací
5/2006	Instalace spodní části lineru kontejnmentu
6/2007	Výška reaktorové budovy vzrostla z - 7 m na 16m
1/2009	Tlaková nádoba reaktoru doručena na stavbu
9/2009	Instalován vrch lineru na reaktorové budově
11/2009	Parogenerátory doručeny na stavbu
6/2010	Instalace tlakové nádoby reaktoru
2/2011	Instalace posledního parogenerátoru kompletní
5/2011	Dokončení betonovacích prací reaktorové budovy
2/2012	Připojení turbín na 110 kV, zahájení předprovozních testů turbínového ostrova.

Tab. 7-1 Důležité události v projektu OL3 [38]

7.1.4 Příčiny zpoždění projektu Olkiluoto 3

Prvotní časový harmonogram projektu OL3 byl velice ambiciózní vzhledem k tomu, že tento typ JE neměl na světě obdoby a byl větší, než všechny do té doby postavené JE. Projekt byl zdržen i nedostatečnou přípravou projekčních a inženýrských prací, které jsou důležité k začátku výstavby.

Forma kontraktu na klíč, podepsaná mezi TVO a konsorciem Areva a Siemens, převedla veškerou zodpovědnost na dodavatele (tedy konsorcium Areva a Siemens), které pak dále posouvala odpovědnost na subdodavatele. V případě obrovských a složitých mezinárodních projektů, jakým výstavba JE OL3¹ bezpochyby je, klade dlouhý dodavatelský řetězec obrovské nároky na manažerské posty. V případě OL3 bylo mnoho problémů způsobeno pomalým informačním tokem, a to ve všech směrech. Z důvodu kontraktu na klíč, TVO nemohlo ovlivňovat výběr subdodavatelů a tedy i jejich kontrolu.

Největší problémy s výstavbou JE OL3 byly spojeny s projektovým managementem. Pro Areva byl tento projekt prvním, kdy měla stavět celou elektrárnu. Areva dříve pracovala jen jako

¹ V severní Evropě se jedná o největší průmyslový projekt vůbec, kdy ve špičce stavebních prací bylo zaměstnáno více než 4000 lidí z 50 zemí světa. Dodavatelský řetězec tvořil téměř 2000 subdodavatelů z 28 různých zemí.

dodavatel některé části elektrárny a tedy její zkušenosti s vedením takto obrovských projektů jsou minimální.

Z důvodu utlumení výstavby JE v minulých letech se soustředilo mnoho zkušených dodavatelů jaderného průmyslu na jiné méně technologicky náročné odvětví. V mnoha případech projektu OL3 tedy byly ve výběrovém řízení vybrány dodavatelé bez předchozí zkušenosti s výstavbou JE. Dále pak práce těchto dodavatelů nebyla dostatečně kontrolována a vedena.

Velice přísné finské jaderné předpisy byly pro konsorcium Areva a Siemens zcela nové. Například bylo potřeba veškerou dokumentaci a stavební plány schválit TVO a STUK, aby se mohlo pokračovat na dalších pracích. To znamenalo dodat kompletní dokumentaci a plány před začátkem veškerých prací. Tento požadavek vychází z finského zákona, není to tedy požadavek TVO a STUK. Jednou z hlavních příčin odložení začátku výstavby tedy bylo schvalování veškerých dokumentů úřadem STUK.

Další problémy způsobily i finské klimatické podmínky. Siemens byl nucen předělávat celou betonovou podlahu turbínové části JE. Důvodem bylo zapomenutí dilatačních spár, které jsou nezbytné pro finské klima.

Vliv na rychlost prací mělo i zaměstnání lidí žijících mimo Finsko. Největší pracovní sílu tvořili Poláci, kteří z celkového počtu 4000 lidí tvořili téměř 30%. Jelikož oficiálním jazykem používaným na stavbě byla angličtina, docházelo k jistým jazykovým bariérám a komunikačním problémům.

Podle úřadů jsou hlavními důvody více než 3 letého zpoždění projektu způsobeny špatnou kvalitou prací, špatně zvolený časový harmonogram v projektové dokumentaci, zpoždění dodání některých hlavních komponent a stavební problémy. Z vyšetřovací zprávy STUK z roku 2006 vyplývají pak další problémy jako je nedostatečná kontrola a vedení subdodavatelů a nízká kvalita originálních plánů. [36]

Aktér	Role v projektu Olkiluoto 3
TVO	Vlastník, zodpovědný za získání veškerých potřebných licencí, výkopové práce a připojení JE k elektrické síti. Má zkušenosti s provozováním JE a jejich modernizací.
AREVA	Dodavatel, zodpovědný za licence schopnost dodávané JE, projekční, inženýrskou, montážní a instalační činnost, stavbu, dopravu, kvalitu, testování a uvedení do provozu.
STUK	Národní bezpečnostní autorita, zodpovědná za jadernou a radiační bezpečnost. Zodpovědnost za bezpečnostní předpisy a hodnocení, inspekci instalovaných systémů a komponentů.

