

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Jaderná elektrárna – systém kontroly a řízení PO

**vedoucí práce: Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.
autor: Jiří Melka**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jiří MELKA
Osobní číslo: E11B0457P
Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Komerční elektrotechnika
Název tématu: Jaderná elektrárna - systém kontroly a řízení PO
Zadávací katedra: Katedra technologií a měření

Zásady pro vypracování:

1. Popište princip výroby elektrické energie pomocí jaderného paliva.
2. Uveďte výhody a nevýhody systému jaderné elektrárny.
3. Popište systém kontroly a řízení PO jaderné elektrárny.
4. Zhodnoťte systém jaderné bezpečnosti - pozice SÚJB.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická


Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

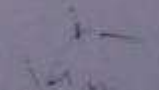
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 17. října 2011

Termín odevzdání bakalářské práce: 3. června 2012


Doc. Ing. JIN Hammerbauer, Ph.D.
děkan


F.S.


Doc. Ing. Vladimír Štefčík, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná bakalářská práce pojednává o jaderných elektrárnách, jejich principu, výhodách a nevýhodách vůči ostatním elektrárnám, o systému kontroly a řízení (zabezpečovacích systémech) a o dozorných orgánech.

Klíčová slova

Jaderná elektrárna, primární okruh, sekundární okruh, reaktor, tepelný výkon, elektrický výkon, parogenerátor, hlavní cirkulační čerpadlo, havárie, EXCORE, ESFAS, RTS, TRIP BREAKER, dozorné orgány.

Abstract

The bachelor thesis presents the principles of nuclear power plant, their advantages and disadvantages against other power plants, about the system and control (security systems) and regulatory authorities.

Key words

Nuclear power plant, primary circuit, secondary circuit, reactor, thermal power, electric power, steam generator, main circulating pump, accident, EXCORE, ESFAS, TRIP BREAKER, regulatory authorities.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne 7.6.2012

Jiří Melka

.....

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A OZNAČENÍ	9
ÚVOD	10
1 VÝROBA ELEKTRICKÉ ENERGIE POMOCÍ JADERNÉHO ZDROJE	11
1.1 POPIS	12
1.2 VÝKON	12
1.2.1 Výkon reaktoru	12
1.2.2 Elektrický hrubý výkon	13
1.2.3 Měrná spotřeba tepla.....	13
1.3 PALIVO	13
1.4 HLAVNÍ ČÁSTI PRIMÁRNÍHO OKRUHU	15
1.5 STRUČNÝ POPIS HLAVNÍ TECHNOLOGIE PROVOZNÍCH SOUBORŮ PRIMÁRNÍHO OKRUHU.....	15
1.5.1 Reaktor	15
1.5.2 Parogenerátory.....	16
1.5.3 Systém kompenzace objemu.....	17
1.5.4 Hlavní cirkulační potrubí	17
1.5.5 Hlavní cirkulační čerpadla.....	18
1.6 BEZPEČNOSTNÍ BARIÉRY	19
1.7 HAVARIJNÍ SYSTÉMY	19
1.7.1 Prevence havárií.....	19
1.8 PŘEDPOKLÁDANÉ (REFERENČNÍ) HAVÁRIE	20
1.8.1 Událost se ztrátou chladiva (<i>Loss of Coolant Accident - LOCA</i>).....	20
1.8.2 Prasknutí trubky systému pro odpouštění chladiva z primárního okruhu	21
1.8.3 Havárie s únikem radionuklidů do vodních ekosystémů.....	22
1.8.4 Hodnocení radiologických následků referenční havárie	22
1.9 ROZDĚLENÍ HAVARIJNÍCH SYSTÉMŮ	23
2 VÝHODY A NEVÝHODY JADERNÝCH ELEKTRÁREN	24
2.1 JADERNÉ ELEKTRÁRNY.....	24
2.2 POROVNÁNÍ JADERNÝCH A UHELNÝCH ELEKTRÁREN	25
2.2.1 Srovnání investičních nákladů.....	26
2.2.2 Externí náklady.....	26
3 SYSTÉM KONTROLY A ŘÍZENÍ PRIMÁRNÍHO OKRUHU	28
3.1 ČLENĚNÍ (JADERNÝ A KONVENČNÍ OSTROV).....	28
3.2 ÚČEL SYSTÉMU SKŘ.....	28
3.3 ÚROVNĚ ŘÍZENÍ.....	29
3.4 FUNKČNÍ ČLENĚNÍ.....	30

3.5	POŽADAVKY NA ZAJIŠTĚNÍ FUNKČNOSTI BEZPEČNOSTNÍCH SYSTÉMŮ – PRIMÁRNÍ ČÁST	30
3.6	ZABEZPEČOVACÍ SYSTÉMY SKŘ	31
3.6.1	<i>Systém rychlého odstavení reaktoru - RTS/DRTS</i>	31
3.6.2	<i>Výkonový vypínač rychlého odstavení reaktoru - BREAKER</i>	31
3.6.3	<i>Systém měření neutronového toku - EXCORE</i>	32
3.6.4	<i>Systém aktivace technických prostředků zajištění - ESFAS</i>	32
3.6.5	<i>Způsob řízení</i>	33
3.6.6	<i>Vazba na HMI</i>	33
3.6.6.1	<i>Řízení z dozoren</i>	33
3.6.6.2	<i>Signalizace, ovládání a druhy zobrazení</i>	33
3.6.6.3	<i>Lokální HMI</i>	34
3.6.7	<i>Datová komunikace</i>	34
3.7	ELEKTRICKÉ NAPÁJENÍ.....	34
3.8	ŘÍDICÍ CENTRA A PRACOVNÍŠTĚ.....	35
4	BEZPEČNOST JADERNÝCH ELEKTRÁREN	36
4.1	DOZORNÉ ORGÁNY	36
4.1.1	<i>Stupnice pro hodnocení událostí v jaderných elektrárnách INES</i>	36
4.1.2	<i>Státní úřad pro jadernou bezpečnost - SÚJB</i>	37
4.2	BEZPEČNÉ ULOŽENÍ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ	38
4.2.1	<i>Mezisklad vyhořelého paliva</i>	39
4.3	MONITOROVÁNÍ RADIOAKTIVITY	39
	ZÁVĚR.....	41
	LITERATURA	42

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A OZNAČENÍ

AZ	Aktivní zóna reaktoru
BD	Bloková dozorna
BPP	Budova pomocného provozu
ESFAS	Systém aktivace technických prostředků zajištění
EXCORE	Systém měření neutronového toku
HA	Hydroakumulátor
H ₃ BO ₃	Kyselina boritá
HČČ	Hlavní cirkulační čerpadlo
HCP	Hlavní cirkulační potrubí
INES	Mezinárodní stupnice jaderných událostí
IO	Primární okruh
IIO	Sekundární okruh
JE	Jaderná elektrárna
KO	Kompenzátor objemu
LOCA	Ztráta chladicí kapaliny
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
MSVP	Mezisklad vyhořelého paliva
MVZ	Maximální výpočtové zemětřesení
MWe	Megawatt elektrický
MWt	Megawatt tepelný
ND	Nouzová dozorna
PG	Parogenerátor
PO	Primární okruh
RAO	Radioaktivní odpad
RMS	Radiační monitorovací síť
RTS	Systém rychlého odstavení reaktoru
SKŘ	Systém kontroly a řízení
SO	Sekundární okruh
TRIP BREAKER	Výkonový vypínač rychlého odstavení reaktoru
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
ÚJD	Ústav jadrového dozoru
URAO	Úložiště radioaktivního odpadu
VVER	Vodo-vodní energetický reaktor
WANO	Světová asociace provozovatelů jaderných elektráren
WENRA	Západoevropská asociace jaderných dozorů

ÚVOD

Tato bakalářská práce je zaměřena na dvouokruhové elektrárny s reaktory typu VVER-440, které se nacházejí například v JE Dukovany, JE Jaslovské Bohunice a JE Mochovce. V práci popisuji výrobu elektrické energie pomocí jaderného paliva, výhody a nevýhody systému jaderných elektráren, systém kontroly a řízení primárního okruhu jaderné elektrárny a systém jaderné bezpečnosti z pohledu Státního úřadu pro jadernou bezpečnost.

V první kapitole mé bakalářské práce popisuji princip výroby elektrické energie pomocí jaderného paliva, tedy princip jaderné elektrárny. Jadernou elektrárnu jsem si vybral, protože si myslím, že její využití je nejekonomičtější, jak popisuji v 2. kapitole: Výhody a nevýhody jaderných elektráren.

V části o systému kontroly a řízení jsem se zaměřil na bezpečnostní systémy, jelikož otázka bezpečnosti jaderných elektráren je jedna z nejaktuálnějších po nehodě v jaderné elektrárně Fukušima.

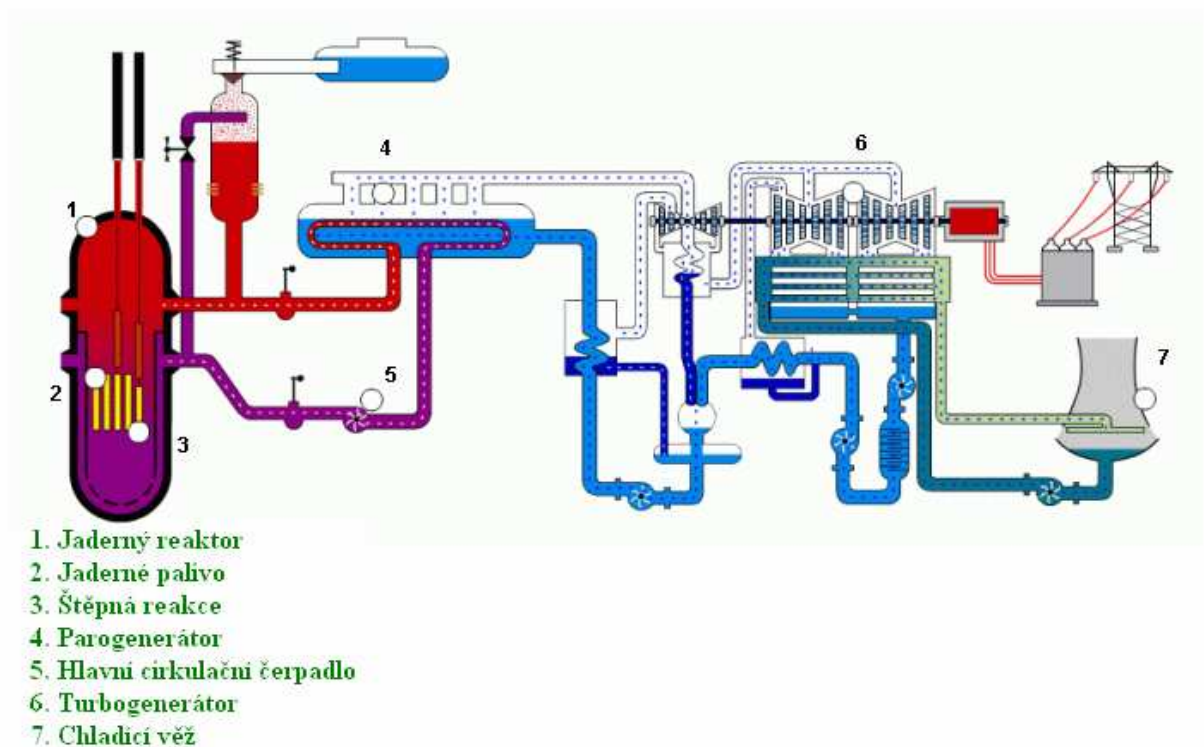
V poslední kapitole zhodnotím bezpečnost jaderných elektráren z pohledu dozorných orgánů, převážně Státního úřadu pro jadernou bezpečnost. Dále chci uvést stupnici pro hodnocení událostí v jaderných elektrárnách a popsat nakládání s radioaktivními odpady z jaderných elektráren.

