VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF ENERGY

INOVAČNÍ PRVKY PROJEKTU EPR

INNOVATIVE ELEMENTS OF PROJECT EPR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE MIROSLAV MARTINEK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE PAVEL NERUD
SUPERVISOR

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Miroslav Martinek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Inovační prvky projektu EPR

v anglickém jazyce:

Inovation components of EPR project

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Literární studie současných tlakovodních reaktorů
Popis základních inovačních prvků projektu EPR
Výpočet jednoho vybraného zařízení

Cíle bakalářské práce:

Nalezení základních inovačních prvků projektu EPR a zdůraznění jejich výhod a nevýhod
Prezentace a konfrontace výsledků výpočtu se skutečnými návrhovými parametry

Seznam odborné literatury:

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Nerud

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

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc. Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem práce je nalezení inovačních prvků projektu EPR. V první části se práce věnuje úvodu a vysvětlení tlakovodních reaktorů. Popisuje jednotlivé části, jejich různé typy a zapojení v celku. Druhá část se zabývá novinkami a úpravami v projektu EPR, jako je rozložení budov, reaktor, bezpečnost, atd. Třetí část obsahuje jednoduchý výpočet zvoleného zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA:
EPR – european water pressurized reaktor, tlakovodní, kontejnment, aeroball, corium

ABSTRAKT

The target of this work is to find innovative elements of EPR project. In the first part the paper deals with an introduction to the topic and explains water pressurized reactors. It describes the individual parts of the mechanism and their various types as well as their interconnection into a complete unit. The second part gives attention to innovations and modifications of EPR project in terms of location of buildings, reactor or safety requirements. The third part contains a simple calculation of a chosen mechanism.

KEYWORDS:
EPR – european water pressurized reactor, water-pressurized, containment, aeroball, corium

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MARTINEK, M. Inovační prvky projektu EPR. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Nerud.

PROHLÁŠENÍ AUTORA

Já, Miroslav Martinek, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.

V Brně dne: 28.5.2010 .....

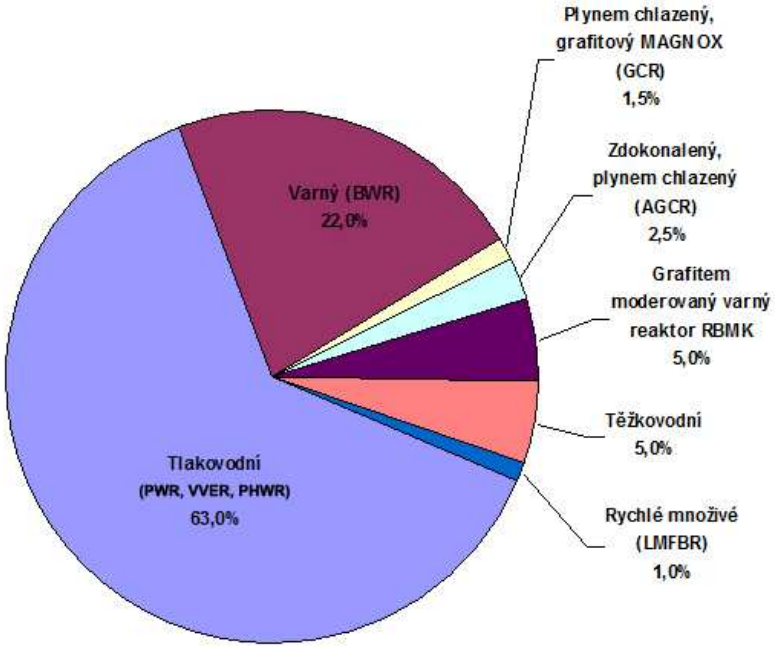
OBSAH

LITERÁRNÍ STUDIE SOUČASNÝCH TLAKOVODNÍCH REAKTORŮ 12
1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY TLAKOVODNÍCH REAKTORŮ 12
1.1 TLAKOVODNÍ REAKTORY S LEHKOU VODOU (PWR, VVER) 14
1.1.1 USPOŘÁDÁNI KOMPONENT PRIMÁRNÍHO OKRUHU PWR A VVER 14
1.1.2 MODERÁTOR A CHLADÍCÍ MEDUIM 17
1.1.3 PALIVO, PALIVOVÁ KAZETA, AKTIVNÍ ZÓNA 19
1.1.4 TLAKOVÁ NÁDOBA REAKTORU 22
1.1.5 BEZPEČNOSTNÍ PRVKY PROJEKTŮ PWR A VVER 24
1.2 TLAKOVODNÍ REAKTORY S TĚŽKOU VODOU (PHWR) 27
POPIS ZÁKLADNÍCH INOVAČNÍCH PRVKŮ PROJEKTU EPR 29
2. ÚVOD K PROJEKTŮM EPR 29
2.1 USPOŘÁDÁNÍ BUDOV-PROVOZŮ JADERNÝCH ZAŘÍZENÍ PODLE EPR 29
2.2 KOMPONENTY A USPOŘÁDÁNÍ PRIMÁRNÍHO OKRUHU EPR 32
2.3 AKTIVNÍ ZÓNA, PALIVO, MĚŘENÍ A REGULACE 33
2.3 TLAKOVÁ NÁDOBA A VNITŘNÍ VESTAVBY 37
2.4 PREVENCE A LIKVIDACE TĚŽKÝCH HAVÁRIÍ V PROJEKTECH EPR 41
VÝPOČET JEDNOHO VYBRANÉHO ZAŘÍZENÍ 44
3. VÝPOČET POTŘEBNÉHO PRŮTOKU KONDENZÁTOREM 44
3.1 VÝPOČET ZBYTKU VÝKONU URČENÉHO K VYCHLAZENÍ V II. O. 44
3.2 PARAMETRY KONDENZOVÁNÉHO MEDIA 44
3.3 POTŘEBNÝ TOK CHLADÍCÍ VODY KONDENZÁTORU 45
4. ZÁVĚR 48
5. POUŽITÉ ZDROJE 48
6. POUŽITÉ SYMBOLY 49

LITERÁRNÍ STUDIE SOUČASNÝCH TLAKOVODNÍCH REAKTORŮ

1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY TLAKOVODNÍCH REAKTORŮ

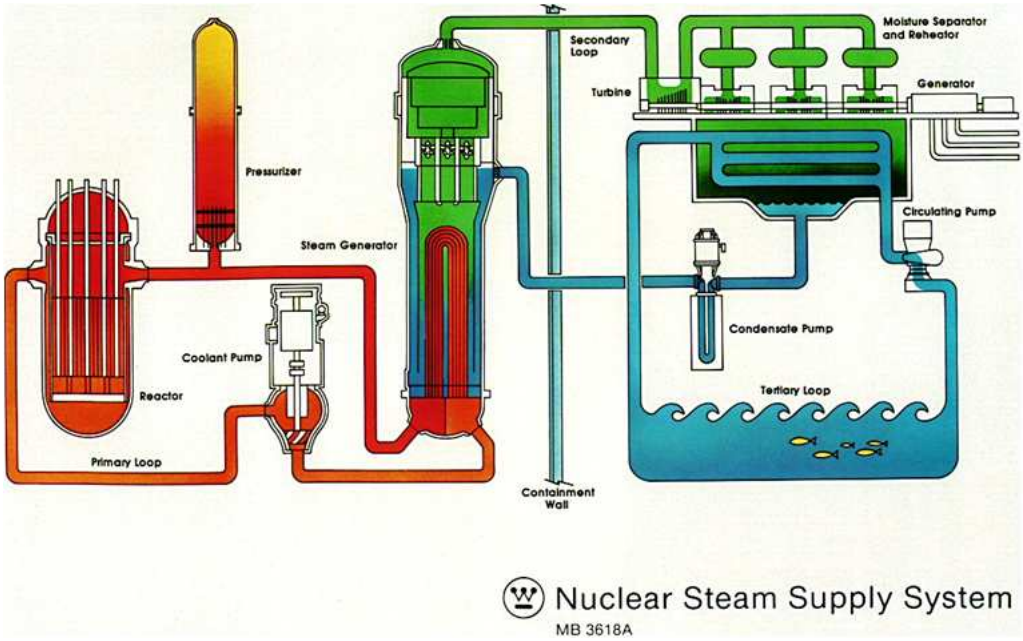
V současné době můžeme označit tlakovodní reaktory jako nejrozšířenější komerční jaderné energetické zdroje. Rozeznáváme a nejvíce používáme pro komerční účely dva základní typy tlakovodních reaktorů. Jedná se o reaktory, které pro svou činnost využívají vlastnosti lehké vody (H_2O) a reaktory pracující s tzv. těžkou vodou (D_2O), v obou případech pod tlakem. Fyzikální vlastnosti obou látek jsou mírně odlišné a každá z variant má svoje klady a zápory, jejich zvolení závisí na mnoha faktorech a požadavcích. Tyto dva základní druhy lze dále dělit na typy projektů jaderných reaktorů. Mezi současné reaktory pracující s lehkou vodou pod tlakem patří typ PWR (Pressurized Water Reactors) tzv. západní typ a VVER (Vodo-Vodjanye Energetičeskyje reaktory) tzv. východní typ. Dále pak reaktory pracující s těžkou vodou pod tlakem PHWR (Pressurized Heavy Water Reactors).