Tab. 7-2 Hlavní aktéři a jejich role v projektu OL3

7.2 Výstavba jaderné elektrárny Flamanville 3 ve Francii

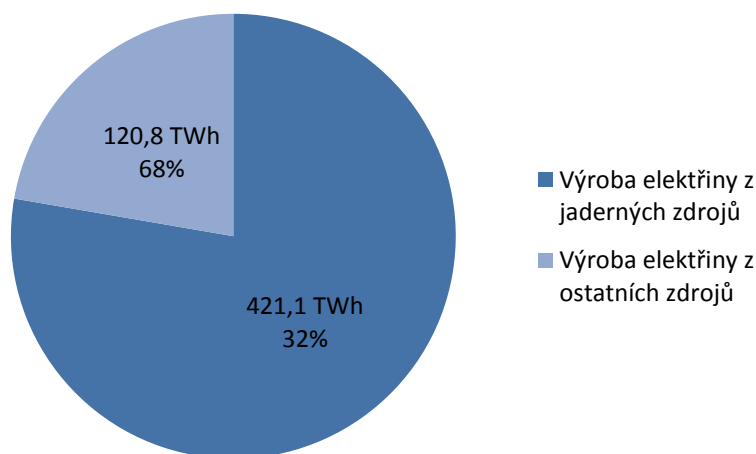
7.2.1 Současný stav JE ve Francii

Francie generuje přes 75% své elektrické energie z jaderných zdrojů. V provozu je v současné době 58 reaktorů s celkovou kapacitou přes 63 GWe, které dodaly v roce 2011 do elektrické sítě 421 TWh. Přes 70 TWh je každoročně dodáváno do sousedních zemí. Všech 58 reaktorů je provozováno energetickou společností EDF¹. [39]

Vzhledem ke stáří jaderných reaktorů ve Francii, kdy nejstarším jaderným reaktorem v provozu je v JE Fessenheim², a k zákonu pro energetickou politiku a bezpečnost vydaným v roce 2005, se očekává postupná obměna za nové JE. Novým typem, který má za úkol nahradit francouzské JE je tedy EPR, který byl právě za tímto účelem vyvíjen.

V současné době je však ve Francii ve výstavbě pouze jeden jaderný blok Flamanville 3, který se nachází na pobřeží severozápadní části Francie. Jelikož se jedná o pilotní projekt, který zahajuje obměnu francouzských JE, je zde kladen důraz spíše na kvalitu a získávání zkušeností s řízením výstavby. V tomto areálu jsou dva další jaderné bloky, které byly připojeny k elektrické síti v roce 1985 a 1986.

V roce 2009 oznámil tehdejší prezident Sarkozy, že v Flamanville bude postaveno druhé EPR ve Francii. Stejně jako ve Flamanville jsou zde již dva jaderné bloky o výkonu 1300 MWe v provozu a je zde místo pro 2 další. Veřejná diskuze k tomuto projektu byla zahájena v roce 2010 a začátek výstavby je plánován na rok 2012 s uvedením do komerčního provozu v roce 2017. Třetím plánovaným reaktorem je středně výkonný 1100 MWe Atmea-1³ v Tricastin nebo Marcoule s uvedením do provozu v roce 2020. [39]



Obr. 7.3 Podíl JE na výrobě elektřiny ve Francii (za rok 2011) [5]

¹ Électricité De France (EDF) je největším dodavatelem a výrobcem elektrické energie ve Francii. Vlastníkem je z 85% stát.

² Připojen k elektrické síti v roce 1977

³ Vyvíjen dohromady Mitsubishi Heavy Industries a Areva

7.2.2 Projekt Flamanville 3 (FL 3)

Na rozdíl od projektu OL3 nebylo vypsáno regulérní výběrové řízení a EDF v lednu 2007 přímo zvolilo jako hlavního dodavatele reaktoru společnost Areva. Vzhledem k tomu, že většinovým vlastníkem obou firem je stát, jde o logické rozhodnutí, které zajišťuje bližší a jednodušší spolupráci obou aktérů v projektu. Role jednotlivých aktérů v projektu jsou uvedeny v Tab. 7-4. Celkové náklady byly stanoveny na 3,3 EUR (v roce 2005) s tím, že cena nezahrnuje první nákladku paliva. Jako dodavatele turbínové části JE byla zvolena společnost Alstom s turbínou Arabelle. V tuto chvíli již bylo oznámeno 9 měsíční zpoždění.

V květnu 2006 EDF zahájilo vyřizování licenčních a stavebních povolení důležitých pro zahájení výstavby od příslušných francouzských ministerstev a ASN¹. V létě 2006 po udělení stavebního povolení začaly přípravné práce (přístupové cesty a zemní práce). V dubnu 2007 byla schválena licence regulačním úřadem ASN.