1 Výroba elektrické energie pomocí jaderného zdroje

V jaderném reaktoru probíhá řízená štěpná reakce, díky které se ohřívá voda v primárním okruhu. Tato voda je hnána pomocí čerpadel do parogenerátoru, kde se mění v páru, která následně roztáčí turbínu. Hřídel turbíny je spojena s generátorem, který vyrábí elektrickou energii, její hladina je dále transformátorem změněna na potřebnou úroveň, aby mohla být efektivně rozvedena.

Výrobním programem jaderné elektrárny je výroba elektrické energie pro základní síť. Zdrojem energie jsou tlakovodní reaktory, pracující s mírně obohaceným palivem. Pro potřeby jaderné energetiky v České republice se v přírodě vyskytuje v dostatečném množství. Z dvou hlavních izotopů U^{238} a U^{235} jsou pro štěpnou reakci použitelné jen jádra atomů U^{235} . V přírodním uranu se vyskytují v množství přibližně 0,7 %. Většina reaktorů využívá mírně obohacený uran, tj. takový, ve kterém je podíl uranu 235 pomocí speciální technologie zvýšený na 2 až 4%. [1]

Schéma VVER 440



Obr. 1 Schéma jaderné elektrárny (Zdroj: [2])

1.1 Popis

V této práci jsem se zaměřil na typ tlakovodních reaktorů VVER 440, instalovaných v ČR v JE Dukovany, v SR v JE Jaslovské Bohunice a JE Mochovce. Předností těchto reaktorů je tzv. inherentní bezpečnost, daná fyzikálními zákony. Principem této bezpečnosti je, že při zvyšující se teplotě klesá schopnost vody umožnit řetězovou reakci. [3]

Jaderná elektrárna s reaktorem typu VVER 440 vychází ze základního koncepčního řešení formou dvojbloků, většinou první - druhý blok a třetí - čtvrtý blok. Hlavní výrobní blok se dvěma bloky o instalovaném výkonu 2 x 440 MW je možno charakterizovat jako funkční a dispozičně uzavřený celek, který z hlediska jaderné a požární bezpečnosti, manipulace s čerstvým a vyhořelým palivem, manipulace s radioaktivními odpady, vstupů a výstupů do kontrolovaných zón bloků a průchodů jejich kontrolovanými zónami včetně řešení dozoren, tvoří uzavřený celek. Jeden blok tvoří reaktor s kompenzátorem objemu, šest cirkulačních smyček s dvanácti hlavními uzavíracími armaturami (6 na horkých větvích, 6 na studených větvích), šest parogenerátorů a dvě turbíny. [4]

Provoz primární části zajišťují pomocné systémy primárního a sekundárního okruhu, systémy pro likvidaci havárií, systémy kontroly, čištění a likvidace RA medií, dieselgenerátorová stanice, kompresorová stanice, výměňiková stanice, olejové a plynové hospodářství, vnější potrubní rozvody, stanice chladu, vzduchotechnické systémy a další.

Sekundární okruh a připojení do elektrifikační soustavy se neliší od klasických elektráren. Důkladněji je zpracované pouze rezervní napájení, které je zabezpečované pomocí dvou transformátorů 100 kV ze sítě. Rezervní napájení má dvojblokový charakter (každá linka napájí 2 bloky, 1 + 3, 2 + 4). Rezervní transformátory jednotlivých čtyř bloků jsou k těmto linkám připojeny pomocí vypínačů 110 kV.

1.2 Výkon

1.2.1 Výkon reaktoru

Výkon reaktoru VVER 440 typ V-213 je 1375 MWt. Dva tyto reaktory tvoří tzv. dvojblok. Provoz bloku je kampaňovitý, se střední dobou kampaně 330 efektivních dní, s výměnou 1/5 paliva v každém roce. [5], [6]

1.2.2 Elektrický hrubý výkon

1. blok: TG-1 220 MW
TG-2 220 MW

Celkový elektrický výkon 1. reaktorového bloku: 440 MW.

2. blok: TG-1 220 MW
TG-2 220 MW

Celkový elektrický výkon 2. reaktorového bloku: 440 MW. [4]

1.2.3 Měrná spotřeba tepla

Měrná spotřeba tepla při jmenovitém 100 % výkonu reaktorového bloku:

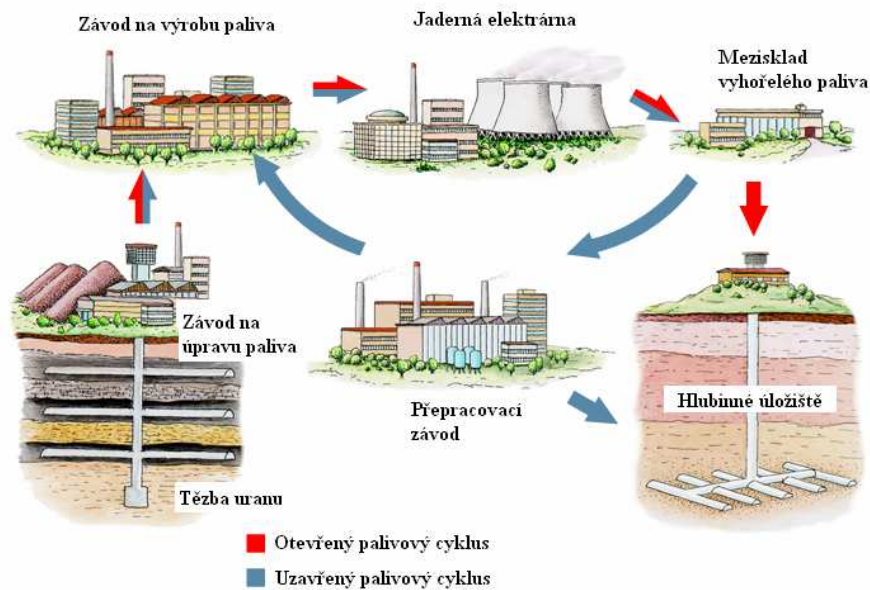
1. blok: 2,9071 MWt/MWe
2. blok: 2,9071 MWt/MWe

Ztráta kondenzátu při jmenovitém 100% výkonu reaktorového bloku: do 4 kg/s/blok. [4]

1.3 Palivo

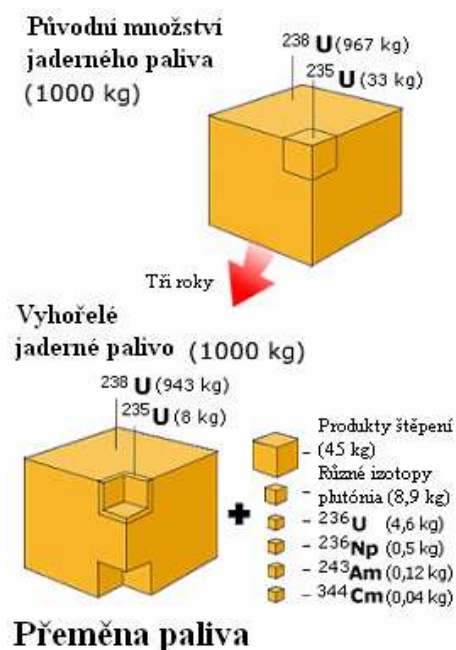
Palivo se v reaktoru štěpí, a přitom vzniká větší množství radioaktivních štěpných produktů. Některé z jader U^{238} v palivu se jadernými reakcemi přeměňují na těžší radioaktivní prvky. Nejdůležitější z nich je izotop plutonia Pu^{239} , který je štěpitelný a je potenciálním palivem. V jaderném reaktoru, ve kterém se používá jako palivo uran, vzniká až jedna třetina uvolněné energie štěpením plutonia. Po vyhoření se palivo z reaktoru vybírá a ukládá se na dobu 3 - 4 let do bazénu skladování vyhořeného paliva umístěného vedle reaktoru. Ve vyhořeném palivu zůstává ještě i nespotřebovaný uran, plutonium a jiné těžké prvky. Po dostatečném ochlazení a snížení radiace v bazénu skladování se vyhořené palivo může přepracovat, čím se získává nevyužitý uran a plutonium pro nové jaderné palivo. [7]

Palivový cyklus



Obr. 2 Palivový cyklus (Zdroj: [8])

V reaktorech VVER 440 se používá jako palivo oxid uraničitý (UO_2) ve formě palivových tabletek. Ty jsou poskládané v palivových proutcích, z kterých je složena palivová kazeta. V reaktoru jsou pracovní a regulační kazety. Regulační kazeta pozůstává z pracovní části a absorpční části, která je pevně spojená s pohonem regulační kazety. Elektropohony regulačních kazet jsou umístěné v horním bloku nad reaktorem a slouží pro pracovní nebo bezpečnostní vertikální pohyb regulačních kazet. [9]



Obr. 3 Přeměna paliva (Zdroj: [10])

1.4 Hlavní části primárního okruhu

Primární část jaderné elektrárny se skládá z následujících souborů:

- tlakovodní reaktor,
- parogenerátory,
- systém kompenzace objemu,
- hlavní cirkulační potrubí,
- hlavní cirkulační čerpadla,
- hlavní uzavírací armatury,
- provozní diagnostika primárního okruhu.

1.5 Stručný popis hlavní technologie provozních souborů primárního okruhu

Primární okruh tvoří jaderně-parogenerační zařízení, sloužící k získávání tepelné energie pomocí řízené jaderné reakce štěpením uranu, odvodu tepla a generaci páry v sekundární části PG.

Primární okruh se skládá z tlakovodního reaktoru typu VVER 440 o výkonu 1375 MW, šesti cirkulačních smyček a systému kompenzace objemu. Každá cirkulační smyčka zahrnuje parogenerátor o výkonu 452 t páry/h, hlavní cirkulační čerpadlo o objemovém průtoku 6500 – 7100 m³/h, hlavní uzavírací armatury na přívodní a odvodní větvi a hlavní cirkulační potrubí DN 500. Dispozičně jsou všechny systémy umístěny v budově reaktoru. [4]

1.5.1 Reaktor

Tlakovodní reaktor VVER 440 typ V-213 je heterogenní lehkovodní reaktor, pracující na bázi štěpné reakce působením tepelných neutronů. Jako palivo je použit slabě obohacený kysličník uraničitý UO₂, chladivem a současně moderátorem je demineralizovaná voda s obsahem kyseliny borité. [9]

Do reaktoru je chladivo přiváděno hlavním cirkulačním potrubím od hlavních cirkulačních čerpadel, která zajišťují cirkulaci chladiva o množství minimálně 6500 m³/h v každé ze šesti smyček primárního okruhu. Chladivo proudí kruhovou mezerou mezi nádobou a šachtou reaktoru ke dnu tlakové nádoby, kde se proud chladiva obrací o 180° a prostupuje perforovaným eliptickým dnem šachty reaktoru do palivových kazet aktivní

zóny. Při průchodu aktivní zónou se chladivo ohřívá o 30 °C teplem, které se uvolňuje při štěpné reakci. Chladivo vystupuje z pracovních kazet otvory v dolní desce bloku ochranných trub a z kazet HRK otvory v ochranných trubkách bloku ochranných trub. Dále prochází přes otvory v horní části šachty do kruhové mezery mezi šachtou a tlakovou nádobou reaktoru a vystupuje šesti výstupními nátrubky. Teplota chladiva na výstupu z reaktoru je 294 ± 2 °C, výstupní tlak chladiva je 12,26 MPa. [4]

Těleso tlakové nádoby je válcová nádoba, svařená z kovaných prstenců a eliptického dna. Je určeno k rozmístění zařízení vnitřní vestavby, tj. šachty reaktoru, aktivní zóny, bloku ochranných trub. Těsnění tělesa reaktoru zajišťuje hermetičnost přírubového spoje mezi tělesem a víkem reaktoru.