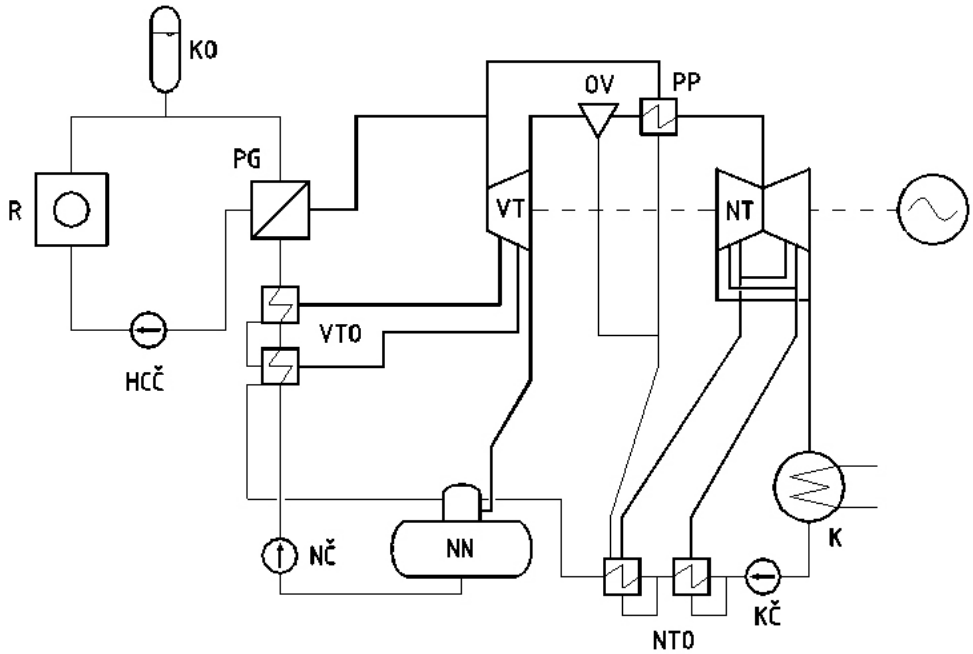
obr.1a) Graf vyjadřující zastoupení jednotlivých druhů reaktorů na Zemi, [1]

Rozdíly mezi těmito typy jsou především v konstrukčních prvcích a v použití specifického chladiva, moderátoru a paliva pro daný typ. Lehkovodní tlakové reaktory (PWR a VVER) pracují s lehkou vodou (H_2O) jako chladivem i moderátorem a specifickým konstrukčním prvkem tlakovou nádobou, ve které je umístěna kompaktní aktivní zóna reaktoru. Na rozdíl od lehkovodních tlakových reaktorů težkovodní (PHWR) používají zejména k moderování těžkou vodu (D_2O) a jejich typickým konstrukčním prvkem jsou tlakové kanály, ze kterých se skládá celá aktivní zóna. Nově se také objevil typ tlakovodního reaktoru s označením EPR (European Pressurized water Reactor). Tento nový projet sebou přináší zlepšení především v bezpečnostní otázce jaderných zařízení a jejich účinnosti.

Tlakovodní jaderné elektrárny, stejně jako většina ostatních, pracují na principu získávání tepelné energie ze štěpení jader atomů, která je předávána mediu (v případě tlakovodních reaktorů je jím voda), jenž vytváří páru jdoucí na parní turbínu a ta transformuje energii páry na energii mechanickou předávanou dále generátoru.



obr. 1b) Schéma oběhu páry a vody v jaderném zařízení, [1]



obr.1c) Zjednodušené tepelné schéma tlakovodního jaderného zařízení, [1]
R – reaktor, KO – kompenzátor objemu, HCČ – hlavní cirkulační čerpadlo,
PG – parogenerátor, VTO – vysokotlaké ohříváky, NČ – napájecí čerpadlo,
NN – napájecí nádrž, NTO – nízkotlaký ohřívák, K – kondenzátor,
VT – vysokotlaká část turbíny, NT – nízkotlaká část turbíny, OV – odlučovač vody,
PP – přihřívák páry, KČ – čerpadlo kondenzátu

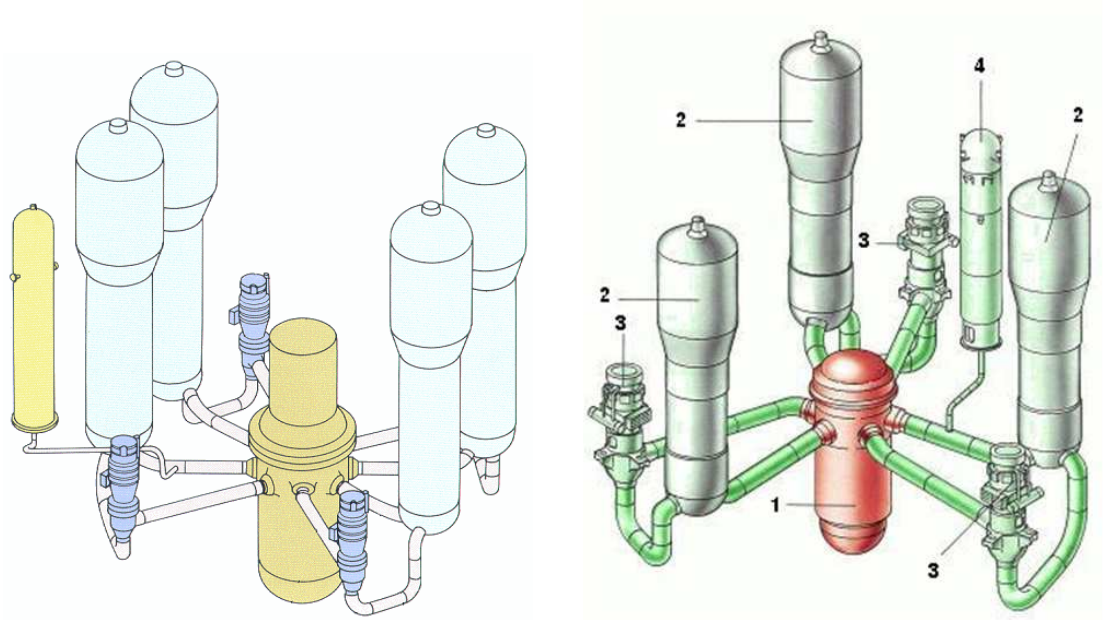
1.1 TLAKOVODNÍ REAKTORY S LEHKOU VODOU (PWR, VVER)

Typy reaktorů PWR a VVER jsou v současnosti nejrozšířenějšími variantami reaktorů používaných v jaderných komerčních zařízeních na celé Zemi. Vykazují některé individuální specifické i společné prvky a vlastnosti. Mezi společné patří:

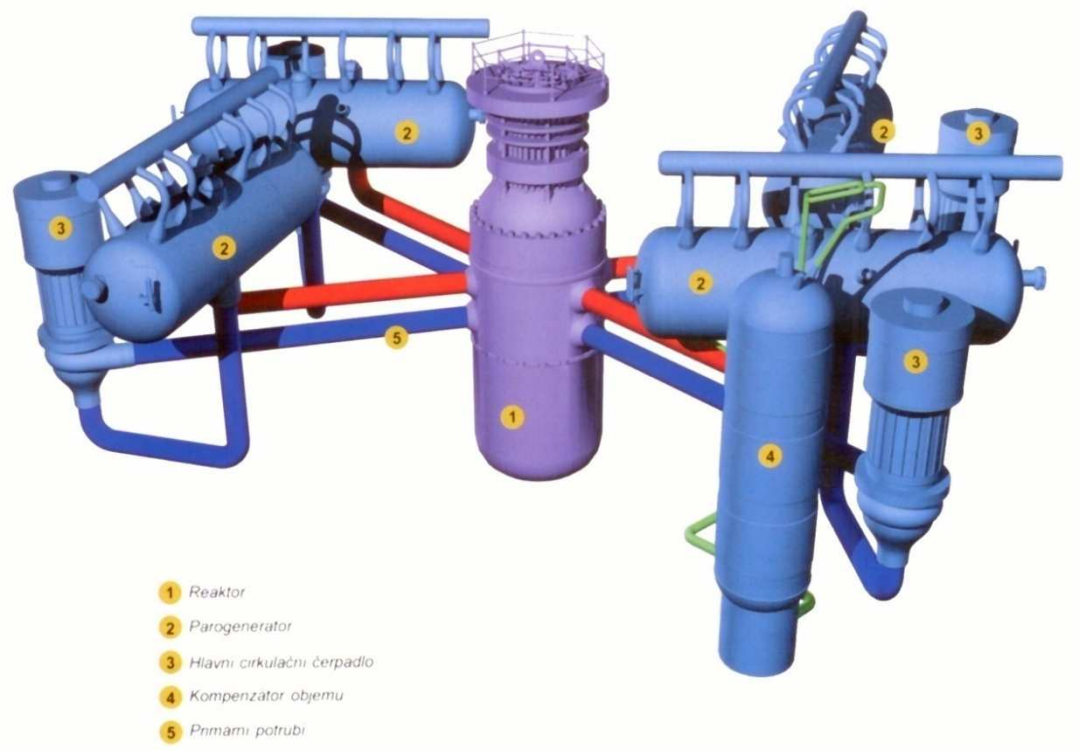
a) Stabilita reaktoru zabezpečená vysokou hodnotou záporného teplotního koeficientu reaktivity.
b) Vysoké požadavky na bezpečnostní systémy.
c) Kampaňová výměna paliva.
d) Kompaktní aktivní zóna, použití tlakové nádoby.
e) Použití řídících tyčí s prostorovým uspořádáním zasouvání shora.
f) Použití obohaceného paliva ve formě UO_2 nebo PuO_2.
g) Užití kyseliny borité rozpuštěné v palivu pro kompenzaci přebytkové reaktivity.
h) Dvouokruhové uspořádání zařízení.
i) Použití lehké H_2O vody jako chladiva i moderátoru.