Datum	Událost
5/2006	EDF rozhodla o začátku výstavby Flamanville 3
7/2006	Výkopové a přípravné práce
4/2007	Podepsána smlouva mezi EDF a Areva o výstavbu jaderné části Flamanville 3
12/2007	Počátek výstavby a konkrétních betonovacích prací
5/2008	Instalace spodní části lineru kontejnmentu
9/2008	Instalace bezpečnostního potrubního systému
2/2009	Výška reaktorové budovy vzrostla na 18 metrů
7/2010	Instalace kompenzátoru objemu
4/2011	Začátek montáže potrubí
1/2012	Instalace statoru v turbínové budově
3/2012	Začátek betonovacích prací na druhé vrstvě (protiletecké) ochranné obálce

Tab. 7-3: Důležité události v projektu FL3 [43]

Stavební práce začaly v roce 2007 a ke konci tohoto roku bylo zahájeno betonové lití, komerční provoz se očekával v roce 2012. V březnu 2008 bylo ASN vydáno doporučení o zvýšení kontroly kvality prací, zejména pak v betonovém lití, za dva měsíce pak ASN požádala o zastavení těchto prací a oznámila další kvalitativní problémy při svařování ocelového lineru kontejnmentu. Na konci roku EDF oznamuje zvýšení nákladů na 4 miliardy EUR v důsledku inflace a změn v technických a kontrolních pracích. Datum komerčního provozu je stále plánováno na rok 2012. [40]

V roce 2010 je EDF oznámeno zpoždění prací o další 2 roky a náklady přesahují původní plán o 1,7 miliard EUR. Komerční provoz je očekáván v roce 2014.

EDF v polovině roku oznamuje, že v důsledku stress testů, které následovali po Fukushimašské jaderné havárii, a vážným nehodám se zvýšily náklady na 6 miliard EUR a komerční provoz se zpozdí o další 2 roky, tedy na rok 2016. [41]

Současný stav stavebních prací je na 88 % a elektromechanické práce na 21%. [42]

¹ Autorité de sûreté nucléaire- (ASN) francouzský bezpečnostní a regulační jaderný úřad.

7.2.3 Příčiny zpoždění projektu Flamanville 3

Podle zprávy ASN byly betonové základy hlavní reaktorové budovy nesprávně zality. V květnu 2008 byly ASN přerušeny betonovací práce, z důvodu nedostatečného řízení kvality EDF. Pro opětovné zajištění prací EDF předložila plán pro zdokonalení těchto kontrol.

Další problémy způsobila instalace ocelových částí lineru, neboť podobně jako u OL3 svařování těchto částí bylo provedeno jinak než se plánováno. Svařování prováděla firma bez příslušné certifikace pro tuto činnost.

Aktér	Role v projektu Flamanville 3
EDF	Vedoucí projektu, zajišťuje podrobné projektové studie, zodpovídá za projekční, inženýrskou, montážní a instalační činnost, stavbu, dopravu, kvalitu, testování a uvedení do provozu. Koordinuje práci všech zúčastněných stran.
AREVA	Dodavatel jaderné části elektrárny.
ASN	Národní bezpečnostní autorita, zodpovědná za jadernou a radiační bezpečnost. Zodpovědnost za bezpečnostní předpisy a hodnocení, inspekci instalovaných systémů a komponentů.
Francouzský stát	Kontroluje stavbu přímo pomocí ASN, dále vystupuje jako většinový vlastník EDF i nejdůležitějšího dodavatele Areva.
ALSTOM	Francouzská nadnárodní firma, zodpovědná za turbínovou část JE. Všechny reaktory provozované EDF používají Alstom součásti v turbínové části.

Tab. 7-4 Hlavní aktéři a jejich role v projektu FL3

zkušeností a možnost zdokonalit mechanismy výstavby. [39][40]

Stavbu Flamanville 3 také provázejí vážné problémy především s personálem. Pracuje zde přibližně 3400 lidí a velkou část z toho tvoří dělníci najatí v Polsku nebo Rumunsku přes pracovní agentury. Dle francouzských odborů nejsou na stavbě dodržovány bezpečnostní podmínky odpovídající evropským standardům. Především pak při stavebních a montážních pracích firmou Bouygues. Faktem je, že na stavbě již došlo ke dvěma smrtelným nehodám, kdy dělníci spadli z vysokého lešení.

Dalším ovlivňujícím faktorem je, že EDF nestavilo tak složitý a komplexní projekt, jakým je FL3, více než 15 let. Neboť naposledy se stavila JE Civaux. Od té doby se požadavky na bezpečnost JE zpřísnily. Projekt FL3 EDF vede jako první pilotní výstavbu EPR, která má zahájit postupnou výměnu všech současně provozovaných reaktorů, a tedy klade důraz především na kvalitu, získání

7.3 Výstavba JE Kudankulam v Indii

První velkou JE v Indii buduje ruský Atomstroyexport ve spolupráci s indickou energetickou společností NPCIL¹. JE Kudankulam 1,2 se skládá ze dvou reaktorů VVER-1000 (V-392). Tento projekt je spolufinancován 3 miliardami USD ruskou stranou. Tento dlouhodobý úvěr pokrývá zhruba polovinu nákladů na výstavbu. Po zahájení provozu se bude jednat o největší indický jaderný komplex produkující přes 2 GWe. [45] NPCIL bude provozovat JE Kudankulam podle IAEA bezpečnostních nařízení, tzn. i udělení provozní licence je pod záštitou IAEA. Turbíny pro tento projekt dodaly Leningradské ocelové závody. Na rozdíl od projektů v Íránu dohlíželo nad výstavbou JE Kudankulam pouze 80 ruských inženýrů z Atomstroyexport. [12] [53]