Hlavními částmi vnitřní vestavby reaktoru jsou šachta reaktoru, dno šachty reaktoru, koš aktivní zóny, blok ochranných trubek a aktivní zóna. Horní část tělesa tlakové nádoby tvoří přírubový prstenc. Na čelní ploše tohoto prstence je 60 otvorů pro závrtné šrouby hlavního přírubového spoje a dva páry drážek pro těsnění.

Řízení a regulace výkonu reaktoru se uskutečňuje vertikálním přemístováním kazet HRK v aktivní zóně a změnou koncentrace kyseliny borité v chladivu (0 - 12g H₃BO₃/kg H₂O).

Technické parametry v aktivní zóně reaktoru:

- tepelný výkon 1375 MW,
- teplota vody na výstupu z reaktoru 294 ± 2 °C,
- teplota vody na vstupu do reaktoru 265 ± 2 °C,
- střední ohřev v reaktoru 30 °C,
- tlak vody na výstupu z AZ 12,26 MPa,
- palivová kazeta – délka aktivní části 248 cm,
- palivová kazeta – hmotnost uranu v kazetě 126,3 kg. [4]

1.5.2 Parogenerátory

Parogenerátor PGV-213 je určen k výrobě nasycené páry o tlaku 4,6 MPa a teplotě 256 °C. V jaderné elektrárně je PG spolu s reaktorem a HCČ základní součástí cirkulačních smyček primárního okruhu bloku. Vlastní parogenerátor je horizontální válcová tlaková nádoba uzavřená eliptickými dny. Ve střední části tělesa PG jsou umístěny dva kolektory, ke kterým se připojují smyčky primárního okruhu. Do kolektorů jsou zabudovány trubky, tvořící teplosměnnou plochu. Uvnitř tělesa PG jsou umístěny také

systémy rozvodu napájecí vody a separační zařízení. V PG se teplo, odváděné chladivem z AZ, předává vodě sekundárního okruhu a generuje se suchá sytá pára. Chladivo primárního okruhu prochází z horké větve smyčky HCP do vstupního kolektoru, proudí přes trubkový výparník do výstupního kolektoru a vrací se do studené větve smyčky HCP. V trubkovém výparníku je teplo předáváno parovodní směsí IIO, která se nachází v prostoru mezi trubkami. PG má přirozenou cirkulaci sekundární vody. Vzniklá pára prochází separátorem páry, shromažďuje se v parním sběrači a v množství 444 t/hod je odváděna parovody LBA k turbínám. [4], [11]

1.5.3 Systém kompenzace objemu

Systém kompenzace objemu je určen k vytváření počátečního tlaku v primárním okruhu v režimu spouštění, k udržování tlaku a omezení výchylek tlaku a objemu při změnách teplotního režimu během normálního provozu. Dále slouží k pojištění primárního okruhu proti stoupaní tlaku nad povolenou hodnotu.

Kompenzátor objemu (KO) je základním elementem systému kompenzace objemu a regulace tlaku v primárním okruhu. Vodní prostor KO je připojen dvěma potrubními větvemi na neoddělitelnou část horké větve hlavního cirkulačního potrubí a tím i na reaktor. KO je opatřen elektroohříváky, systémem vstupu chladiva do parního prostoru KO, přepouštěním páry do barbotážní nádrže a přívodem VT dusíku. V nominálním režimu je tlak v KO udržován regulovaným ohřevem vody. Při změnách tepelných poměrů a v důsledku toho i změnách objemu a tlaku se tlakové výkyvy omezují zvýšením ohřevu nebo vstříkáním média ze studené větve hlavního cirkulačního potrubí. Ohřev chladiva je prováděn pomocí 108 kusů elektrických ponorných topných těles, zapojených do 5 skupin, o jednotkovém výkonu 15 kW v závislosti na tlaku v primárním okruhu. Ohřev chladiva i vstřík do parního prostoru KO jsou řízeny regulátorem tlaku v KO. Systém regulace tlaku s činností na 1. regulační skupinu elektroohříváků kompenzátoru objemu pracuje při vybavení měření tlaku nad aktivní zónou měřícími obvody s chybou měření do 0,5 %. Na sprchový systém v parním prostoru KO je chladivo přivedeno z neoddělitelné části studené větve hlavního cirkulačního potrubí. Na trase od KO k pojistnému ventilu KO je instalováno potrubí pro odtakování primárního okruhu v režimu těžké havárie s uzavíracími armaturami s elektropohonem. [12], [13]

1.5.4 Hlavní cirkulační potrubí

Hlavní cirkulační potrubí (HCP) DN500 (566 x 34 N) spolu s hlavními

komponenty primárního okruhu, tj. reaktor, parogenerátory, hlavní cirkulační čerpadla a hlavní uzavírací armatury, tvoří cirkulační okruh, který je určen k přenosu tepla mezi reaktorem a parogenerátory. [13]

Hlavní cirkulační potrubí je tvořeno šesti smyčkami (č. 1 až 6), z nichž každá představuje samostatný chladicí okruh, navržený na odvod zhruba 1/6 tepla z reaktoru. V každé smyčce jsou dvě větve - horká a studená. Obě větve jsou osazeny hlavními uzavíracími armaturami. Instalace uzavíracích armatur na potrubí umožňuje v případě potřeby odpojení libovolné smyčky od pracujícího okruhu s příslušným snížením výkonu reaktoru. Hlavní cirkulační potrubí je opatřeno nátrubky odvodu a přívodu kontinuálního čištění chladiva primárního okruhu, nátrubky přívodu vody od vysokotlakých čerpadel havarijního doplňování primárního okruhu a nízkotlakového čerpadla havarijního dochlazování aktivní zóny reaktoru, nátrubky připojení KO, drenáží hlavního cirkulačního potrubí a SKŘ. [13]

Na hlavním cirkulačním potrubí jsou z důvodu monitorování tepelného stárnutí instalovány objímky pro uchycení vzorků. Chladivem cirkulujícím v hlavním cirkulačním potrubí je demineralizovaná voda s obsahem H_3BO_3 o koncentraci 0 až 12 g H_3BO_3 /kg H_2O . [13]

1.5.5 Hlavní cirkulační čerpadla

V souladu s tepelným výkonem bloku zajišťují hlavní cirkulační čerpadla (HCČ) ve všech normálních provozních režimech JE cirkulaci teplonosného média v hlavním cirkulačním potrubí primárního okruhu. HCČ je odstředivé jednostupňové vertikální čerpadlo s utěsněným hřídelem. Těsnění hřídele vylučuje možnost úniku aktivního teplonosného média do prostorů, ve kterých je primární okruh umístěn. Hřídel čerpadla prochází přes spodní radiální ložisko, uzel těsnění hřídele, horní radiálně-axiální ložisko a pomocí spojky je spojen s hřídelem elektromotoru. [4], [13]

Základní pracovní režim: Spojitá paralelní práce všech šesti čerpadel při nominálních parametrech chladiva.

Ovládání: Spuštění HCČ je ruční dálkové z BD. Spuštění se provádí přímým zapojením do sítě elektrického napájení. Čerpadlo se může spouštět do zavřeného či otevřeného výtlaku, a to při studeném, tak při horkém chladivu primárního okruhu. Jeho spuštění je automaticky blokováno. Odstavení HCČ je také

ruční dálkové z BD, ND nebo automatické dle blokovacích podmínek.

Automatické řízení: Jednotlivá HCC se vypínají při zapůsobení příslušného signálu „Roztržení parovodu“ („STEAM LINE BREAK SGX SIGNAL,,).

1.6 Bezpečnostní bariéry

Jaderná bezpečnost je základním požadavkem na provoz každé jaderné elektrárny. Je to soubor všech technických a organizačních opatření, které musí zabezpečit, aby proces štěpení atomových jader spojených s uvolňováním radioaktivity zůstal za veškerých podmínek pod kontrolou člověka. Základním požadavkem jaderné bezpečnosti jsou ovládaní štěpné reakce, zadržování radioaktivních látek a odvod tepla. [14]

Bezpečnost jaderné elektrárny v první řadě zajišťují bariéry, které jsou dané konstrukčním řešením. Jejich cílem je zamezení úniku radioaktivních látek do životního prostředí a zabezpečit tak ochranu před ionizujícím zářením. Bezpečnostní bariéry tvoří:

- chemicky stabilní matrice paliva,
- kovové pokrytí paliva slitinou zirkonu,
- materiál a tloušťka stěny tlakové nádoby reaktoru a komponentů primárního okruhu,
- železobetonová ochranná obálka s austenitickým obkladem vytvářející hermetickou zónu, ve které se nalézají komponenty primárního okruhu.

1.7 Havarijní systémy

1.7.1 Prevence havárií

Prevence havárií je základním bezpečnostním principem jaderné energetiky, který je uplatňován od jejího počátku ve všech typech jaderných elektráren. [15], [16]

Prevence havárií je zajišťována následovně:

- výběrem lokality tak, že vnější události (přírozené nebo způsobené lidskou činností) neohrozí bezpečnost provozu a že elektrárna je na ně dostatečně vybavena,
- projektem elektrárny, který je založen na deterministickém přístupu a uplatnění principu ochrany do hloubky, který sestává ze čtyř fyzických

bariér (struktura paliva, pokrytí paliva, hermetické obložení stěn primárního okruhu, kontejment) a pěti úrovní ochrany:

- konzervativní projekt, systém zajištění jakosti a kontrol,
- systém řízení a ochrany normálního provozu,
- soubor bezpečnostních systémů, které zvládnou definované projektové nehody,
- opatření pro řízení a zvládnutí nadprojektových havárií,
- opatření vnitřního a vnějšího havarijního plánu.