1.1.1 USPOŘÁDÁNI KOMPONENT PRIMÁRNÍHO OKRUHU PWR A VVER

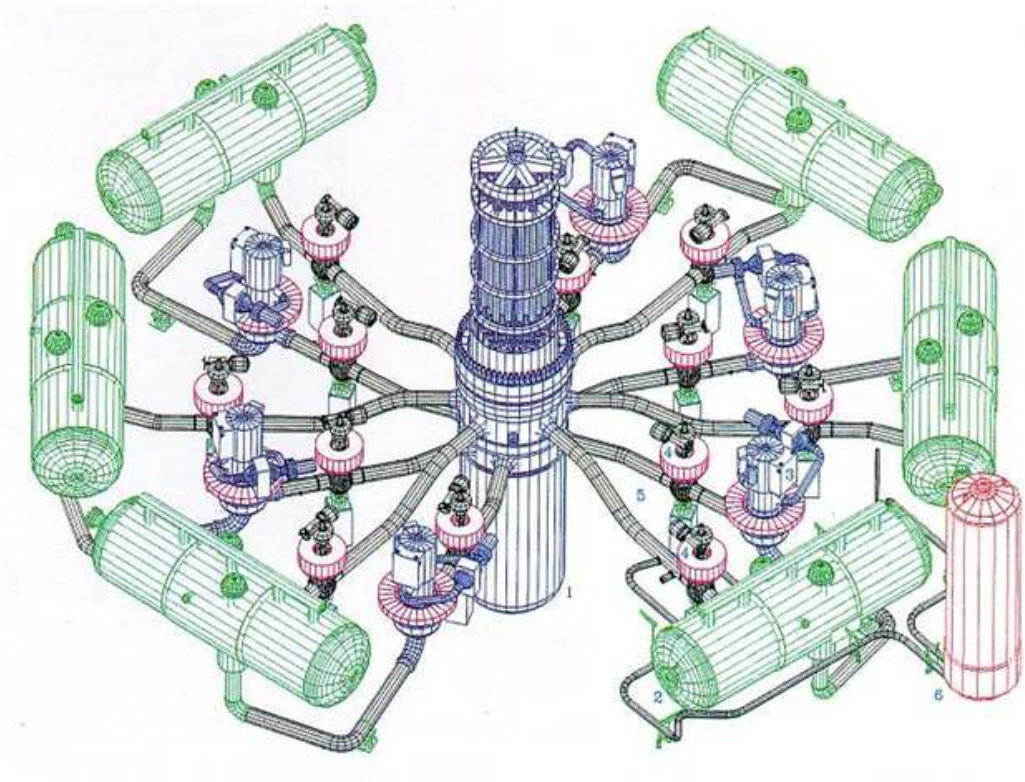
V primárním okruhu proudí lehká voda (H_2O), která je v důsledku proudění aktivní zónou reaktoru aktivovaná. Voda cirkuluje v okruhu přes AZ (aktivní zónu), kde získává potřebnou tepelnou energii a je vedena do parogenerátoru. Zde svoje teplo předává vodě v sekundárním okruhu, která je přeměněna na páru vstupující do parního soustrojí. Konkrétní prvky primárního okruhu a jejich prostorové uspořádání se v typech PWR a VVER liší.



obr.1.1.1a) Příklad typického uspořádání primárního okruhu zařízení PWR. (čtyřsmyčkové v jedné řadě – vlevo, třísmyčkové v jedné řadě - vpravo), [1], [2]
1 – tlaková nádoba reaktoru, 2 – vertikální parogenerátory,
3 – hlavní cirkulační čerpadla, 4 – kompenzátor objemu

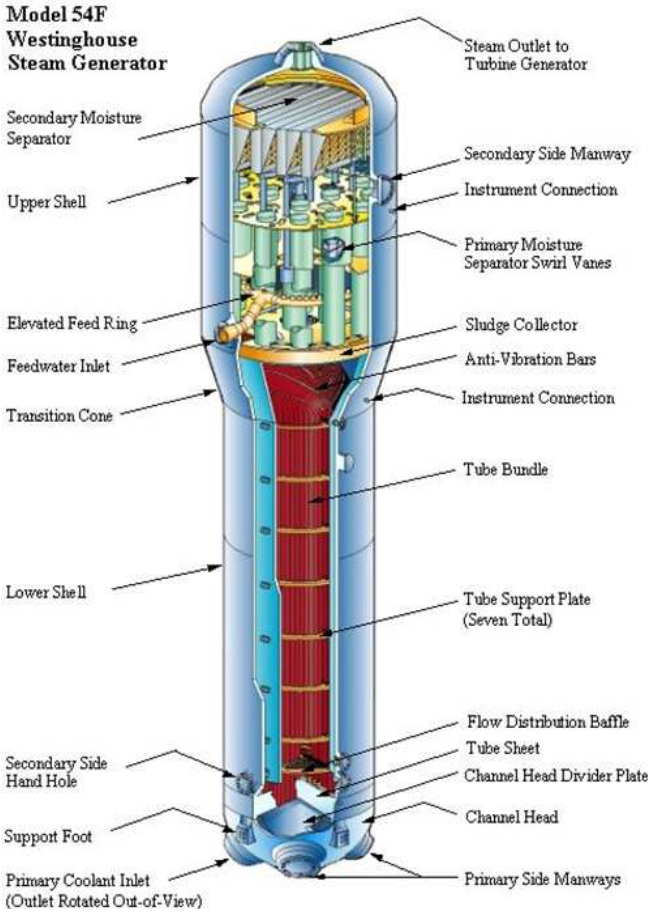


obr. 1.1.1b) Příklad uspořádání primárního okruhu zařízení typu VVER.
(čtyřsmyčkové ve dvou řadách), [2]
1 – tlaková nádoba reaktoru, 2 – horizontální parogenerátory,
3 – hlavní cirkulační čerpadla, 4 – kompenzátor objemu, 5 – primární potrubí

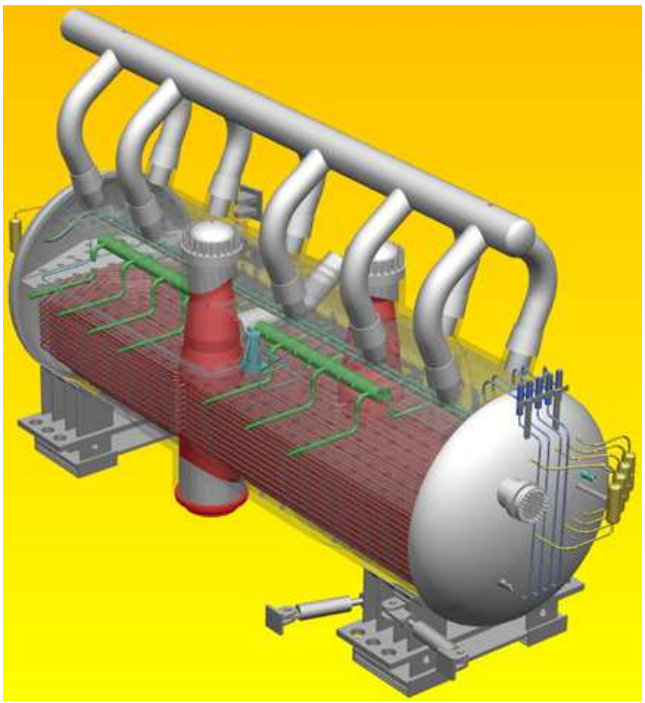


obr. 1.1.1c) Příklad uspořádání primárního okruhu zařízení typu VVER
(šestismyčkové uspořádání – odpovídá typu VVER440 Dukovany ČR, [1]

Z obrázků uspořádání jsou patrné rozdíly v konstrukčních řešeních jednotlivých typů. Zařízení PWR používají vertikální prostorové uspořádání parogenerátorů, zatím co VVER uvádí horizontální polohu parogenerátorů. Dalším zásadním rozdílem je uspořádání a počet smyček primárního okruhu. Komponenty smyček jsou většinou stejné, je to parogenerátor, hlavní cirkulační čerpadlo, jeden společný kompenzátor objemu pro všechny smyčky a v některých případech se používá i hlavní uzavírací armatura. Východní typy VVER se vyznačují použitím čtyř až šesti smyček primárního okruhu zapojené ve dvou horizontálních řadách, jak je patrné na obrázku uspořádání VVER. Pro západní typy PWR se používá dvou, tří a čtyřsmyčkové uspořádání a to v jedné horizontální řadě. Volba vhodného uspořádání a zejména počtu smyček závisí také na výkonu reaktoru. Nejnáročnějším a nejdůležitějším prvkem primárního okruhu je parogenerátor. Musí zabezpečit efektivní přenos tepla vody z primárního okruhu vodě okruhu sekundárního a současně zajistit, aby nedošlo k úniku aktivované vody a tím i štěpných produktů do sekundárního okruhu, což by znamenalo kontaminaci celého parovodního potrubí včetně parního soustrojí a zbývajících prvků sekundárního okruhu. Jeho funkčnost je znovu ověřována při pravidelné odstávce reaktoru v průběhu kampaně.



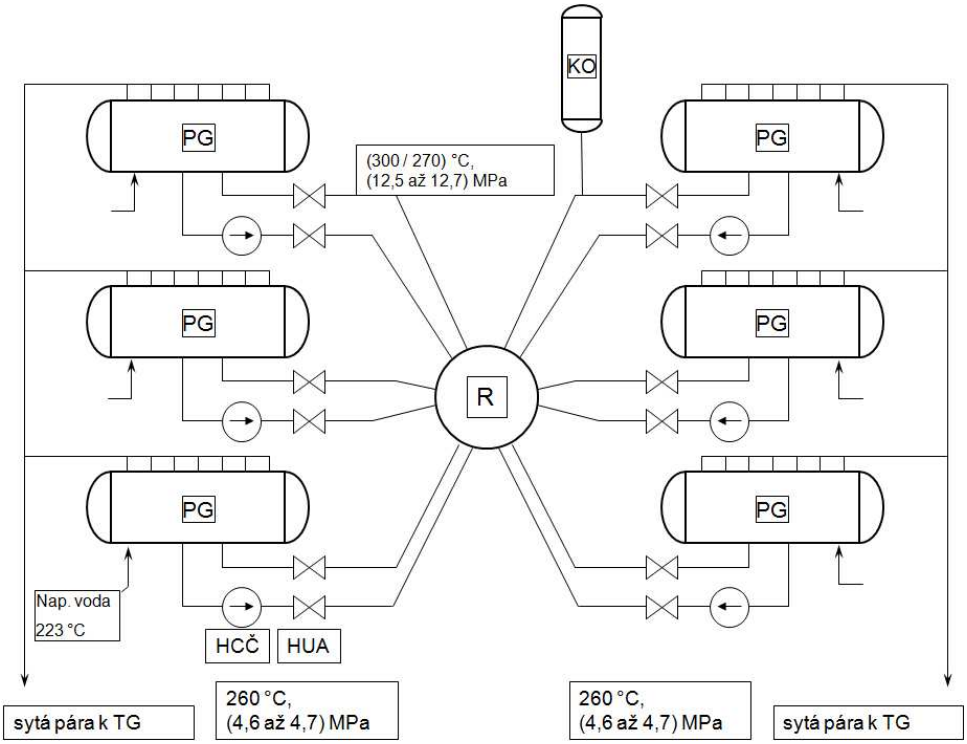
obr. 1.1.1d) Řez vertikálního parogenerátoru pro projekty PWR dodávaný firmou Westinghouse, [1]