Podle původního plánu měl první blok začít generovat elektřinu v březnu 2008 a poté přejít do komerčního provozu na konci tohoto roku. V současné době je však tento projekt o více než 3 roky zdržen. První nákladka

paliva do obou bloků byla zdržena kvůli velkým veřejným protestům. Tyto masivní protesty byli přímou reakcí na Fukushimašskou jadernou havárii a měli za následek největší zdržení projektu. I přes tyto protesty indická vláda v březnu 2012 schválila zahájení testů pro získání provozní licence. Druhý jaderný blok je oproti prvnímu o 8 měsíců pozadu. Přestože do prvního bloku bylo navedeno palivo již na začátku roku 2008, byly zde zpoždění s dodáním některých komponent a dokumentací. Dokumentace řídicích systémů byla doručena pozdě a při revizi této dokumentace NPCIL oznámila, že bude potřeba značné zdokonalení a dokonce i předělání některých systémů. Projektovaná maximální výška vlny tsunami je 5,44 m a podlaha turbínové budovy je 8.1 m nad hladinou moře. V roce 2004 byla vlna tsunami pod úrovní 3 m. [12]

Datum	Událost
9/2001	Začátek výstavby, přípravné výkopové práce
3/2002	Počátek výstavby a konkrétních betonovacích prací
5/2005	Výška vnitřní stěny kontejnmentu dosáhla 43,9 m
8/2005	Výška turbínové budovy dosáhla 36,5 m
10/2007	Vnitřní stěna kontejnmentu dokončena
5/2008	Vnější stěna kontejnmentu dokončena
7/2008	Instalace reaktoru a primárního potrubí
9/2008	Instalace turbíny a generátoru
4/2009	Počátek testů pro uvedení do provozu
12/2010	Test oběhu chladiva primárního okruhu
4/2011	Individuální testy vybavení a systémů

Tab. 7-5 Důležité události výstavby
JE Kudankulam [44]

¹ Nuclear Power Corporation Of India Limited – Indická jaderná společnost, která má na starost výstavbu, licencování a provoz JE v Indii.

7.4 Výstavba JE Tianwan v Číně

JE Tianwan 1, 2 je jedním z největších jaderných komplexů v Číně. První fáze projektu Tianwan zahrnovala výstavbu dvou jaderných reaktorů AES-91 VVER-1000 (V-428). Podle podepsaného kontraktu mezi ruským Atomstroyexport a čínskou jadernou společností Jiangsu¹ byla ruská strana zodpovědná za technickou stránku celého projektu, projektovou činnost, dodávky materiálu a hlavních komponent, první nakládku paliva pro oba bloky, školení čínských pracovníků a uvedení JE do provozu. Výše nákladů na výstavbu byla oznámena na 3,2 miliard USD, z čehož 1,8 miliardy USD poskytla čínská strana. [11] [46]

Datum	Událost
1997	Podpis kontraktu mezi ruskou a čínskou stranou
1998	Zahájení stavebních prací
11/2001	Dokončen kontejnment prvního bloku
2/2002	Dokončen kontejnment druhého bloku
10/2005	První nakládka paliva
5/2007	První blok JE uveden do komerčního provozu
7/2007	Druhý blok JE uveden do komerčního provozu

Tab. 7-6 Důležité události výstavby JE Tianwan

Kontrakt mezi oběma stranami byl podepsán v roce 1997 a v roce 1998 byly zahájeny stavební práce. V průběhu výstavby se zapojilo do výstavby více než 150 ruských firem. První blok měl být podle původního plánu dokončen v roce 2004 a druhý blok rok poté. V listopadu 2001 byl dokončen kontejnment prvního bloku a o tři měsíce později i kontejnment druhého bloku. V dalším průběhu výstavby bylo oznámeno zdržení v důsledku koroze parních generátorů. První nakládka paliva prvního bloku byla dokončena v říjnu 2005. První blok byl v květnu 2007 uveden do komerčního provozu a druhý blok následně v srpnu téhož roku.

JE Tianwan 1, 2 je úvodní fází projektu jaderných elektráren v Tianwanu. Projekt se skládá ze 3 fází, kdy v druhé fázi se mají postavit další dvě jednotky ruské AES-91, každá o výkonu 1060 MWe. Začátek výstavby obou bloků se plánuje na konec roku 2012 s uvedením do provozu v roce 2018 respektive 2019. Ve třetí fázi se pak očekává výstavba dalších dvou jednotek CPR-1000, každá o výkonu 1080 MWe. [47]

¹ Jiangsu Nuclear Power Corporation byla založena v roce 1997 za účelem výstavby a poté i provozu JE Tianwan

7.5 Výstavba JE Mochovce 3,4 na Slovensku

V roce 1982 zahájila výstavbu 3 a 4 bloku v JE Mochovce společnost Škoda. Oba reaktorové bloky jsou typu VVER-440 V-213. Základy všech hlavních budov (budovy reaktoru, základy transformátorů, chladicích věží, ventilačního komínu) 3 a 4 bloku byly položeny v roce 1986. Práce pokračovaly úspěšně až do roku 1992, kdy byla stavba přerušena z důvodu nedostatku financí. V době přerušení prací bylo dodáno asi 30 % zařízení a stavební práce byly ze 70 % hotovy. V letech 1992 až 2000 se v elektrárně konaly údržbové a konzervační práce všech zařízení a jejich součástí, které řídila společnost Slovenské elektrárny. V letech 2000 až 2007 pak vykonávala společnost Slovenské elektrárny konzervační a ochranné práce na základě schválení ÚJD SR¹.