Prevence havárií je rovněž zajištěna stabilním systémem dozoru, který byl právně zakotven v České republice už v roce 1984. Jeho efektivnost byla potvrzena mezinárodními misemi a ve zprávě o jaderné bezpečnosti WENRA z roku 2000. [15], [16]

1.8 Předpokládané (referenční) havárie

1.8.1 Událost se ztrátou chladiva (Loss of Coolant Accident - LOCA)

Havárie typu LB LOCA (Large Break LOCA), která je způsobena okamžitým úplným prasknutím potrubí primárního okruhu o průměru 500 mm tzv. gilotinovým způsobem je obvykle považována za maximální projektovou havárii. Pravděpodobnost jejího výskytu je udávána v rozmezí 10^{-4} až 10^{-5} za rok. [16], [17]

Nehoda se ztrátou chladiva (LOCA) je důsledkem prasknutí potrubí tvořícího tlakovou hranici primárního okruhu. Předpokládá se, že k prasknutí dojde na hlavním potrubí na nominálním tj. 100% výkonu. První fáze přechodového procesu je charakterizována rychlým odtlakováním primárního okruhu, spojeným s velkými průtoky porušenou smyčkou a téměř úplnou ztrátou chladiva a obnažením aktivní zóny. Po dosažení hodnoty nastavení od ztráty rezervy podchlazení vody v primárním okruhu dojde k rychlému odstavení reaktoru. Současně je iniciována další bezpečnostní funkce, tj. havarijní vstřikování chladiva. I bez zásahu systému rychlého odstavení reaktoru však dojde k rychlému přerušování štěpné řetězové reakce, teplota nedostatečně chlazeného paliva nicméně roste. V průběhu druhé fáze je aktivní zóna chlazená z hydroakumulátoru a z vysokotlakého a nízkotlakého systému havarijního chlazení aktivní zóny. Ukončení výtoku vody z hydroakumulátoru kombinované s růstem vývinu páry vede k opětovnému snížení hladiny vody v reaktoru. Ve třetí fázi přechodového procesu dojde ke druhému obnažení aktivní zóny, což vede k opětovnému růstu teploty paliva. Obsah kapaliny v okruhu

roste v důsledku vysokotlakého a nízkotlakého havarijního vstřikování, dokud není aktivní zóna znovu zaplavena. Tím se zastaví růst teploty paliva. V průběhu dlouhodobého chlazení se teplota aktivní zóny sníží na rovnovážnou stabilní úroveň, odpovídající intenzitě chlazení a vyvíjenému zbytkovému teplu. [16], [17]

Z hlediska úniku radioaktivních látek je důležité, že dvě ze čtyř bariér si zachovávají svoji funkci (struktura paliva a ochranná obálka). Únik radioaktivních látek do životního prostředí je dán uvolněnými radioaktivními látkami a přípustnou mírou netěsnosti ochranné obálky.

1.8.2 Prasknutí trubky systému pro odpouštění chladiva z primárního okruhu

Několik malých potrubních tras na jaderné elektrárně odvádí nebo potenciálně může odvádět primární chladivo mimo ochrannou obálku (kontejnment). Patří mezi ně potrubí pro odběr vzorku, potrubí pro měření, potrubí systému doplňování a bórové regulace, potrubí systému ucpávkové vody hlavních cirkulačních čerpadel a potrubí systému organizovaných úniku z primárního okruhu. Uvažovanou referenční událostí je prasknutí trubky tohoto systému pro odpouštění chladiva z primárního okruhu některého z uvažovaných potrubí. Trasy odpouštění systému normálního doplňování a bórové regulace z každé ze čtyř chladicích smyček reaktoru jsou připojené ke společnému kolektoru, který vede mimo kontejnment. Tyto trasy mají v každé potrubní větvi omezovače průtoku, které omezují průtok média z primárního okruhu do kolektoru. Navíc k těmto omezovačům v každé potrubní větvi je celkový průtok odpouštění řízen odpouštěcími regulačními ventily. Normálně je jeden nebo druhý z těchto ventilů v provozu a reguluje průtok, ten který nereguluje, je uzavřený. Regulace je nastavena tak, že ventil propouští 30 m³/h, ačkoliv jsou přípustné i vyšší průtoky. Výstražná signalizace radiačního monitorovacího systému a další ukazatele, jako je ukazatel hladiny vody v místnostech okolo kontejnmentu, by umožnily operátorovi zjistit prasknutí a jeho místo. Potrubí kolektoru má tři uzavírací armatury, které mohou být uzavřeny, aby oddělily potrubí v případě prasknutí mimo kontejnment. Jakmile je prasknutí objeveno, operátor uzavře uzavírací armatury, aby ukončil událost. S ohledem na ekvivalentní rozměr trhliny je nehoda klasifikována jako událost Kategorie III ANSI. [16], [17]

Tato havárie byla vybrána jako referenční proto, že představuje limitní riziko uvolněné radioaktivity mimo ochrannou obálku. Jelikož má voda unikající z primárního okruhu vysoký tlak a teplotu, rozdělí se při atmosférickém tlaku v obestavěném prostoru

kobek na parovzdušnou a kapalnou složku o teplotě 100°C. Unikající látky vytvářejí v závislosti na atmosférických podmínkách expandující radioaktivní vlečku.

1.8.3 Havárie s únikem radionuklidů do vodních ekosystémů

Úniky radionuklidů jsou během normálního a abnormálního provozu včetně havarijních stavů až do úrovně maximální projektové nehody zahrnuty do organizovaných a kontrolovaných provozních výпустí. Na jaderné elektrárně existuje velký počet nádrží, v nichž se skladují kapalně radioaktivní odpady, z hlediska potenciálního rizika jsou však rozhodující skladovací nádrže koncentrovaných radioaktivních odpadů. V těchto nádržích se za provozu nachází více než 90 % veškeré aktivity přítomné na jaderné elektrárně v kapalných látkách. [16]

Za referenční havárii s únikem kapalných odpadů byla vybrána destrukce těchto nádrží nacházejících se v budově pomocných provozů (BPP) vyvolaná maximálním výpočtovým zemětřesením (MVZ, pravděpodobnost výskytu 10^{-4} reaktor/rok) v kombinaci s výskytem další jednoduché poruchy technologického zařízení (pravděpodobnost 10^{-2} reaktor/rok) a to tak, že dochází k transportu radioaktivních látek směrem k postulovanému bodu.

Důvodem pro tuto volbu je to, že tato havárie představuje největší riziko úniku radioaktivních látek do hydrosféry. Celková pravděpodobnost uskutečnění popsaného scénáře je však pouze 10^{-6} reaktor/roku.

1.8.4 Hodnocení radiologických následků referenční havárie

Prvé dvě referenční havárie představují riziko úniku radioaktivních látek do atmosféry, třetí referenční havárie tvoří „obálku“ rizik radiologických důsledků pro hydrosféru. Základní postup hodnocení radiologických důsledků na životní prostředí je ve všech uvažovaných případech shodný: [16]

- stanovení hodnoty radionuklidů, které se při dané nehodě uvolní,
- určení velikosti úniku z prostorů jaderné elektrárny,
- výpočet šíření radionuklidů v okolním prostředí,
- stanovení kritické skupiny obyvatelstva a výpočet efektivních dávek,
- stanovení efektivních dávek ve vybraných směrech na hranici se sousedními státy.

1.9 Rozdělení havarijních systémů

Havarijní systémy slouží ke zmírnění průběhu a likvidaci následků havárií spojených se ztrátou těsnosti primárního případně sekundárního okruhu a k dochlazování aktivní zóny při zemětřesení. Havarijní systémy se rozdělují na „Systém havarijního chlazení AZ“ a „Systém snížení tlaku v HP a lokalizace RA úniků“. Z hlediska funkce se systém havarijního chlazení AZ dělí na dva základní nezávislé systémy - pasivní a aktivní systém.

Koncepce řešení jaderné bezpečnosti vychází z předpokladu možnosti selhání funkce některého zařízení a proto jsou zálohované. Pasivní systém tvoří dva hydroakumulátory neoddělitelně spojené s reaktorem a při poklesu tlaku v reaktoru samovolná dodávka H_3BO_3 působením expanze dusíku v HA. Aktivní systém je tvořen třemi nezávislými funkčně a technologicky identickými podsystemy, z nichž každý je schopný samostatně plnit úkoly, pro které je určen.

2 Výhody a nevýhody jaderných elektráren

Životní prostředí je ovlivňováno všemi většími zdroji i spotřebiči energie. Námitky lze uplatnit vůči veškerým velkým zdrojům, a to vzhledem k vlivu na krajinnou ekologii, vůči spalovacím technologiím a zejména vzhledem k emisím skleníkových plynů. K jaderným zdrojům - jako jsou JE Dukovany a JE Temelín - lze mít námitky vzhledem k úrovni jaderné i radiační bezpečnosti a k fenoménu „jaderný odpad“. Připomínky vůči obnovitelným zdrojům (jako je vodní energie, spalování biomasy a využití solární energie) mohou směřovat proti enormním nárokům na zábor území.

Vzhledem k tomu, že se lidstvo bez energie neobejde, přichází v úvahu srovnání typu rizika na jedné straně a přínosu na straně druhé. Snahou přitom je, aby prospěch ze zařízení mnohokrát převýšil poznané riziko. Z hlediska životního prostředí jsou významné všechny negativní efekty spojené s použitým palivem - od jeho těžby přes dopravu, úpravu, využití až po emise a odpady. Globální hodnocení se tak netýká pouze vlastního provozu té které elektrárny, ale všech eventuálních ekologických škod plynoucích z využití určitého paliva pro výrobu konečného produktu - elektrické energie.

Důležitou vlastností hovořící v prospěch jaderné energie je objem paliva. Zatímco zhruba 26 tun obohaceného uranu, potřebného pro provoz jednoho bloku JE Temelín, není problém skladovat ani přepravit, v případě plynu je možné mít zásoby pouze v řádu měsíců a postavení nových plynovodů a zásobníků plynu je otázkou velkých investic a dlouhého času.

2.1 Jaderné elektrárny

První využití jaderné reakce k výrobě elektrické energie se experimentálně uskutečnilo 20. 12. 1951 v Národní reaktorové laboratoři v USA. První pokusná jaderná elektrárna byla spuštěna v Obnisku u Moskvy 27. 6. 1954. V Československu byla první jaderná elektrárna spuštěna 24. 10. 1972 v Jaslovských Bohunicích u Trnavy. Největší jadernou elektrárnou na světě s deseti reaktory o čistém elektrickém výkonu 8 814 MW je Fukushima v Japonsku. Nejvíce elektrické energie vyrobené v jaderných elektrárnách produkuje Francie z 56 reaktorů s celkovým výkonem 58 688 MW, což je téměř 73% celkové výroby elektrické energie země. V ČR byl zahájen provoz jaderné elektrárny Dukovany v srpnu 1985 a nyní jsou v provozu 4 reaktory o celkovém výkonu

1 632 MW. Jaderná elektrárna Temelín byla uvedena do provozu v prosinci 2000. Od jara 2003 je s dvěma tlakovodními reaktory VVER 1000 s instalovaným elektrickým výkonem 2000 MW největším energetickým zdrojem v České republice.[18]

V současné době lze konstatovat, že jak JE Dukovany, tak JE Temelín patří z hlediska vlivu na životní prostředí mezi nejšetrnější zdroje výroby elektrické energie. Při jejich provozu nevznikají skleníkové plyny, nespotřebovává se kyslík a suroviny, které mají nenahraditelný význam (kromě jiného pro chemický průmysl). Program environmentální politiky českých jaderných elektráren je založen na prevenci a na trvalém zlepšování vztahu k ochraně životního prostředí. Zahrnuje naplnění všech zákonných norem a stanovuje cíle, kterých chce elektrárna dosáhnout (např. v oblasti odběru vody, kapalných výpustí, odparu a úletu vody, plynných výpustí a nakládání s jadernými odpady včetně uložení jaderného odpadu).