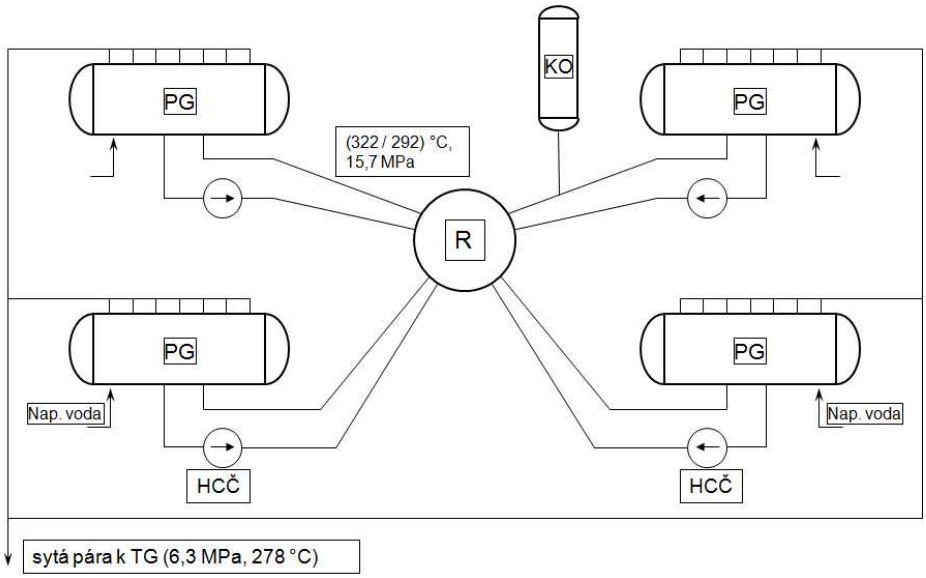
obr. 1.1.1e) Průhled horizontálním parogenerátorem pro projekty VVER (odpovídá projektu VVER1000 Temelín ČR), [1]

1.1.2 MODERÁTOR A CHLADÍCÍ MEDUIM

Tlakovodní reaktory typu PWR a VVER pracují s lehkou vodou (H_2O), která má na rozdíl od těžké vody (D_2O) lepší schopnost moderovat (zpomalovat neutrony). Nicméně její nevýhoda spočívá v tom, že více než těžká voda neutrony pohlcuje. Lehká voda se v těchto zařízeních používá současně jako moderátor i chladivo. Jakožto chladivo se potkává se všemi prvky primárního okruhu a je použita i v okruhu sekundárním. Nespornou výhodou použití lehké vody (H_2O) je, že není třeba ji vyrábět jako těžkou vodu, ale stačí dostatečný zdroj vody v okolí jaderného zařízení, důkladné čištění a úprava. Vlastnosti lehké vody udávají také velikost palivové mříže aktivní zóny, která je relativně hustá. Z konstrukčních důvodů není možné v zařízeních PWR a VVER páru jdoucí na turbínu přehřívat, což částečně ubírá na účinnosti. Fakt, že moderátor, tedy lehká voda, je udržována v primárním okruhu pod vysokým tlakem (12Mpa – projekty VVER440), zvyšuje zásadně bod varu a umožňuje stabilizovat vlastnosti moderátoru i ve vyšších teplotách (300°C – projekty VVER440). Tato skutečnost zamezuje vzniku nežádoucí tzv. krize varu, kdy by mohlo dojít k porušení pokrytí palivových prutů, a současně umožňuje vytvoření páry v parogenerátoru o dostatečných parametrech (260°C; 4,6Mpa – projekty VVER440).



obr. 1.1.2a) Schematicky naznačený oběh vody primárního a části sekundárního okruhu s uvedenými parametry vody a páry (projekty VVER440 Dukovany ČR), [1]
R – reaktor, PG – parogenerátor, KO – kompenzátor objemu,
HCČ – hlavní cirkulační čerpadlo



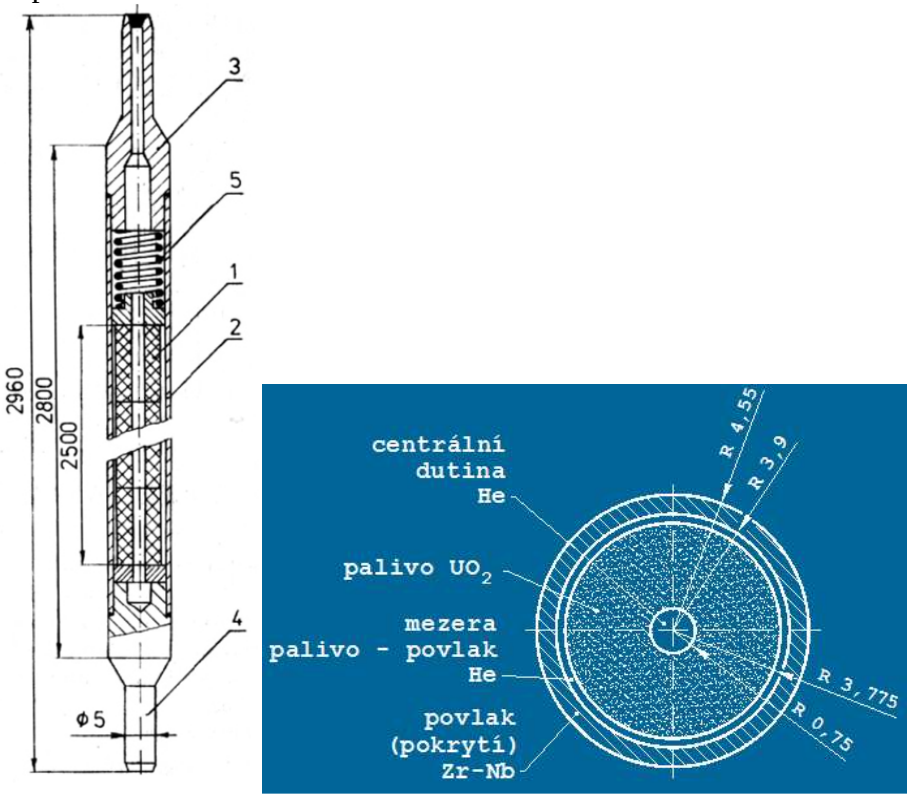
obr. 1.1.2b) Schematicky naznačený oběh vody primárního a části sekundárního okruhu s uvedenými parametry vody a páry (projekty – VVER1000 Temelín ČR), [1]
R – reaktor, PG – parogenerátor, KO – kompenzátor objemu,
HCČ – hlavní cirkulační čerpadlo

Z uvedených schémat a parametrů je patrný nemalý rozdíl nejen ve výkonech obou reaktorů, ale i technickém řešení primárního okruhu. Projekt VVER1000 byť vybaven více než jednou takovým výkonem oproti reaktoru VVER440, má pouze čtyři parogenerátory (čtyřsmyčkové uspořádání), zatím co reaktor VVER440 je vybaven šesti

(šestismyčkové uspořádání). Dále pak projekt VVER440 má zabudovanou hlavní uzavírací armaturu na každé větvi smyčky, zatímco VVER1000 nedisponuje žádnou. Toto je důsledek bezpečnostních opatření v novějším projektu VVER1000 z důvodu dochlazování a především havarijního zaplavení aktivní zóny např. z ledových kondenzátorů.

1.1.3 PALIVO, PALIVOVÁ KAZETA, AKTIVNÍ ZÓNA

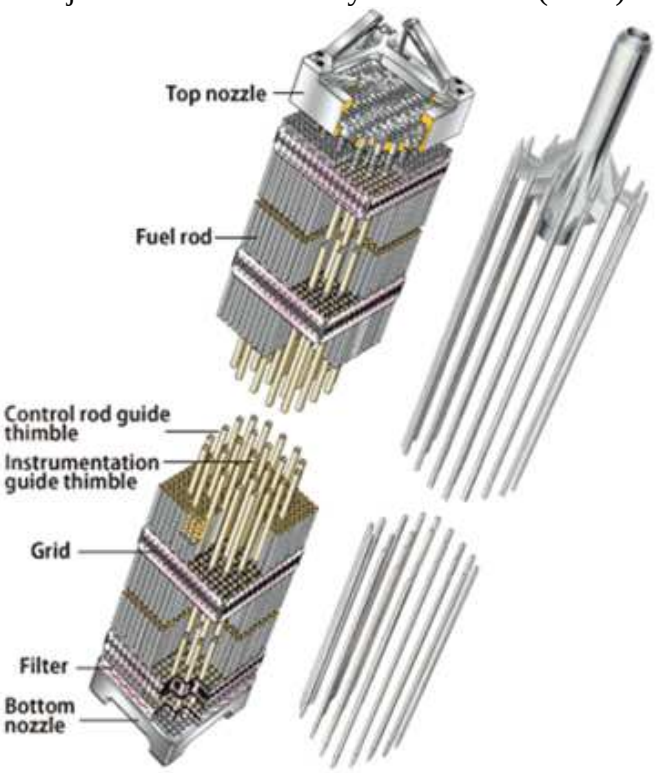
Pro tlakovodní jaderné reaktory s lehkou vodou (H_2O), tj. projekty VVER a PWR, se používá jako palivo nízkoobohacený uran 3-5% (ve směsi izotopů uranu obohacený U238 o U235). Palivo je ve formě keramických tablet oxidu uraničitého UO_2. Tyto jsou na sobě posazeny v „trubici“ tzv. pokrytí ze slitin zirkonia (Zr). Materiál zirkonium je výhodný z hlediska malého účinného průřezu, je tedy daleko více inertní vůči neutronům a změnám teplot než například ocel. Ocelové pokrytí by z důvodu vyšších teplot a neutronového toku nebylo vhodné, neboť vlastnosti oceli jsou při změnách teplot nepříznivě znatelné, např. ve změně objemu nebo pevnosti. Malý prostor mezi tabletami UO_2 a pokrytím včetně centrální dutiny je vyplněn heliem (He). Helium se svými malými atomy unikne i velice miniaturními netěsnostmi, toho se využívá při tlakové zkoušce prutu před začátkem kampaně. V průběhu života palivového prutu v aktivní zóně se v prostoru, kde bylo helium, střádají plynné produkty štěpení (xenon, krypton, neon, atd.). Helium také vykazuje výbornou tepelnou vodivost, což je další požadovaná vlastnost.