Datum	Událost
1982	Začátek výstavby, přípravné výkopové práce
1986	Položení základů hlavních budov
1992	Přerušení stavebních prací
1992-2007	Konzervační a údržbové práce
11/2008	Zahájení dostavby
6/2009	Podpisování dodavatelských smluv
8/2010	Instalace hlavního cirkulačního potrubí
9/2010	Dokončení stavebních prací strojovny
4/2011	Dokončení budovy pro simulaci strojového zařízení
12/2011	Osazení tlakové nádoby reaktoru

Tab. 7-7 Důležité události výstavby
JE Mochovce 3, 4 [50]

V roce 2006 odkoupila společnost ENEL 66% akcií společnosti Slovenské elektrárny a ihned začala zpracovávat studie o realizaci dostavby obou bloků JE Mochovce. Studie obsahovala i zlepšení bezpečnostních systémů původního projektu. Rozhodnutí o dostavbě projektu MO34 bylo potvrzeno v únoru 2007 a dostavba oficiálně začala 3. listopadu 2008. V průběhu roku 2009 byly podepsány smlouvy o dodání zbývajících jaderných zařízení a dokončení stavebních prací se Škodou JS a slovenskými dodavateli². Bezpečnostní a řídicí systémy pak dodalo konsorcium Areva-Siemens. Řízení projektu, projekční a inženýrskou práci vede společnost ENEL a Škoda Power dodává parní turbíny. V dubnu 2010 byl Ministerstvem životního prostředí vydán souhlasný posudek o vlivu provozu 3. a 4. bloku na životní prostředí, které je potřebné pro udělení provozní licence ÚJD SR.

V roce 2010 a 2011 pak pokračovala dostavba podle stanoveného harmonogramu. V Tab. 7-7 můžeme vidět vývoj projektu JE Mochovce 3, 4 v chronologickém pořadí.

Koncem roku 2012 je v plánu ukončení technologické části prací na bloku 3 a o 8 měsíců později pak na bloku 4. Uvedení 3 bloku do komerčního provozu po úspěšných předprovozních testech se plánuje na rok 2013 a blok 4 o 8 měsíců později. [48] [49]

¹ Úřad jaderného dozoru Slovenské republiky

² Výzkumný ústav jaderných elektráren (VÚJE), Enasco, Inženýrské stavby Kočice (ISK)

7.6 Výstavba JE Belene v Bulharsku

První projekt JE Belene 1, 2 zahrnoval výstavbu dvou jednotek VVER-1000 typu V-320. Přípravné stavební práce začaly na konci roku 1980 firmou Energoproekt Sofia a samotná výstavba obou reaktorů v roce 1987 ruským Atomstroyexport. Během let 1988-1989 byly oba reaktory kompletní z 40% a více než 80% technického vybavení bylo doručeno na stavbu. V roce 1991 však výstavba zastavena kvůli nedostatku financí.

O znovuoobnovení výstavby začala jednat bulharská vláda až v roce 2003, kdy byly uzavřeny první dva bloky JE Kozloduy. Na začátku roku 2005 pak byl schválen projekt na dokončení JE Belene 1, 2 s celkovým výkonem 2000 MWe. Byly zde

dvě možnosti: dokončit starší již rozestavěný projekt VVER-1000 V-320 s většinou komponentů již na staveništi nebo vybudovat nový reaktor AES-92.

V říjnu 2006 pak zvolila NEK¹ konsorcium Atomstroyexport a Škoda-JS jako stavitele a dodavatele dvou jaderných bloků AES-92, každý o výkonu 1060 MWe. V rámci konsorcia Atomstroyexport se na výstavbě podílela i Areva NP, Siemens a domácí bulharské společnosti. Tento kontrakt o hodnotě 4 miliardy EUR byl podepsán v lednu 2008. Výstavba JE Belene 1, 2 byla oficiálně obnovena v září 2008. Práce však zahrnovali pouze drobné přípravné úpravy a stále se hledal strategický investor. Výstavba měla být dokončena v prosinci 2013 a v červnu 2014.

Po volbách v roce 2009 potvrdila nová vláda záměr převzít 51% podíl státu na financování projektu s tím, že zbylých 49 % bude financovat soukromý investor². Nová bulharská vláda si nechává zpracovat ekonomické analýzy, ze kterých vyplývá, že finální částka celého projektu se může vyšplhat až k 10 miliardám EUR.

Na začátku roku 2010 byla Rosatomem založena společnost Belene Power Company s účelem financování JE Belene 1, 2, ve které měl 51% podíl NEK a pro zbylou část se hledal strategický soukromý investor. Atomstroyexport posunul datum spuštění obou reaktorů na roky 2016 a 2017.

V březnu 2012 bylo oficiálně oznámeno zrušení dostavby JE Belene s tím, že na místě vznikne místo JE elektrárna plynová. Již vyrobené komponenty mají být použity při výstavbě dalšího bloku JE Kozloduy, které by se tím rozšířil instalovaný výkon o 1000 MWe, tedy na 3000 MWe.