Počáteční nadšení a bezvýhradný souhlas s mírovým využíváním jaderné energie a úspěchy při vývoji jaderných technologií silně narušily nehody jaderných elektráren. Celosvětově zesílila činnost odpůrců jaderné energetiky zejména po černobylské nehodě, kdy havárie elektrárny dosáhla celosvětově vyznaného rozsahu. Stejně negativní efekt mělo i poškození čtyř jaderných elektráren v Japonsku následkem zemětřesení a následnou vlnou tsunami, zejména JE Fukušima I.

2.2 Porovnání jaderných a uhelných elektráren

V Tab.1 můžeme vidět jak velkou efektivní dávkou ionizujícího záření přispívá nejen jaderná, ale i uhelná elektrárna. [19]

Tab. 1 Srovnání - ionizující záření (Zdroj: [19])

Elektrárna	Tzv. efektivní dávka ionizujícího záření
Uhelná 1000 MW	Černé uhlí 0,007-0,11 mSv/rok Hnědé uhlí 0,002-0,08 mSv/rok
Jaderná 1000 MW	0,001-0,01 mSv/rok
Jaderná fúzní 1000-5000 MW (odhad)	0,5-1 mSv/rok

2.2.1 Srovnání investičních nákladů

Pokud srovnáme velikost investičních nákladů na výstavbu jaderné a uhelné, resp. plynové elektrárny, zjistíme, že náklady na výstavbu dvou bloků JE Temelín ve výši 98 mld. Kč (cena do konce září 2004) jsou vynikající investicí neboť jsou v přepočtu 1300 USD/kW (v září 2004 byl kurz CZK/USD okolo 30 Kč), což je pod uváděným a mezinárodně únosným minimem 1500 USD/kW. [19]

Tab. 2 Srovnání - investiční náklady (Zdroj: [19])

Elektrárna	Investiční náklady (USD/kW)	Doba výstavba (roky)
Jaderná lehkovodní	2000-2500	6-7
Jaderná nejmodernější	1500-2000	4-6
Uhelná	1000-2000	4-5
Plynová, kombinovaný cyklus	500-900	2-3

2.2.2 Externí náklady

Za externí vlivy se označují ty vlivy, kterými působí jedna hospodářská organizace na organizaci druhou, a to aniž by k tomu bylo použito cenového mechanismu. Porovnání takových jevů je možné jejich převodem na peněžní hodnoty - ty představují tzv. externí náklady. Externí náklady při výrobě, rozvodu a užití elektřiny jsou vyvolány všemi procesy předcházejícími vlastní výrobu a procesy následnými, jako je těžba paliv, výroba energetických zařízení, likvidace odpadů a další související činnosti. [19]

O externích nákladech se hovoří v souvislosti s jadernými elektrárnami zejména ve vztahu k velkým haváriím, u uhelných elektráren v souvislosti s těžbou a transportem paliv a s působením imisí. Ukazuje se, že nejvyšší externí náklady jsou spojeny se spalovacími procesy a nejnižší s obnovitelnými zdroji. Vztahy mezi externími a finančními náklady u různých technologií odhaduje projekt ExternE takto (jde o náklady v centech USD na výrobu kWh elektrické energie):

Tab. 3 Srovnání - externí náklady (Zdroj: [19])

Technologie	Externí	Finanční	Celkové
Uhlí	2,0	5,0	7,0
Nafta	1,6	4,5	6,0
Plyn	0,36	3,5	3,9
Vítr	0,22	6,0	6,2
Voda	0,22	4,5	4,7
Jaderná	0,04	3,5	3,5

Korektní porovnání jednotlivých zdrojů je správné pouze tehdy, když se zahrnou investiční, provozní i externí náklady na zdroj stejného výkonu. Na ekonomické hodnocení má samozřejmě vliv řada dalších faktorů, jako jsou nároky na umístění stavební a technologické části elektrárny v regionu.

3 Systém kontroly a řízení primárního okruhu

3.1 Členění (jaderný a konvenční ostrov)

Systém kontroly a řízení dělíme dle [20] na 2 části **Jaderný ostrov (primární část)** a **Konvenční ostrov (sekundární část)**:

- **Jaderný ostrov (primární část)** je reaktor s příslušenstvím - primární okruh a systémy zajišťující bezpečnost provozu reaktoru,
- **Konvenční ostrov (sekundární část)** jsou turbíny s příslušenstvím, generátory a systémy zajišťující bezpečnost provozu turbín (přímé výroby elektrické energie).

3.2 Účel systému SKŘ

Systém SKŘ můžeme z hlediska funkcí dělit na tři různé podsystemy, a to zabezpečovací systémy, řídicí systémy a informační systémy [21] :

Zabezpečovací systémy – Jejich úkolem je zabránit vzniku nebezpečným poruchovým situacím a to snížením výkonu nebo odstavením. Mezi tyto systémy patří: zabezpečovací systémy bloku, havarijní ochrany reaktoru, bezpečnostní řídicí systémy, ochrany turbíny a zabezpečovací systémy ostatních bloků.

Řídicí systémy – Tyto systémy slouží k řízení zařízení v nominálních a přechodových režimech. Tvoří je dva podsystemy, a to systém diskrétního řízení, který přesouvá zařízení z jednoho bezpečného stavu do druhého a systém spojitého řízení, který udržuje řízené parametry na námi požadované úrovni.

Informační systémy – Tvoří ho převážně počítačový informační systém, dává obsluze informace potřebné k operativnímu a dlouhodobému řízení.

Mezi zabezpečovací systémy patří i bezpečnostní ochranný systém automatického odstavení reaktoru, který je tvořen: [22]

- Systém měření neutronového toku – EXCORE,
- systém rychlého odstavení reaktoru - RTS (základní systém),
- diverzitní systém rychlého odstavení reaktoru – DRTS,
- výkonovým vypínačem rychlého odstavení reaktoru - BREAKER,
- systém monitorování seizmicity - SMS.

3.3 Úrovně řízení

Strukturu systému SKŘ dělíme do 4 základních úrovní a ty pak dále dělíme na jejich podúrovně: [23]

- úroveň 0: styk s procesem,
- úroveň 1: procesní (automatizační) úroveň,
 - 1A: výkonná (podřízená) část systému,
 - 1B: procesní část systému,
 - 1C: komunikace.
- úroveň 2: dozorování a řízení procesu, operátorská úroveň - rozhraní člověk-stroj,
- úroveň 3: zajišťuje manažerské funkce provozu elektrárny.

Úroveň 0 je tvořena snímači provozních veličin, rozvaděči elektronických signálů zajišťujícími provádění povelů vydávaných na akční členy a samotnými akčními členy předávajícími informace o stavu.

Úroveň 1A zahrnuje vstupní/výstupní část systémů a systémy zajišťující výkonné funkce procesní části systému, tj. systém RRCS spolu s TRIP BREKERY zajišťující ovládání regulačních tyčí a systém EXCORE jež provádí zpracování signálů detektorů neutronového toku.

Úroveň 1B je tvořena samotnou procesní částí systému, skládá se ze systémů provádějících:

- ochrany reaktoru,
- řízení reaktoru, dozorné a limitační funkce,
- bezpečnostní funkce,
- provozní řízení.

Úroveň 1C zajišťuje komunikaci SKŘ a to jak mezi jednotlivými systémy, tak mezi procesní částí systému a řídicími pracovišti na dozornách.

Úroveň 2 zajišťuje nezbytné funkce pro operátory na dozornách pro dozorování a řízení celého procesu, úroveň 2 je tvořena:

- pracovními stanicemi a panely na blokové, nouzové a mimoblokové dozorně a na dalších podpůrných střediscích jako je technické podpůrné středisko, havarijní řídicí středisko a další,

- systémy SKŘ sloužícími jako rozhraní mezi HMI a procesní úrovní.

3.4 Funkční členění

Celá struktura SKŘ je členěna do jednotlivých systémů plnících specializované funkce. Z tohoto hlediska dělíme systémy na: [20]

- bezpečnostní systémy,
 - ochranné systémy reaktoru - RTS+DRTS (*/diverzitní/ systém rychlého odstavení reaktoru*), EXCORE (*systém měření neutronového toku*), BREAKER (*výkonový vypínač rychlého odstavení reaktoru*),
 - řídicí ochranný systém - ESFAS (*systém aktivace technických prostředků pro zajištění bezpečnosti*),
 - SMS (*systém monitorování seismicity*),
- systémy se vztahem k bezpečnosti,
 - RRCS (*systém ovládání HRK*),
 - limitační a řídicí systém reaktoru - RLS (*limitační systém reaktoru*), RCS (*systém regulace výkonu reaktoru*),
 - PAMS (*pohavarijní monitorovací systém*),
 - INCORE,
 - HMI (*rozhraní člověk - stroj*) [PICS */počítačový informačně-řídicí systém/ a konvenční instrumentace*],
- systémy řízení normálního provozu HVB - PCS (*řídicí počítačový systém*),
- systémy řízení pomocných provozů - PCS (*řídicí počítačový systém*),
- ostatní systémy.

3.5 Požadavky na zajištění funkčnosti bezpečnostních systémů – primární část

Základní požadavek na funkčnost bezpečnostních systémů je existence jednoznačných funkčních požadavků a projektových specifikací. Podle těchto požadavků a specifikací je systém ověřován v průběhu celé výroby, instalace a provozu. [20]

Požadavky na funkčnost bezpečnostních systémů musí obsahovat a zohledňovat: [20]

- technologické zadání musí být správné a úplné,

- nezávislost všech bezpečnostních systémů mezi sebou,
- nezávislost všech redundancí mezi sebou,
- bezpečnostní systém musí být schopný rozpoznávat specifikované případy abnormálního provozu a havarijní podmínky a automaticky uvést do činnosti příslušné výkonné systémy a potřebné podporné systémy tak, aby nedošlo k překročení bezpečnostních limitů,
- bezpečnostní systémy musí mít specifikovanou nadřazenost nad činností řídicích systémů s nižším stupněm důležitosti,
- bezpečnostní systémy musí mít specifikovanou nezávislost na řídicích systémech s nižším stupněm důležitosti s ohledem na jadernou bezpečnost,
- nezávislost bezpečnostního systému na účincích PIU,
- včasnou, přesnou a dostatečnou informaci o stavu systému a jimi řízených systémů a podporných systémů pro obsluhu,
- požadavky vyplývající ze stanovených úloh obsluhy pro proces řízení a údržby jaderného zařízení.