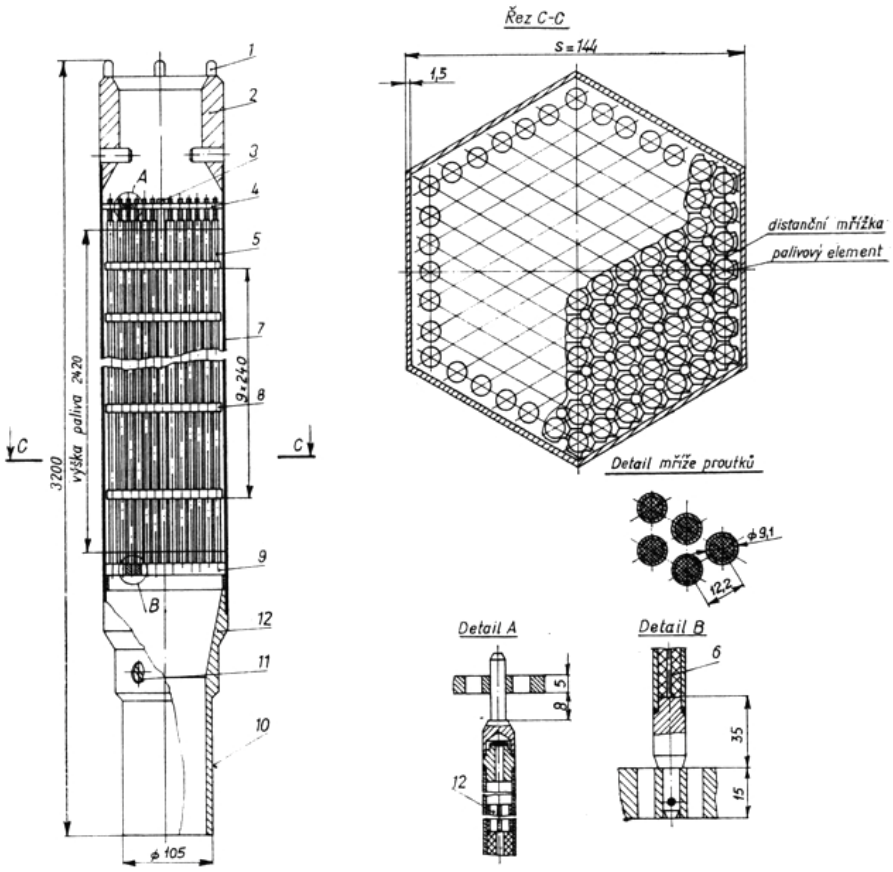
obr. 1.1.3a) Palivový prut a řez palivového prutu (VVER440), [1]

Z palivových prutů jsou v husté mříži, typické pro lehkovodní reaktory, složeny palivové soubory (kazety). Hustá palivová mříž vyplývá z vlastností lehké vody (H_2O), protože částečně pohlcuje neutrony, a proto není možné mít palivo příliš daleko od sebe. To tedy vylučuje některá technická řešení jako například zavedení technologických kanálů, jak je tomu u těžkovodních (D_2O) reaktorů. Palivové pruty jsou zasazeny do rastrových mříží, které udávají krok mříže. Ten je volen s ohledem na typ reaktoru,

palivo, moderátor a další. Z takového palivového souboru je následně vytvořena palivová kazeta. Palivovou kazetou mezi pruty musí během chodu stále procházet chladící a současně moderující medium. Pokud by došlo k ucpání cesty kolem palivového prutu, nastalo by propálení prutu a únik štěpitelného materiálu současně se štěpnými produkty do primárního okruhu. Tato událost by mohla mít v aktivní zóně řetězový průběh. Palivový soubor pro projekt VVER1000 (Temelín ČR) obsahuje 317 proutků a v aktivní zóně je zasunuto 151 takovýchto souborů (kazet).

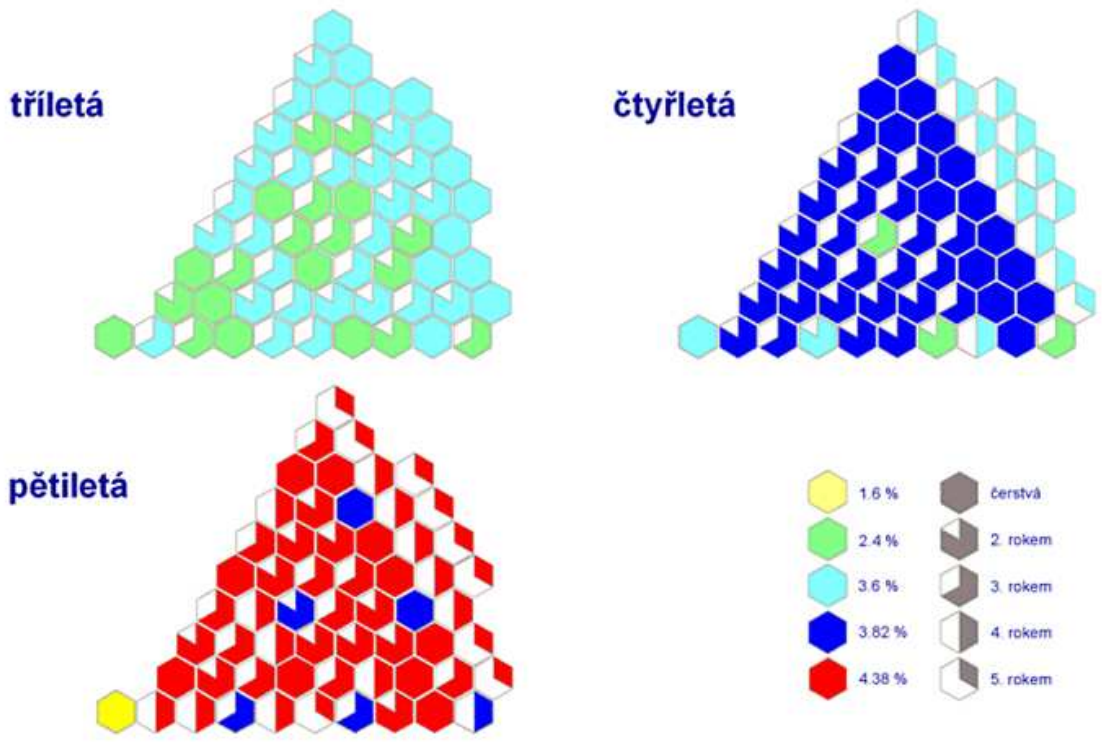


obr. 1.1.3b) Palivová kazeta pro reaktory typu PWR a regulační klastr, [2]



obr. 1.1.3c) Palivová kazeta pro reaktory typu VVER, [1]
(odpovídá typu VVER440)
1 – odpružené kolíky, 2 – hlavice článku, 3 – centrální trubka, 4 – horní mřížka,
5 – palivový proutek, 6 – palivová tableta, 7 – obálka, 8 – distanční mřížka,
9 – nosná mřížka, 10 – koncovka, 11 – středící čep, 12 – pouzdro

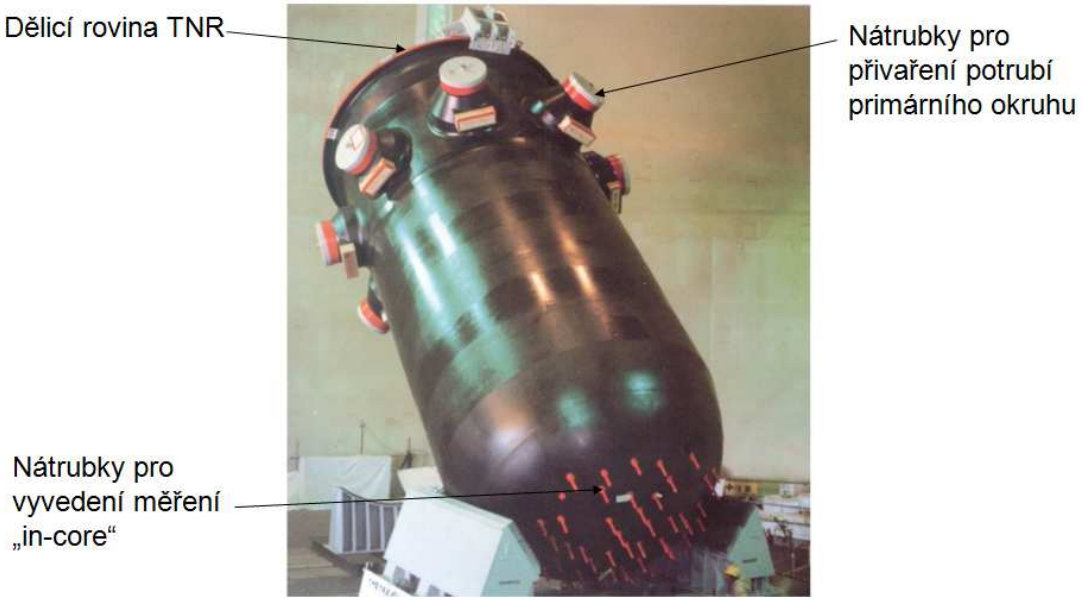
Z vyobrazení palivových kazet pro typy reaktorů VVER a PWR jsou zřetelné rozdíly. Západní koncepce PWR je čtvercového průřezu a nemá vnější obálku, zatímco východní koncept VVER má šestihranný průřez a disponuje vnějším obalem kazety. Výhodou šestihranného průřezu je, že můžeme dosáhnout hustší palivové mříže, nicméně většího hydraulického odporu.
Aktivní zóna je kruhového průřezu a obsahuje palivové soubory o různém obohacení. To je z důvodu vyrovnání neutronové bilance a tím zrovnoměrnění namáhání tlakové nádoby neutronovým tokem. Palivové soubory jsou měněny a přemisťovány při pravidelné odstávce zařízení tzv. kampani.