Datum	Událost
1982	Začátek výstavby, přípravné výkopové práce
1986	Položení základů hlavních budov
1992	Přerušení stavebních prací
1992-2007	Konzervační a údržbové práce
11/2008	Oficiální zahájení dostavby
6/2009	Podpisování dodavatelských smluv pro hlavní komponenty
2009-2012	Jednání o celkové ceně projektu mezi oběma stranami, hledání vhodného modelu financování.
3/2012	Oficiální oznámení o zrušení dostavby JE Belene

Tab. 7-8 Důležité události výstavby JE Belene

¹ Natsionalna Elektricheska Kompania (NEK) – Bulharská státní energetická společnost.

² Tento tendr vyhrála německá energetická společnost RWE, která ovšem později od tohoto obchodního partnerství odstoupila.

Jako nejdůležitější faktor, který přispěl k nedostavění JE, byla cena a nenalezení soukromého investora. Neboť v průběhu více než 2 let smlouvání se nabídka z původního kontraktu 4 miliard EUR, vyšplhala na 6,3 miliard EUR. Podle renomované konzultační firmy Parsons and Deloitte se však konečná suma mohla vyšplhat k 10 miliardám EUR. [51] [52]

8 ZÁVĚR

Vzhledem ke stáří jaderných elektráren ve světě, je potřeba se v současné době zaměřit na budoucí náhradu těchto jaderných zdrojů. Poptávka po elektrické energii všude ve světě neustále roste a vzhledem ke snaze snižovat produkci skleníkových plynů, je nutné zaměřit se na výstavbu takových zdrojů elektrické energie, které tyto požadavky splňují.

Vzhledem k tomu, že přes 40 % v současnosti provozovaných jaderných reaktorů je v komerčním provozu více než 30 let, a tedy se blíží k 40 leté hranici své provozní licence, je zřejmé, že pro udržení současného podílu jaderné energie je potřeba ve světě v průběhu nejbližších 10-20 let postavít okolo 200 nových jaderných bloků. Z tohoto důvodu lze očekávat budoucí nárůst výstavby jaderných elektráren. Při pohledu na současný stav výstavby však vidíme její poměrnou stagnaci, neboť většina z 62 v současnosti rozestavěných jaderných reaktorů se nachází v Číně, která svůj jaderný park teprve buduje.

Nemalý dopad na výstavbu jaderných elektráren měly i události v Japonsku v roce 2011, které přinejmenším zpomalily současnou výstavbu. Vzhledem k očekávanému zpřísnění bezpečnostních požadavků, které jsou důsledkem Fukushimašské jaderné havárie, dojde i ke zvýšení nákladů na výstavbu. Nelze opomenout ani to, že důvěra v bezpečnost jaderné energetiky v očích široké veřejnosti opět klesla.

Výstavba nové jaderné elektrárny se řadí mezi nejnáročnější stavitelské projekty současnosti a to jak z technologického, ekonomického i manažerského hlediska. Momentální komplikace výstavby některých jaderných elektráren lze roztrždit do několika odlišných příčin, přičemž každá závisí na mnoha různých faktorech.

U výstavby nových typů jaderných reaktorů jako je EPR, jsou největšími příčinami: nezkušenosti s technologickými postupy při výstavbě a nezkušenost s řízením takto velkých projektů. Vzhledem k podstatě těchto příčin je zde vysoká pravděpodobnost, že v budoucích projektech se doba zpoždění bude snižovat (důkazem tohoto tvrzení může být výstavba JE Tianshan 1, 2).

Při výstavbě jaderné elektrárny je jedním z nejdůležitějších faktorů také finanční stabilita objednatelů nebo nalezení vhodné formy financování pro tento projekt. V případě dostavby JE Mochovce nebo JE Belene bylo největší zpoždění způsobeno ekonomickými problémy, které v případě JE Belene vyústily ve zrušení celého projektu.

Při pohledu na příčinu zpoždění v JE Kudankulam v Indii, kde dochází k masivním protestům proti spuštění této nové jaderné elektrárny, nemůžeme opomenout další faktor, a to že pokud nebude jaderná energetika akceptována širokou veřejností, je zde velká pravděpodobnost komplikací výstavby a v nejhorším případě i zrušení celého projektu. Ve vyspělých zemích jako je například Francie dochází před začátkem výstavby široká diskuze s veřejností. Zatímco kontrakt na výstavbu JE Kudankulam byl podepsán mezi Indickou a Ruskou vládou bez veřejné diskuze a v roce 1988, tedy 2 roky po Černobylské havárii.