3.6 Zabezpečovací systémy SKŘ

3.6.1 Systém rychlého odstavení reaktoru - RTS/DRTS

Systémy RTS a DRTS jsou součástí ochranného systému automatického odstavení reaktoru. Tyto systémy realizují funkci ochrany od výkonu reaktoru, při překročení mezí technologických parametrů. Pokud dojde k překročení parametrů, zapracují BREAKERY. Každý z těchto systémů má své 3 oddělené redundance, tyto redundance jsou fyzicky, funkčně a elektricky nezávislé a každá z těchto redundancí má 3 kanály, vstupy těchto kanálů jsou navrženy tak, aby byly funkčně diverzitní. [22]

3.6.2 Výkonový vypínač rychlého odstavení reaktoru - BREAKER

Funkcí tohoto systému vypnutí napájení pohonu HRK (37 kazet, 6 skupin po 5, tzn. 6 x 5 HRK + 7 HRK) a tím odstavit reaktor. [5] Při iniciačním signálu na BREAKER z jednotlivých kanálů systému EXCORE dojde k vypnutí napájení HRK, které sjedou do reaktoru a začnou tlumit štěpnou reakci. Současně jsou vydány signály na navazující systémy. [3] Systém BREAKERů je tvořen logickou částí, výkonovou částí, diagnostikou a rozhraní ve vazbě na PICS. Akční signály působí prostřednictvím BREAKERů A, B na akční orgány ochrany reaktoru - kazety HRK (37 kazet rozdělených do 6 skupin – 5x6

HRK +7HRK). Na realizaci funkce automatického odstavení reaktoru stačí zapracování jednoho z dvou BREAKERů.[24]

3.6.3 Systém měření neutronového toku - EXCORE

Tento systém slouží k měření neutronového toku a určuje výkon a periodu reaktoru. Na základě těchto měření jsou generovány signály pro funkci rychlého odstavení reaktoru a omezení výkonu reaktoru při překročení nastavených mezí neutronovo-fyzikálních parametrů. Systém měření neutronového toku - EXCORE je součástí ochranného systému automatického odstavení reaktoru. Systém je vybavený autodiagnostikou, rozhraním ve vazbě na BD a ND, rozhraním pro přenos informací do PICS a rozhraním pro testování systému. [25]

3.6.4 Systém aktivace technických prostředků zajištění - ESFAS

Tento systém slouží k zajištění bezpečnosti, je jednou z nejdůležitějších a základních funkcí bezpečnostního systému. Systém ESFAS zapůsobí v případě PIU, která by byla spojená s celistvostí PO nebo SO. Po této PIU uvádí do činnosti různá zařízení bezpečnostních systémů, která zajišťují: [26]

- chlazení AZ reaktoru,
- havarijní doplňování vody do PO a SO a odvod tepla z AZ,
- zabránění úniku radioaktivních médií z hermetické zóny.

Systém ESFAS je součástí ochranných systémů bloku jaderné elektrárny. Základním požadavkem na systém ESFAS je zajištění funkčnosti, výkonnosti, spolehlivosti a odolnosti vůči prostředí. Úlohou systému ESFAS je rozeznávat havarijní podmínky na bloku a řídit systémy, které jsou určeny pro zmírnění jejich následků. Každá iniciovaná událost je charakterizovaná překročením mezí specifických technologických parametrů, které jsou systémem monitorované. [27]

Pokud dojde k překročení těchto hodnot, budou vyhodnocena iniciační kritéria, která aktivují bezpečnostní systém a vytvoří se akční signály, kterými jsou spouštěna a odstavována zařízení jím ovládané. Systém ESFAS plní spolu s akčními orgány konkrétní bezpečnostní úlohu pro každou iniciační událost. [27]

3.6.5 Způsob řízení

Systémy RTS, DRTS, EXCORE jsou plně automatické bez možnosti zásahu operátora. Výstupní signál systémů působí do výkonového vypínače rychlého odstavení reaktoru neboli BREAKERu, tyto BREAKERY jsou 2, BREAKER A a BREAKER B. Působení akčního signálu na BREAKER je nepřerušitelné. Operátor má možnost aktivovat akční signál AO prostřednictvím tlačítek z BD a ND s vazbou na BREAKER A a BREAKER B. Po ukončení působení iniciačních signálů a po ukončení působení AO ze systémů RTS, DRTS, EXCORE a sepnutí BREAKER A a BREAKER B může operátor zvednout HRK z BD. [22], [24], [25]

3.6.6 Vazba na HMI

Rozhraním „člověk - stroj“ systému RTS, DRTS, EXCORE budou: [22], [24], [25]

- konvenční instrumentace na BD, ND (bezpečnostní panely),
- monitory PICS, BD, ND,
- servisní stanice resp. inženýrské stanice (jen RTS, DRTS), indikační prvky na skříních a komponentech.

3.6.6.1 Řízení z dozoren

Systémy RTS, DRTS, EXCORE jsou plně automatické bez možnosti zásahu obsluhy z BD a ND. [3], [6] U systémů RTS a DRTS je jediný zásah obsluhy povolen při normálním provozu nebo v průběhu periodického testování a to přepnutí kanálu resp. systému do režimu zkoušky. [3] U systému EXCORE je povolené zvyšování výkonu v pracovním rozsahu, ale systém musí být opět přepnut do režimu zkouška nebo periodické testování. [6] Tuto volbu je možné provést z přepínačů na bezpečnostních panelech pro každou redundanci zvlášť, při normálním provozu však jen pro jednu redundanci v jednom čase.[3], [6] Vypnutí napájení pohonu HRK, neboli použití BREAKERů je možné realizovat ruční aktivací z BD a ND. [24]

3.6.6.2 Signalizace, ovládání a druhy zobrazení

Na bezpečnostních panelech je signalizace systémů RTS, DRTS, BREAKER, EXCORE, každý tento systém má 3 redundance, proto jsou pro každý systém 3 panely. Díky této signalizaci můžeme určit v jakém stavu se daný systém nachází: [24]

- RTS, DRTS - porucha, výstraha, zkouška, údržba,

- BREAKER – porucha, zkouška,
- EXCORE – výkon, perioda, zkouška.

Signalizace systému RTS, DRTS zahrnuje dále překročení hraniční hodnoty, prvopříčiny zapůsobení RTS (DRTS), zpracování RTS (DRTS), poruchu zpracování, aktivaci výstupních signálů, aktivaci akčních signálů. [3] Signalizace systému BREAKER zahrnuje poruchu, výstrahu, zkoušku, údržbu a výstupy diagnostiky. Signalizace systému EXCORE nám dává informace na BD o zpracování ochrany reaktoru a signalizuje poruchy, překročení varovných mezí výkonu a periody a na ND signalizuje poruchy. [5]

Tyto signály jsou na panely příslušných redundancí BD a ND přivedeny pomocí rozhraní MI, prostřednictvím PICS mohou být zobrazeny na monitorech. Toto propojení je provedeno pomocí optických kabelů, jen připojení BREAKERů je realizováno pomocí metalických kabelů. [24]

3.6.6.3 Lokální HMI

Každá ze skříní systémů RTS, DRTS, EXCORE nebo BREAKER na sobě má umístěné signálky, které nás informují o stavu daného systému. Všechny tyto systémy jsou navrženy tak, aby bylo umožněno jejich testování. [22], [24], [25]

3.6.7 Datová komunikace

Datová komunikace je realizovaná: [22], [24], [25]

- v rámci redundance mezi zpracovatelskými počítači jednotlivých kanálů,
- mezi počítači kanálů a počítači komunikačního rozhraní systémové místnosti každé redundance,
- mezi počítači komunikačního rozhraní v systémové místnosti a komunikačním rozhraním na BD a ND,
- mezi počítači komunikačního rozhraní v systémové místnosti a redundantními gatewayemi na systémovou sběrnici (vazba na PICS).

3.7 Elektrické napájení

Redundance systémů RTS, DRTS, EXCORE, BREAKER jsou napájeny ze 2 oddělených zdrojů, stejně jsou napájené i jejich snímače a zpracovatelské počítače. Tyto systémy jsou napájeny různými hodnotami napětí, systém RTS/DRTS jsou napájeny zdrojem 24 (48) V DC, BREAKERY jsou napájeny 220V DC a systém EXCORE také 220V DC. [22], [24], [25]

3.8 Řídicí centra a pracoviště

Bloková dozorna (BD) je místem, z kterého se ovládá zařízení HVB ve všech projektových režimech. Vrcholový dohled nad procesy v zařízeních bloku JE a konečnou zodpovědnost za jejich udržení v projektových mezích mají členové posádky BD jako vybraní pracovníci s ověřenou speciální odbornou způsobilostí. Nouzová dozorna (ND), jako záložní pracoviště BD, je místem, ze kterého se dá provést havarijní odstavení reaktoru, omezené monitorování a řízení bloku JE tak, aby byly dosaženy požadované bezpečnostní funkce, pokud došlo ke ztrátě možnosti dosáhnout je z BD. Prokazatelné výsledky zlepšení efektivity práce operátorů na úspěšně vyprojektovaných hybridních dozornách, tj. částečně s klasickou instrumentací a částečně s ovládáním na volbu pomocí počítačů (soft control), kde se podařilo efektivně sloučit klasické ovládání s digitální technologií a využít její přednosti pro mentální sblížení člověka s řízenými procesy si vynutily orientovat se na tento typ dozorní i u nově budovaných JE.[28]

Projektové řešení hybridní BD/ND uvažuje s třemi základními typy pracovišť: hlavní pracoviště, vedlejší pracoviště a bezpečnostní panely [28]:

Hlavní pracoviště jsou základní pracoviště pro obsluhu BD při řízení bloku pomocí ovládání na volbu - soft control. Jsou vybaveny pracovními stanicemi patřícími do systému PICS, které umožňují monitorování všech měřených/snímaných provozních parametrů a stavů zařízení HVB, ovládání všech automatik a regulátorů bloku plnicích funkce kategorií B, C nebo nekategorizované funkce a také ovládání zařízení, jako např. čerpadla, armatury nebo vypínače systémů plnicích funkce kategorií A, B, C.

Vedlejší pracoviště je velkoplošný displej pro zobrazení celkového přehledu o stavu bloku.

Panely - tj. provozní panely a bezpečnostní panely jsou pracoviště, která umožňují monitorování a řízení systémů a zařízení bloku plnicích funkce kategorie A a vybraných systémů a zařízení bloku plnicích funkce kategorií B a C pomocí klasické instrumentace. Bezpečnostní panely musí být konstruované tak, aby vyhovovaly nárokům na kategorii A a musí být také seizmicky odolné.