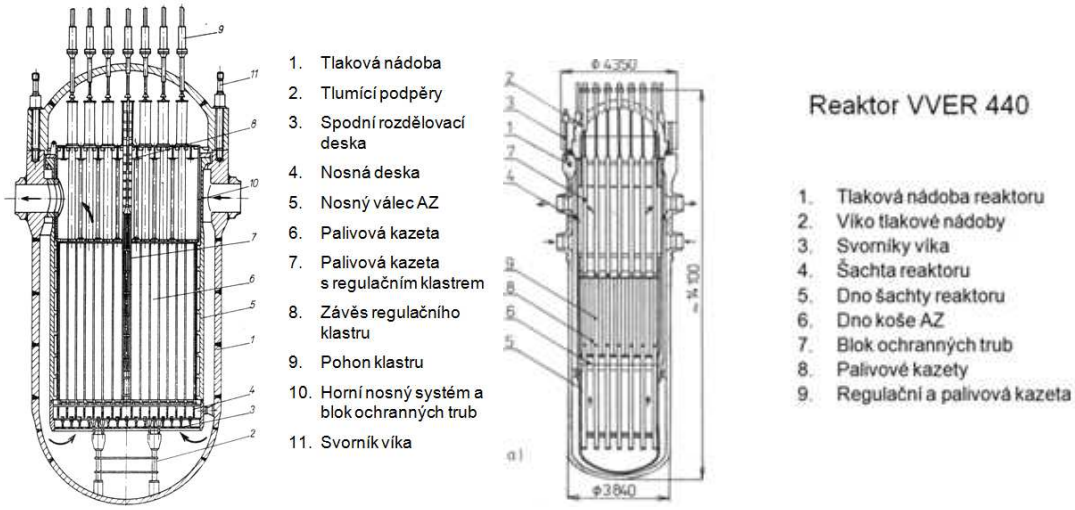
obr. 1.1.3d) Zobrazení návrhu obohacení souborů aktivní zóny v různých ročních cyklech (kampaních), [1]

1.1.4 TLAKOVÁ NÁDOBA REAKTORU

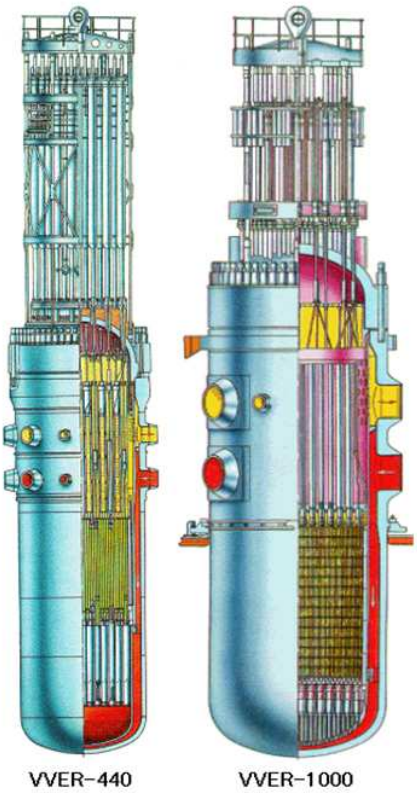
Všechny tlakovodní reaktory s lehkou vodou používají tlakovou nádobu. Výroba tlakových nádob pro VVER a PWR projekty je obdobná. Kované prstence bez podélných svarů jsou navařeny na sebe a tvoří základní tělo nádoby. Tlaková nádoba je tvořena ze dvou oddělitelných částí vlastního těla a víka. Protože nádoby nejsou z nerezové oceli a neodolaly by náporu kyseliny borité, je na vnitřní plochy nádoby navařena nerezová výstelka. Víko a tělo nádoby je k sobě připevněno svorníky, které lze všechny současně utáhnout nebo povolit. Jako těsnění jsou použité niklové trubky pojištěné těsnícími svary.



obr. 1.1.4a) Typická tlaková nádoba zařízení projektu PWR, [1]



obr. 1.1.4b) Tlaková nádoba PWR – vlevo, tlaková nádoba VVER440 – vpravo, [1]



obr. 1.1.4c) Reaktor VVER440 – vlevo, reaktor VVER1000 – vpravo, [1]

Z uvedených nákresů různých typů reaktorů jsou zřetelné konstrukční rozdíly. Reaktory VVER disponují rozložením smyček primárního okruhu ve dvou řadách horizontálně nad sebou, zatím co PWR zařízení mají pouze jednu horizontální řadu. Dále pak je znatelné, že starší typy VVER (VVER440) na rozdíl od nových VVER (VVER1000) nebo PWR mají kombinované palivové kazety s regulačními a havarijními. Spodní část kazety, která přesahuje aktivní zónu, obsahuje účinný absorbátor neutronů pro regulaci nebo zastavení reakce. Novější koncepty už používají regulační klastry z absorpčních tyčí. Tomu je samozřejmě uzpůsobeno uspořádáni vnitřních komponent tlakové nádoby a ovládací prvky kazet (klastrů). Nejsložitější částí tlakové nádoby je víko. Jsou na něm připevněny části horního bloku, krokové motory, vývody pro měření, přívody napájení, prvky nosné konstrukce horního bloku, a další.

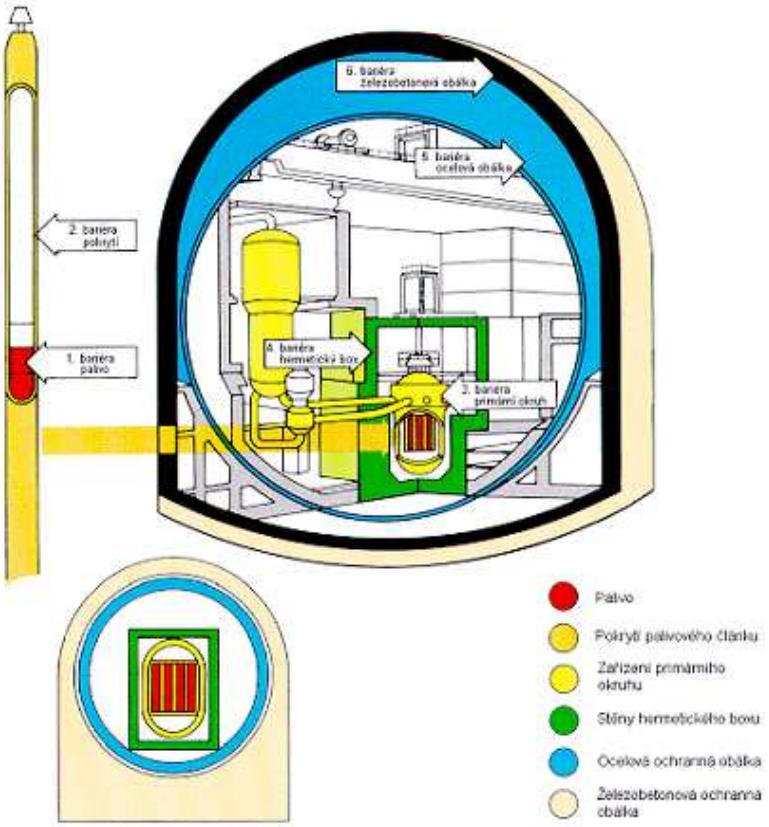
1.1.5 BEZPEČNOSTNÍ PRVKY PROJEKTŮ PWR A VVER

Bezpečnost jaderného zařízení můžeme rozdělit do několika kategorií. Především je důležitá bezpečnost související s opatřením proti úniku štěpných produktů. Existují tři bariéry proti úniku štěpných produktů:

I. Pokrytí palivového článku
   - Vnější obálka tablet paliva vyrobená ze slitin především Zirkonia, zabraňuje úniku štěpných produktů z palivového prutu.

II. Komponenty primárního okruhu
   - Všechny části primárního okruhu musí být důkladně těsné a odolné, aby zabránily úniku štěpných produktů do prostor mimo primární okruh.