I přes veškeré současné komplikace je zřejmé, že výstavba nových jaderných zdrojů bude pokračovat i v budoucích letech. V současnosti totiž neexistuje jiný zdroj elektrické energie, který neprodukuje skleníkové plyny a zároveň dokáže uspokojit neustále rostoucí poptávku po elektrické energii.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HEŘMANSKÝ, Bedřich . *Jaderné reaktory I. : Reaktory II. generace*. Praha : [s.n.], 2010. 221 s.
- [2] LILLINGTON, John . *The Future of Nuclear Power*. Amsterdam : ELSEVIER, 2004. 390 s. ISBN 0-08-044489-X.
- [3] FISCHER, David. *HISTORY OF THE INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY : The First Forty Years* [online]. A fortieth anniversary publication. Vienna : [s.n.], 1997 [cit. 2011-12-10]. Dostupné z: <http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1032_web.pdf>. ISBN 92-0-102397-9.
- [4] KOK, Kenneth D. *Nuclear Engineering Handbook*. London : CRC Press, 2009. 768 s. ISBN 978-1-4200-5390-6.
- [5] *IAEA PRIS* [online]. 2000, 2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <<http://www.iaea.org/programmes/a2/>>.
- [6] TANGUY, Pierre. Three decades of nuclear safety : Nuclear plant safety has not been a static concept. *IAEA Bulletin*. 1988, 2, s. 51-57. Dostupné z: <<http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull302/30202085157.pdf>>.
- [7] CHAR, N.L.; CSIK, B.J. History power development: History and outlook : Events have changed the global prospects for nuclear power. *IAEA Bulletin*. 1987, 3, s. 19-25. Dostupné z: <<http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull293/29304781925.pdf>>.
- [8] *World Nuclear Association* [online]. 2010 [cit. 2012-05-20]. Outline History of Nuclear Energy. Dostupné z: <<http://world-nuclear.org/info/inf54.html>>.
- [9] BP Statistical Review of World Energy June 2011. In [online]. London : BP p.l.c., 2011 [cit. 2011-11-14]. Dostupné z: <http://www.bp.com/assets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_public/public/statistical_energy_review_2011/STAGING/local_assets/pdf/statistical_review_of_wworl_energy_full_report_2011.pdf>.
- [10] *Fast Reactor Database 2006 Update*. Vienna : [s.n.], 2006. 441 s. Dostupné z: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1531_web.pdf>. IAEA-TECDOC-1531.
- [11] *World Nuclear Association* [online]. 2012, květen 2012 [cit. 2012-05-20]. Nuclear Power in China. Dostupné z: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf63.html>>.
- [12] *World Nuclear Association* [online]. 2012, květen 2012 [cit. 2012-05-20]. Nuclear Power in India. Dostupné z: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf53.html>>.
- [13] *World Nuclear Association* [online]. 2012, květen 2012 [cit. 2012-05-20]. Nuclear Power in Russia. Dostupné z: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf45.html>>.
- [14] *World Nuclear Association* [online]. 2012, květen 2012 [cit. 2012-05-20]. Nuclear Power in Japan. Dostupné z: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf79.html>>.
- [15] *World Nuclear Association* [online]. 2012, únor 2012 [cit. 2012-05-20]. Plans for New Reactors Worldwide. Dostupné z: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf17.html>>.
- [16] *World Nuclear Association* [online]. 2012, duben 2012 [cit. 2012-05-20]. Nuclear Power in South Korea. Dostupné z: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf81.html>>.

- [17] *NUCLEAR POWER REACTORS IN THE WORLD*. 2011 Edition. Vienna : IAEA, 2011. 85 s. Dostupné z: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/RDS2_web.pdf> ISBN 978-92-0-117810-7>.
- [18] DRÁBOVÁ, D. *Stres v jádře, jádro ve stresu*. In Letní škola jaderného inženýrství [on line]. 2011 [cit. 2011-12-09].
- [19] Generation IV: International Forum. <i>GenIV</i> [online]. 2012 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <<http://www.gen-4.org/Technology/evolution.htm>>.
- [20] TANZER, M. *Historie a technologie tlakovodních reaktorů VVER*. In Plzeň [on line]. 2009 [cit. 2011-11-09].
- [21] TANZER, M. *Vybrané kapitoly z historie objevování radioactivity a jaderné energie*. In Plzeň [on line]. 2009 [cit. 2011-11-02].
- [22] ZDEBOR, J. *Současnost a budoucnost jaderné energetiky*. In Letní škola jaderného inženýrství [on line]. 2011 [cit. 2011-11-2].
- [23] ZDEBOR, J. *Primární okruh jaderné elektrárny*. In Letní škola jaderného inženýrství [on line]. 2009 [cit. 2011-11-20].
- [24] HEZOUČKÝ, J. *Brief overview of advanced nuclear power plant*. In Vilnius [on line]. 2008 [cit. 2011-11-20].
- [25] CARRÉ, F. *Next Generation Nuclear Reactors*. In Czech Technical University - Prague [on line]. 2009 [cit. 2011-12-09].
- [26] ŠKODA, R. *Current reactor technology*. Letní škola jaderného inženýrství [on line]. 2011 [cit. 2011-12-09].
- [27] ZDEBOR, J. *Moderní trendy ve vývoji energetických jaderných reaktorů*. In Letní škola jaderného inženýrství [on line]. 2011 [cit. 2011-12-09].
- [28] *World Nuclear Association* [online]. 2012, květen 2012 [cit. 2012-05-20]. Nuclear Power in United Kingdom. Dostupné z: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf84.html>>.
- [29] *World Nuclear Association* [online]. 2011 [cit. 2011-12-11]. WNA Nuclear Century Outlook. Dostupné z: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf81.html>>.
- [30] *WNA Pocket Guide*. 2011 Edition. Dostupné z: <<http://world-nuclear.org/uploadedFiles/Pocket%20Guide%202009%20Reactors.pdf>>.
- [31] Liquid Metal cooled Fast Breeder Reactors. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2008 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:LMFBR_schematics2.svg>.
- [32] Magnox reactor schematic. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2008 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Magnox_reactor_schematic.svg>.
- [33] SCHNEIDER, Mycle, Antony FROGGATT a Steve THOMAS. *Nuclear Power in a Post-Fukushima World: 25 years after the Chernobyl accident*. Paris, Berlin, Washington: Worldwatch Institute, 2011. Dostupné z: <http://www.worldwatch.org/system/files/pdf/WorldNuclearIndustryStatusReport2011_%20FINAL.pdf>.
- [34] History: Loviisa power plant. *Fortum: Nuclear power* [online]. 2012, květen 2012 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <<http://www.fortum.com/en/energy-production/nuclear-power/loviisa-1--2/history/pages/default.aspx>>.