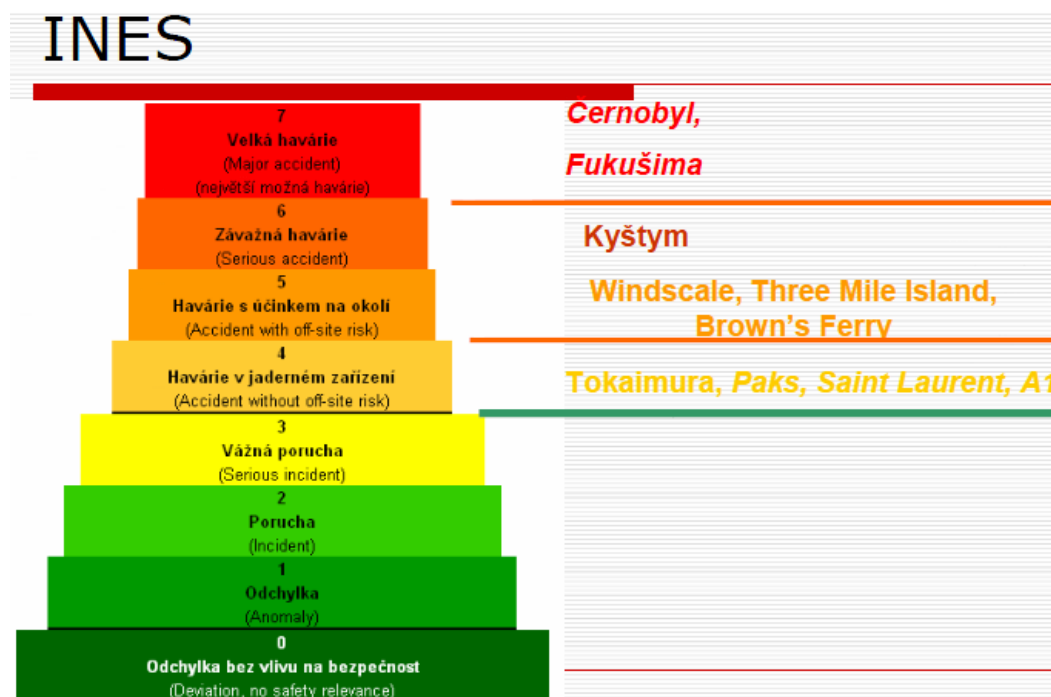
4 Bezpečnost jaderných elektráren

4.1 Dozorné orgány

Otázkou jaderné bezpečnosti se zabývají dozorné orgány jednotlivých států i mezinárodní instituce. V ČR je to Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB), na Slovensku Úřad jadrového dozoru (ÚJD), které mezi sebou úzce spolupracují. Z mezinárodních jsou u nás nejznámější Mezinárodní agentura pro atomovou energii se sídlem ve Vídni (MAAE), Asociace dozorů západoevropských zemí (Western European Nuclear Regulator's Association - WENRA) a Světová asociace provozovatelů jaderných elektráren (World Association of Nuclear Operators - WANO). [14, 29]

4.1.1 Stupnice pro hodnocení událostí v jaderných elektrárnách INES

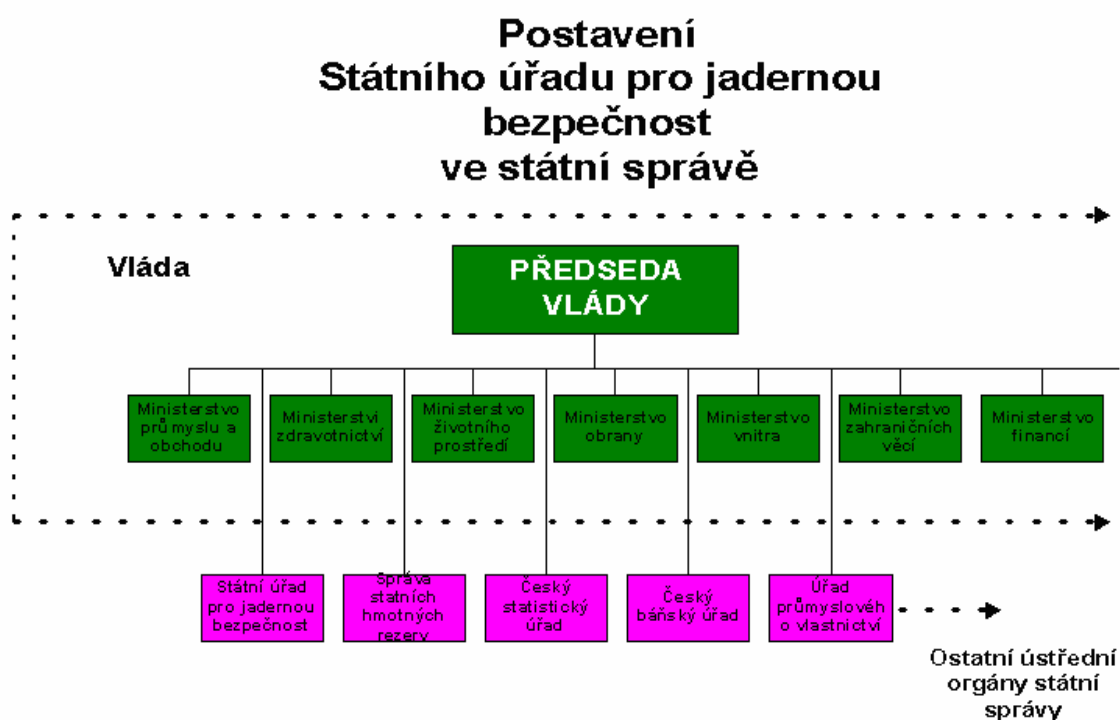
V roce 1989 stanovila MAAE stupnici pro hodnocení mimořádných událostí v jaderných elektrárnách INES, která obsahuje stupně závažnosti od 0 do 7, kdy stupeň 0 nemá bezpečnostní význam, stupeň 1 - 3 se označuje jako nehoda a stupněm 4 - 7 se označují havárie. Národní koordinátoři INES se pravidelně setkávají a informují se vzájemně o událostech v jejich zemích od posledního setkání i o dalších záležitostech, které by mohly být pro ostatní zajímavé či poučné. [30]



Obr. 4 – Stupnice INES (Zdroj: [17])

4.1.2 Státní úřad pro jadernou bezpečnost - SÚJB

Tento úřad byl založen roku 1993 jako nezávislý ústřední orgán. Roku 1995 byla sjednocena jaderná bezpečnost a radiační ochrana. V roce 1997 byly vytvořeny nové právní předpisy pro jadernou bezpečnost a radiační ochranu. Tyto předpisy byly sladěny s předpisy EU v roce 2002. SÚJB má 194 zaměstnanců, z toho 118 inspektorů pro jadernou bezpečnost a radiační ochranu. Roční rozpočet SÚJB se pohybuje kolem 370 mil. Kč což je cca 35 Kč na obyvatele. Na obr. 5 můžeme vidět postavení SÚJB ve státní správě. [31], [32]



Obr. 5 – Postavení SÚJB ve státní správě (Zdroj: [31])

Působností SÚJB u nás je kontrolování a povolování.

SÚJB kontroluje například:

- 1) JE Dukovany, kde je 6 jaderných zařízení → 4 výrobní bloky VVER 440, MSVP , URAO a nový SVP, který je ve výstavbě,
- 2) JE Temelín, kde jsou 3 jaderné zařízení → 2 výrobní bloky VVER 1000 a sklad čerstvého jaderného paliva,

- 3) ÚJV Řež, kde jsou 3 jaderná zařízení → výzkumné reaktory LR-0 a LVR 15, sklad VAO suché a mokré skladování VJP EK-10 a IRT-M a vysoce aktivních odpadů z výzkumu,
- 4) Další jaderná zařízení → školní reaktor VR-1 FJFI Praha, úložiště RaO u Litoměřic, ÚJP Zbraslav – sklad JM a další...[31, 32]

SÚJB má pravomoc na povolení např. umístění, výstavbu, provoz, vyřazení, dovoz a vývoz jaderných položek, provádění změn nebo rekonstrukce, přepravu jaderných materiálů a zdrojů ionizujícího záření, přípravu vybraných pracovníků, mezinárodní přepravu radioaktivních odpadů. Dále má pravomoc podat návrh na vyřazení jaderného zařízení z provozu a další... [31], [32]



Obr. 6 – Legislativní pyramida (Zdroj: [31])

4.2 Bezpečné uložení radioaktivních odpadů

Podle tzv. Atomového zákona přijatého Parlamentem České republiky roku 1997 musí všichni původci jaderného odpadu (tedy i provozovatelé JE Dukovany a Temelín - společnost ČEZ) nést veškeré náklady spojené s nakládáním s radioaktivním odpadem od vzniku až po jeho definitivní uložení. [33]

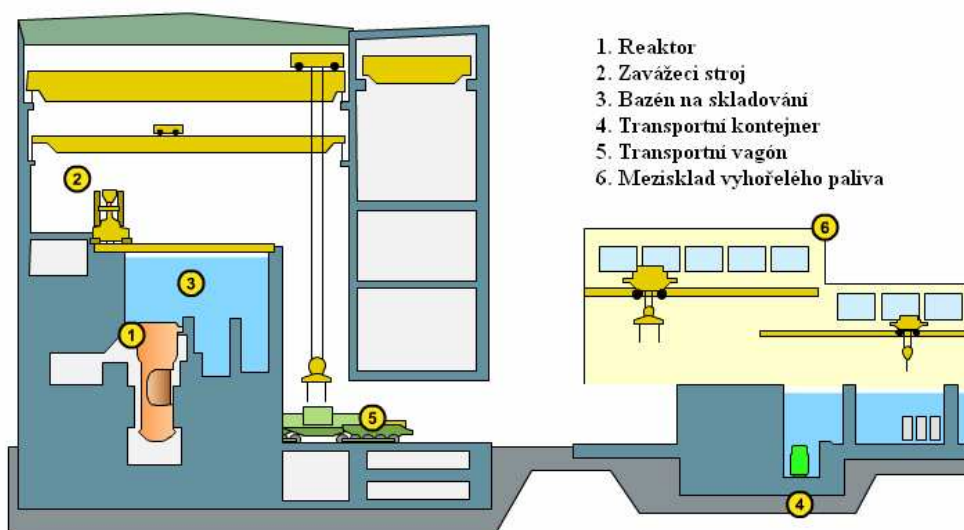
Záruky za bezpečné uložení jaderného odpadu pak nese stát, který pro tyto účely založil Správu úložišť RA odpadů (SÚRAO). Činnost SÚRAO je financována z tzv. jaderného účtu, na který přispívají všichni původci radioaktivních odpadů včetně JE., např. společnost ČEZ platí 50 Kč za každou MWh vyrobenou pomocí jaderného zdroje. [33]

4.2.1 Mezisklad vyhořelého paliva

Za dob Československa byl RAO převážen do meziskladu v JE Jaslovské Bohunice, což už nebylo možné po rozdělení Československa a tak byl vybudován mezisklad v areálu JE Dukovany. [34]

Byl tedy vybudován suchý mezisklad o kapacitě 600 tun. Tento sklad tvořilo 60 dvouúčelových kontejnerů typu Castor 440/84. Každý z těchto kontejnerů má kapacitu 10 tun použitého paliva, což je cca roční produkce jednoho reaktoru VVER 440. Jen tento sklad by však nestačil pro skladování veškerého využitého paliva, proto byl vybudován nový sklad s kapacitou 1330 tun použitého paliva. V těchto skladech se palivo skladuje po dobu 50ti let. Poté může být palivo přepracováno a znovu použito nebo se definitivně odveze do hlubinného úložiště. [34], [35]

Mezisklad vyhořelého paliva



Obr. 7 Mezisklad vyhořelého paliva (Zdroj: [35])

4.3 Monitorování radioaktivity

V České republice je radiační situace v okolí JE je nepřetržitě sledována pomocí tzv. radiačních měřících stanic, které jsou v okruhu 30 km od JE a jejich provoz zajišťuje

Radiační monitorovací síť (RSM). Řízením je pověřen SÚJB. Dále Státní ústav radiační ochrany (SÚRO) pravidelně monitoruje úroveň radiace v celé republice. Účelem programu monitorování je sledování distribuce aktivit radionuklidů a dávek ionizujícího záření na území státu v prostoru a čase, zejména s cílem získat dlouhodobé časové trendy a včas zjistit odchylky od nich. Pozornost je věnována umělým radionuklidům, z nichž se v měřitelných hodnotách vyskytují a RMS jsou sledovány: v ovzduší ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{85}Kr , ^{14}C , ^3H , v potravinách ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^3H a v těle člověka ^{137}Cs (vnitřní kontaminace). Kromě uvedených složek jsou sledovány i další jako například povrchové vody, kaly, sedimenty a půdy; podrobnosti lze nalézt ve výročních zprávách. Tyto studie jsou pravidelně uveřejňovány na internetových stránkách a v odborných časopisech, např. „Jaderná bezpečnost“. [35], [37]

ZÁVĚR

V této bakalářské práci jsem popsal princip výroby elektrické energie pomocí jaderného zdroje, jeho výhody a nevýhody, systém kontroly a řízení primárního okruhu jaderné elektrárny a zhodnotil jsem situaci z pohledu Státního úřadu pro jadernou bezpečnost.