III. Kontejnment (popř. jiné opatření jako např. hermeticky těsné kobky)



obr. 1.1.5a) Řez kontejnmentem jaderného zařízení – kombinace hermeticky těsných boxů a kontejnmentu, [2]

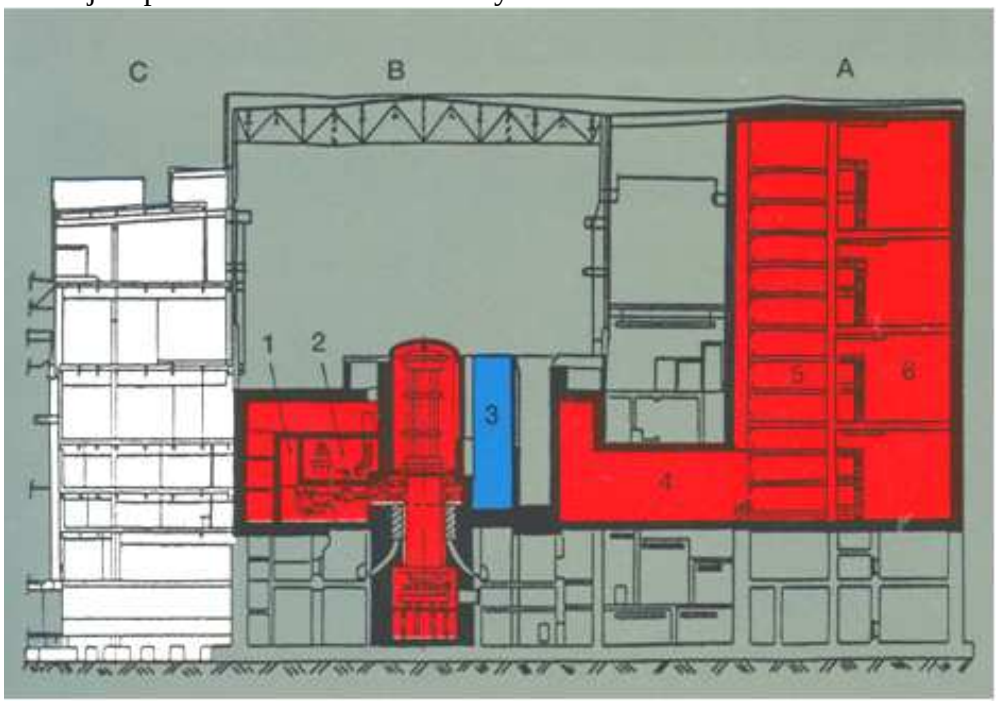
pozn. někdy je jako první bariéra uváděn materiál paliva, ovšem jen do fáze dokud nezačne sloužit přímo jako palivo.

První dvě opatření splňují všechny projekty PWR i VVER. Třetí opatření je výsadou projektů PWR – kontejnment.

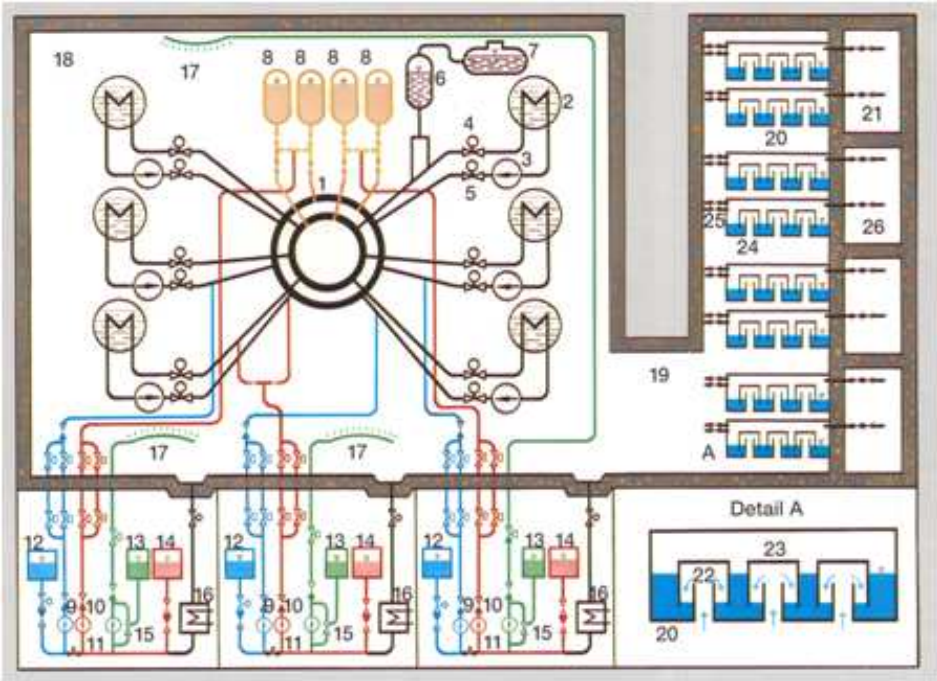
Kontejnment je vnější obálka jaderného zařízení, zabraňující, jak úniku štěpných produktů do životního prostředí, tak tvoří i bezpečnostní opatření proti narušení zvnějšku. V jeho nitru jsou všechna zařízení umístěna v jednom prostoru. První projekty VVER (VVER440) s tzv. kontejnmentem nepočítaly.

Náhradou klasického kontejnmentu mohou být například hermeticky těsné kobky, které můžeme vidět v projektu VVER440 na Dukovanské jaderné elektrárně v ČR. V hermeticky těsných kobkách jsou jednotlivá zařízení umístěna zvlášť. Nicméně z hlediska stávajících bezpečnostních požadavků na komerční jaderná zařízení není možné realizovat projekt bez kontejnmentu. Příkladem může být relativně nová jaderná elektrárna Temelín v ČR vystavěná jako projekt VVER1000, která již kontejnment má. Často jsou také dnes používány kombinace těchto dvou prvků ochrany. Další bezpečnostní prvky, které musí projekty PWR a VVER splňovat souvisí s opatřeními proti úniku štěpných produktů do životního prostředí při události LOCA (událost související s únikem chladiva z primárního okruhu). Tyto opatření lze dělit na pasivní a aktivní systémy ochrany. Pasivní systémy využívají přírodních zákonů a je na ně kladen velký důraz. Takovým pasivním zařízením je například barbotážní věž, která je nutná zejména u starších projektů VVER s hermeticky těsnými kobkami, protože kobky nevydrží tak velký přetlak jako kontejnment a je třeba jej někam upouštět. V barbotážní věži je unikající pára nucena se filtrovat přes bazény s vodou,

ochlazovat, kondenzovat, zmenšovat svůj objem a tím i zatížení na stěny kobek. Dále se pak používají například ledové kondenzátory.



obr. 1.1.5b) Řez jaderným zařízením s barbotážní věží, [1]
1 – hermeticky těsné kobky (boxy), 2 – paluba pohonů HCČ, 3 – bazén použitého paliva, 4 – spojovací koridor, 5 – barbotážní žlaby,
6 – prostory pro zadržení nekondenzujících plynů



obr. 1.1.5c) Schematické zobrazení zapojení a funkce barbotážní věže, [1]
(odpovídá projektu VVER440 Dukovany ČR)

Mezi pasivní systém ochrany před nekontrolovatelným rozvojem štěpné reakce se řadí také vysoký záporný teplotní součinitel reaktivity, ten udává použité medium pro

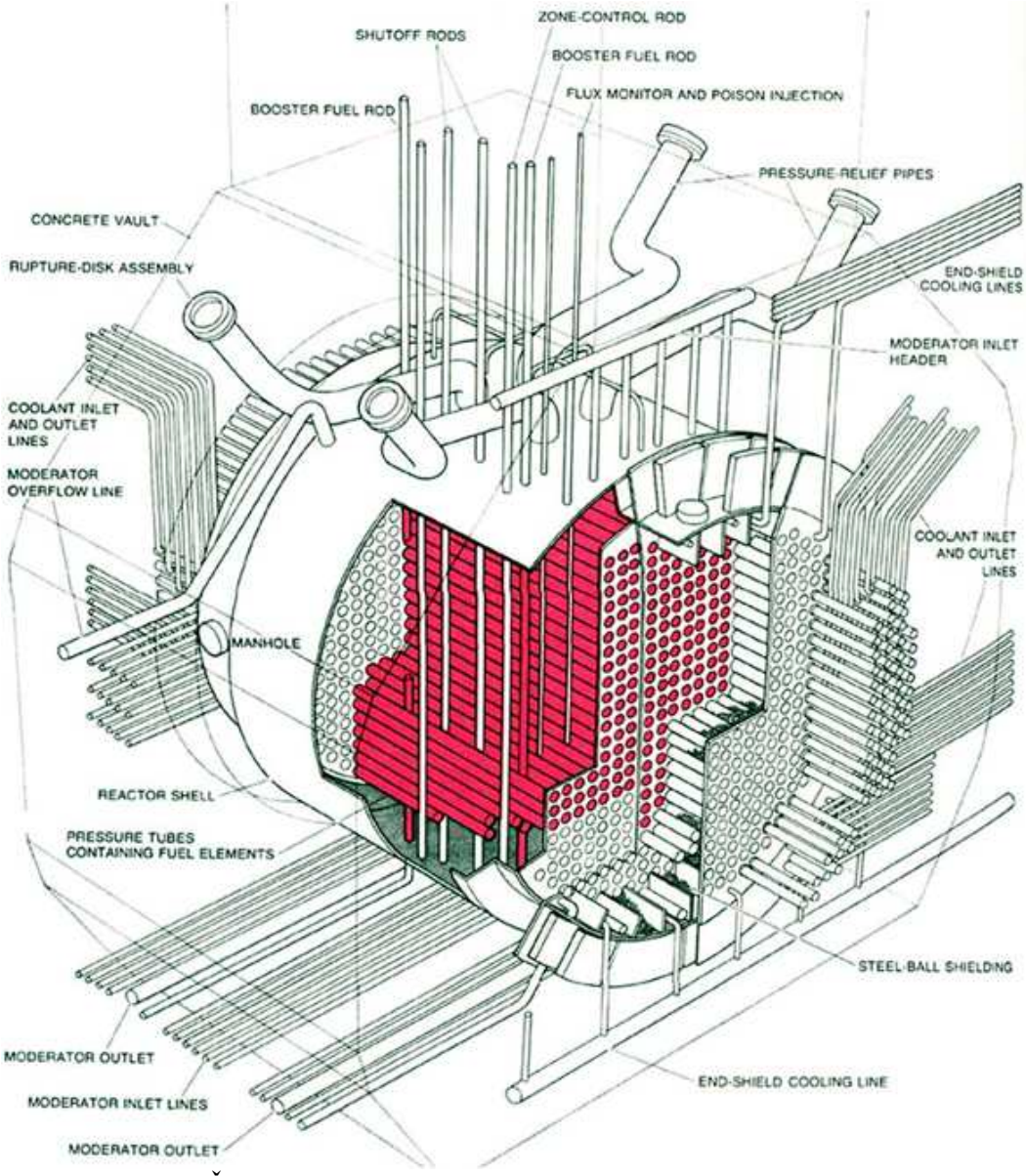
moderování, tedy v případě PWR a VVER lehká voda (H_20), která vlivem zvyšující se teploty ztrácí schopnost účinně moderovat a reakce v aktivní zóně pohasíná, tuto vlastnost sdílí všechny tlakovodní reaktory. Na druhé straně aktivní systémy potřebují pro svoji činnost vnější zdroj energie, zásah obsluhy nebo externí spuštění. Mezi takové patří například sprchové systémy. Tyto slouží pro ochlazení unikající páry, tím ke snížení objemu par a tedy menšímu přetlakovému namáhání na stěny kobky nebo kontejnmentu. Dále pak samovolné spuštění bezpečnostních havarijních tyčí do aktivní zóny reaktoru vlivem vlastní váhy a zemské gravitace, jedná se ve skutečnosti o kombinaci aktivního a pasivního systému. Tyto tyče jsou vyrobeny z účinných absorbátorů neutronů například slitin Kadmia (Cd), Boru (B) nebo Hafnia (Hf). Pro srovnání například varné reaktory RBMK měly zasouvání bezpečnostních havarijních tyčí zespodu (byly odkázány na externí pohon pro zasunutí) a to proto, že v horní části byl odvod páry. Vývoj těchto reaktorů byl ovšem zastaven z bezpečnostních důvodů. Reaktory RBMK měly kladný teplotní součinitel reaktivity (moderováno grafitem), což je z hlediska současné bezpečnosti komerčních jaderných zařízení nepřípustné. Jejich výhodou naopak byla nižší ekonomická náročnost na výstavbu. Reaktory RBMK se neblaze zapsali do historie incidentem v jaderném zařízení Černobyl, kde došlo zatím k největší havárii komerčního jaderného zařízení vůbec, které bylo ovšem způsobeno chybou obsluhy, tedy lidským faktorem.