- [35] OL1 and OL2: Olkiluoto 1 and Olkiluoto 2 general. TVO [online]. 2012 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <<http://www.tvo.fi/www/page/ol1andol2/>>.
- [36] AALTO UNIVERSITY. *Case Olkiluoto 3 Nuclear Power Plant Project in Finland*. Finland, 2010. Dostupné z: <http://crgp.stanford.edu/events/presentations/CRGP_Alto_2010/Case_1/Olkiluoto_3_case_workshop_1.pdf>.
- [37] Dimensions of distance in a project network: Exploring Olkiluoto 3 nuclear power plant project. *International Journal of Project Management* [online]. 2009, č. 27, s. 142-153 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <<http://www.journals.elsevier.com/international-journal-of-project-management/#description>>.
- [38] TVO. Olkiluoto 3 News Archive [online]. 2012 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <<http://www.tvo.fi/www/page/2770/>>.
- [39] *World Nuclear Association* [online]. 2011, únor 2012 [cit. 2012-05-18]. Nuclear Power in France. Dostupné z: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf40.html>>.
- [40] A new governance approach for multi-firm projects: Lessons from Olkiluoto 3 and Flamanville 3 nuclear power plant projects. *International Journal of Project Management* [online]. 2011, č. 29, s. 647-660 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <<http://www.journals.elsevier.com/international-journal-of-project-management/#description>>.
- [41] EDF delays Flamanville 3 nuclear project again. In: *REUTERS* [online]. 2011 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <<http://www.reuters.com/article/2011/07/20/edf-flamanville-idUSLDE76J1A520110720>>.
- [42] EDF. *2012 Credit update* [online]. 2012 [cit. 2011-12-09]. Dostupné z: <http://finance.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/Finance/Investisseurs/Annee/2012/ED E_RoadshowCredit_20120416_va%20.pdf>.
- [43] Flamanville 3 EPR Project: Technical news. EDF. *EDF* [online]. 2012 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <<http://energie.edf.com/nucleaire/carte-des-centrales-nucleaires/flamanville-3-epr-project/technical-news-2462.html>>.
- [44] Kudankulam Atomic Power Project. NPCIL. *NUCLEAR POWER CORPORATION OF INDIA LIMITED: A Government of India Enterprise* [online]. 2012 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <<http://www.npcil.nic.in/main/ConstructionDetail.aspx?ReactorID=77>>.
- [45] AGRAWAL, S.K., Ashok CHAUHAN a Alok MISHRA. The VVERs at Kudankulam. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2006, č. 236, s. 812-835 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <<http://www.journals.elsevier.com/nuclear-engineering-and-design/#description>>.
- [46] Tianwan NPP (China). *ATOMSTROYEXPORT* [online]. 2012 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <<http://www.atomstroyexport.com/project/eng>>.
- [47] World nuclear news: Final acceptance of initial Tianwan units. *WNN* [online]. 2010 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear-news.org/NN-Final_acceptance_of_initial_Tianwan_units-0605104.html>.
- [48] Vývoj projektu dostavby 3. a 4. bloku Elektrárne Mochovce. *All for Power*. 2012, roč. 2012, č. 1, s. 11-12. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2011/mochovce_uvod.pdf>.

-
- [49] Dostavba 3. a 4. bloku AE Mochovce. *All for Power* [online]. 2009 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <<http://www.allforpower.cz/clanek/dostavba-3-a-4-bloku-ae-mochovce/>>.
- [50] História projektu. *SLOVENSKÉ ELEKTRÁRNE: Mochovce 3&4* [online]. 2012 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <<http://www.seas.sk/sk/elektrarne/projekty/mochovce-3-4/mochovce34-historia>>.
- [51] *World Nuclear Association* [online]. 2012, duben 2012 [cit. 2011-11-22]. Nuclear Power in Bulgaria. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/info/inf87.html#Note_1>.
- [52] World nuclear news: Bulgarian government drops Belene. *WNN* [online]. 2012 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear-news.org/NN-Bulgarian_government_pulls_plug_on_Belene-2903127.html>.
- [53] Kudankulam NPP (India). *ATOMSTROYEXPORT* [online]. 2012 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <<http://www.atomstroyexport.com/project/eng/23>>.