V první kapitole jsem popsal princip dvouokruhové jaderné elektrárny s reaktorem typu VVER-440, které jsou například v Dukovanech, Jaslovských Bohunicích (SR) a Mochovcích (SR). Dále jsem v této kapitole popsal výkon jaderné elektrárny s tímto typem reaktoru, používané palivo, hlavní části primárního okruhu, předpokládané referenční havárie a havarijní systémy.

V druhé kapitole jsem uvedl výhody a nevýhody jaderné elektrárny. Srovnal jsem investiční náklady a externí náklady. Investiční náklady v USD na kW výkonu jsou pro jadernou lehkovodní elektrárnu 2000-2500 USD a doba výstavby byla 6-7 let, u modernějších jaderných elektráren 1500-2000 USD a doba výstavby 4-6 let. Celkové externí náklady jaderné elektrárny jsou 3,5 centu USD na kWh elektrické energie.

Ve třetí kapitole jsem popisoval systém kontroly a řízení primárního okruhu, jeho účel, úrovně a členění. Zaměřil jsem se na zabezpečovací systémy RTS – systém rychlého odstavení reaktoru, BREAKER – výkonový vypínač rychlého odstavení reaktoru, EXCORE – systém měření neutronového toku a ESFAS – systém aktivace technických prostředků zajištění.

V poslední kapitole jsem popsal dozorné orgány a stupnice hodnocení událostí v jaderných elektrárnách podle INES. Nejdůležitějším orgánem pro dozor nad jadernou energetikou je v České republice Státní úřad pro jadernou bezpečnost, který má pravomoc na povolování výstavby, provozu, a další.

LITERATURA

- [1] Objective Source E-Learning. [online]. [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=3778>
- [2] Javys [online]. [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: <http://www.javys.sk/sk/jadrove-zariadenia/jadrova-elektren-v1/technologie>
- [3] Wikipedia [online]. [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/VVER#VVER-440_typ.26nbsp.3B230
- [4] Javys [online]. [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: <http://www.javys.sk/sk/jadrove-zariadenia/jadrova-elektren-v1/technicke-parametre>
- [5] CEZ [online]. [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektren/jaderna-energetika/jaderne-elektreny-cez/edu/technologie-a-zabezpeceni.html>
- [6] Wikipedia [online]. [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektren%C3%A1ma_Dukovany
- [7] Jaderný odpad [online]. [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: <http://www.jaderny-odpad.cz/vyhorele-jaderne-palivo.htm>
- [8] Javys [online]. [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: <http://www.javys.sk/sk/popup/informacny-servis/multimedia/interaktivne-schemy/palivovy-cyklus>
- [9] Wikipedia [online]. [cit. 2012-06-02]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/VVER>
- [10] Javys [online]. [cit. 2012-06-02]. Dostupné z: <http://www.javys.sk/sk/informacny-servis/energeticky-slovník/V/vyhorene-jadrove-palivo>
- [11] CEZ [online]. [cit. 2012-06-02]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektren/jaderna-energetika/jaderne-elektreny-cez/edu/technologie-a-zabezpeceni.html#p1>
- [12] CEZ [online]. [cit. 2012-06-02]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektren/jaderna-energetika/jaderne-elektreny-cez/edu/technologie-a-zabezpeceni.html#p7>
- [13] Horák V., PS 3.01 Technická zpráva, Popis zariadení-Techn-správa S041301001T_A01R01
- [14] Prehradný J., 7. Přednáška z předmětu Jaderná Bezpečnost, ZČU, FEL, 2011
- [15] Prehradný J., 5. Přednáška z předmětu Jaderná Bezpečnost, ZČU, FEL, 2011

- [16] Umweltbundesamt http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umwelthemen/kernenergiemelin/GesamtUVP/UVPDokumentation/etegesamtdoku3_cz.pdf
- [17] Prehradný J., 2. Přednáška z předmětu Jaderná Bezpečnost, ZČU, FEL, 2011
- [18] Wikipedia [online]. [cit. 2012-06-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna
- [19] Vodní a tepelné elektrárny [online]. [cit. 2012-06-03]. Dostupné z: <http://www.vodni-tepelne-elektrarny.cz/jaderna-uhelna-elektrarna.htm>
- [20] Čemus J., PS 3.10 Systém kontroly a řízení v HVB, Technická zpráva, S041310001T, VÚJE, a.s., 2009
- [21] Systém kontroly a riadenia – učebný text, VÚJE, a.s., 2005
- [22] Čemus J., DPS 3.10.01 RTS+DRTS Technická zpráva, S041310A02R, VÚJE, a.s., 2012
- [23] Čemus J., PS 3.10 Technická zpráva, S041310001T, VÚJE, a.s., 2009
- [24] Krejčí D., DPS 3.10.01 TRIP BREAKER Technická zpráva, S041310A31T, VÚJE, a.s., 2008
- [25] Čemus J., DPS 3.10.01 EXCORE Technická zpráva, S041310A21T, VÚJE, a.s., 2009
- [26] Fialová Michaela, Diplomová práce: Analýza hltnosti pojistného ventilu na napájecí vodě. Brno: VÚT, 2011
- [27] Horák V., Technologická část - Popis tvorby signálů pro RTS, DRTS, RLS, EXCORE a ESFAS, S041300102T, VÚJE a.s., 2009
- [28] Krejčí D., DPS 3.10.01 BD+ND, Technická zpráva, S041310AA1T, VÚJE, a.s., 2008
- [29] Státní úřad pro jadernou bezpečnost [online]. [cit. 2012-05-27]. Dostupné z: <http://www.sujb.cz/wenra/>
- [30] Internationa Atomic Energy Agency [online]. [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: <http://www-ns.iaea.org/tech-areas/emergency/ines.asp>
- [31] Drábová D. – Státní úřad pro jadernou bezpečnost, Přednáška Atomové právo, ZČU, 2011
- [32] Státní úřad pro jadernou bezpečnost [online]. [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: <http://www.sujb.cz/o-sujb/uvod/>

- [33] CEZ [online]. [cit. 2012-06-02]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/zvazovana-dostavba-elektrarny-temelin/nakladani-s-odpady.html>
- [34] Jaderný odpad [online]. [cit. 2012-05-25]. Dostupné z: <http://www.jaderny-odpad.cz/jaderny-odpad-dukovany.htm>
- [35] Javys [online]. [cit. 2012-06-02]. Dostupné z: <http://www.javys.sk/sk/jadrove-zariadenia/medzisklad-vyhoreteho-paliva/medzisklad-vyhoreteho-paliva>
- [36] Státní úřad radiační ochrany [online]. [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://www.suro.cz/cz/rms>
- [37] Státní úřad radiační ochrany [online]. [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.suro.cz/cz/rms/aktualni-radiacni-situace-na-uzemi-ceske-republiky>

Přílohy**Výběr nejzávažnějších havárií v jaderných elektrárnách ve světě**

29. září 1957, Kyštym (Čejlabinská oblast SSSR) - Těžká havárie (INES 6). V přepracovatelském závodě Majak poblíž města Ozersk vybuchla podzemní nádrž s vysoce radioaktivním odpadem. Příčinou exploze byla porucha na chladícím zařízení. Únik radioaktivity do ovzduší kontaminoval plochu více než 1000 kilometrů čtverečních a podle odhadů zasáhl statisíce lidí. Událost byla utajována, Moskva ji oficiálně přiznala a nahlásila až v roce 1989.

10. října 1957, Windscale/Sellafield (Velká Británie) - Při požáru grafitového reaktoru v závodě, jenž vyráběl plutonium pro vojenský jaderný program Velké Británie, uniklo do vzduchu značné množství radioaktivity (INES 5). Odhaduje se, že v důsledku nehody podlehl rakovině přes 200 osob.

26. září 1973, Windscale/Sellafield (Velká Británie) - Radioaktivní látky zamořily areál závodu na zpracování vyhořelého paliva (INES 4).

28. března 1979, Three Mile Island (Pensylvánie, USA) - V jaderné elektrárně došlo k částečnému roztavení jádra reaktoru a úniku radioaktivní vody (INES 5). Příčinou události byla závada na pojistném ventilu primárního okruhu. Silné radioaktivní záření proniklo do širokého okolí; jeden člověk zahynul a asi 100 lidí bylo hospitalizováno. Označováno za druhou nejhorší havárii v dějinách.

13. března 1980, Saint-Laurent-des-Eaux (Francie) - Porucha na druhém bloku atomové elektrárny skončila částečným poškozením jádra reaktoru (INES 4). K úniku radioaktivity nedošlo.

26. dubna 1986, Černobyl (SSSR/Ukrajina) - Velmi těžká havárie (INES 7), označována za nejhorší svého druhu, a následný výbuch jednoho ze čtyř reaktorů jaderné elektrárny si přímo na místě a v následujících měsících vyžádaly několik desítek životů. Údaje o celkovém počtu lidí, kteří v souvislosti s případem onemocněli a zemřeli, se značně liší. Podle ukrajinského ministerstva zahraničí umřelo více než 125.000 lidí, naproti tomu zpráva Černobylského fóra z roku 2005 hovoří asi o 4000 obětech.

23. července 1991, Kozloduj (Bulharsko) - Po požáru v jaderné elektrárně byla objevena dvě místa úniku radioaktivity. Trhliny v kontrolním tunelu nejstaršího bloku způsobily zamoření sice jen několik metrů čtverečních, ale úroveň radiace dosahovala pěti milirentgenů za hodinu (dvacetinásobek povolené hranice). Podle inspekce Mezinárodní agentury pro atomovou energii došlo ke třem únikům radioaktivity a jednomu požáru.

30. září 1999, Tokaimura (Japonsko) - Nekontrolovanou řetězovou reakci a ozáření (INES 4) v závodě na zpracování uranu pro jaderné elektrárny vyvolal chybný pracovní postup obsluhy. Ozářeno bylo údajně přes 600 osob, dva pracovníci zemřeli. Reakce byla zastavena až druhý den. Havárie byla dosud označována za nejhorší jadernou havárii v Japonsku a třetí nejhorší na světě.

12. března 2011, Fukušima (Japonsko) - V jaderné elektrárně Fukušima 1 na severovýchodě Japonska, který byl nejvíce poškozen zemětřesením a následnou vlnou cunami z 11. března, se po výbuchu zřítily část budovy reaktoru (střecha a zdi). Exploze nastala po blízce neupřesněném otřesu. Problémy s chladícím okruhem na svých třech reaktorech ohlásila i druhá jaderná elektrárna v prefektuře Fukušima.