1.2 TLAKOVODNÍ REAKTORY S TĚŽKOU VODOU (PHWR)

Těžká voda použitá u reaktorů typu PHWR (Pressurized Heavy Water Reactors) umožňuje svými vlastnostmi poměrně dobrou neutronovou bilanci. Tedy je možné použít řidší palivovou mříž a zavést technologické kanály. V dnešní době pro komerční použití rozeznáváme dva typy těžkovodních tlakových reaktorů CANDU (Canadian Deuterium Uranium) a reaktor použitý v zařízení Atucha jaderné elektrárny v Argentině. Zásadní rozdíl mezi CANDU a zařízením v Atucha je v provedení samotného reaktoru. CANDU je složen ze samostatných technologických kanálů a Atucha má technologické kanály umístěné v tělesové tlakové nádobě. Mezi jejich společné prvky a vlastnosti patří:

a) Použití těžké vody D_2O jako moderátoru i chladiva
b) Palivem je neobohacený přírodní uran ve formě oxidu uraničitého (UO_2)
c) Dobrá neutronová bilance
d) Souřadnicové zavážecí stroje
e) Dvouokruhové zapojení

Další specifika těžkovodních tlakových reaktorů nebudou v této práci již uváděna. A to z důvodu, že práce je záměrně směřována na téma inovativních prvků lehkovodních tlakových reaktorů EPR, které s těžkovodními tlakovými reaktory nesouvisí.



obr. 1.2a) Řez těžkovodním reaktorem kanálového typu CANDU, [1]

POPIS ZÁKLADNÍCH INOVAČNÍCH PRVKŮ PROJEKTU EPR

2. ÚVOD K PROJEKTŮM EPR

Tato část práce bude věnována zejména novinkám a úpravám v projektech EPR. Projekty EPR (European water Preasurized Reaktor) obsahující reaktory tzv. 3+ generace jsou jaderná zařízení pracující s lehkou vodou pod tlakem. Principiálně jejich funkčnost je totožná se staršími projekty PWR a VVER. Nicméně jejich hlavním inovačním prvkem je výrazně posílený faktor bezpečnosti. Změny byly provedeny v úplném rozsahu zařízení od rozestavění budov po komponenty primárního okruhu. Nové projekty EPR jaderných zařízení by měly odolat hypoteticky pravděpodobným haváriím značného rozsahu ať už s působením z vnějšku nebo vnitřku zařízení. Společnost AREVA produkující zařízení EPR je původem z Francie.

2.1 USPOŘÁDÁNÍ BUDOV-PROVOZŮ JADERNÝCH ZAŘÍZENÍ PODLE EPR

Uspořádání budov, jejich členění, oddělení a jištění je znatelné posílení bezpečnostní stránky celého jaderného zařízení. Projekty EPR se vyznačují vysokou odolností vůči vnějším vlivům, jako jsou zemětřesení, pády letadel nebo útoky zbraňovými systémy. Celý tzv. jaderný ostrov je umístěn na jednolitý betonový základ, budovy jsou odlehčeny, těžké komponenty a napájecí nádrže jsou umístěny do nejnižší úrovně. Dvě budovy havarijních systémů, budova reaktoru a sklad paliva chrání vnější obálka z předepjatého betonu, která vytváří dostatečný štít proti pádu letadla. Zbylé dvě budovy havarijních systémů jsou ochráněny prostorovým oddělením stejně jako budovy dieselagregátů, tím se vyvarujeme případného současného selhání způsobeného vnějším vlivem.

obr. 2.1a) Uspořádání budov EPR projektu, [3]
1 – budova reaktoru, 2 – budova pro skladování paliva, 3 – budovy bezpečnostních havarijních systémů, 4 – budovy dieselagregátů, 5 – budova pomocných aktivních provozů, 6 – budova pro nakládání s odpady, 7 – budova turbíny (strojovna)

1) Budova reaktoru obsahuje primární okruh a bazény pro dočasné uskladnění vyhořelého paliva. Tyto bazény jsou však umístěny mimo samotný kontejnment z předepjatého betonu. Budova se skládá z vnitřního primárního válcového kontejnmetu z předepjatého betonu opatřeného nerezovými plechy z vnitřní strany a sekundárního kontejnmentu z železobetonu.

2) V budově pro skladování paliva je umístěno nové palivo a jeho manipulační zařízení. V přízemí je umístěn systém chlazení bazénu s vyhořelým palivem, systém nouzového doplňování kyseliny borité do systému chlazení a kontrolní systém úpravy vody.

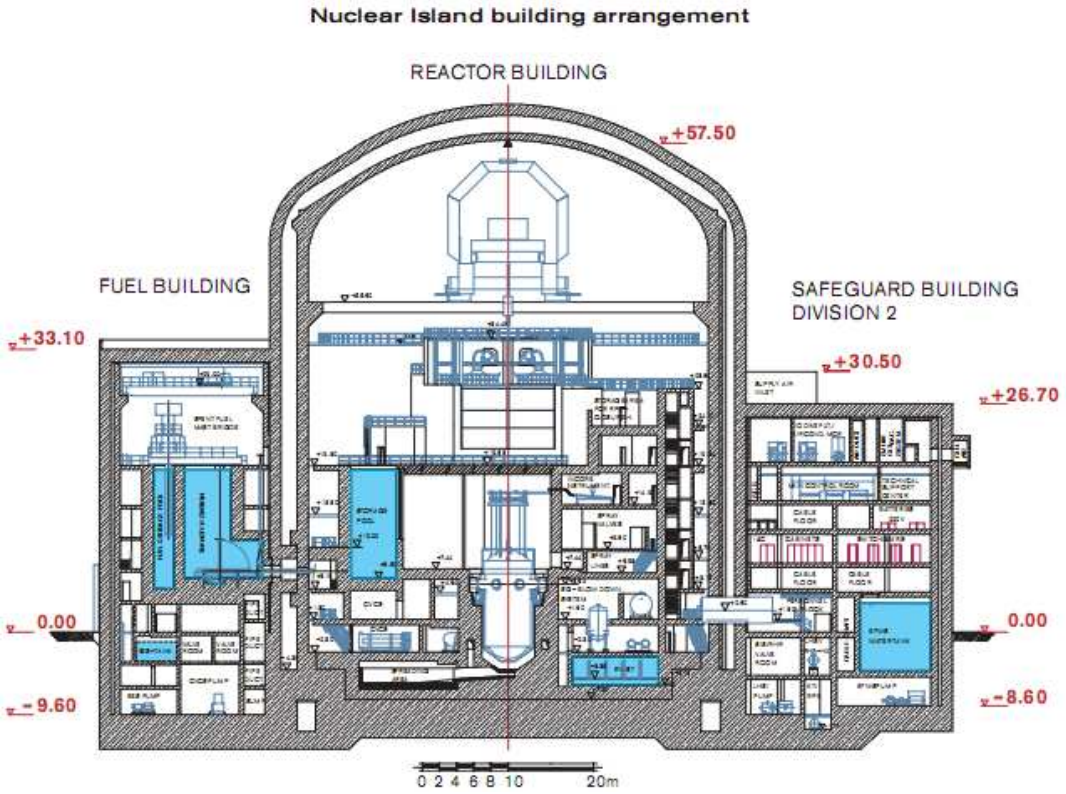
3) Budovy bezpečnostních havarijních systémů. Nouzový systém doplňování paliva, systém vstřikování kyseliny borité a jejich podpůrné systémy jsou umístěny odděleně ve čtyřech samostatných budovách. Dozorna nad těmito systémy je umístěna v jedné ze čtyř budov.

4) Budovy dieselagregátů jsou dvě a obsahují čtyři dieselové agregáty s jejich podpůrnými systémy. Tyto záložní systémy energie zvládnou udržet v chodu bezpečnostní řetězce i při úplné ztrátě elektrického napájení tzv. total black-out. Ochrana záložních systémů spočívá v dostatečném prostorovém oddělení obou budov.

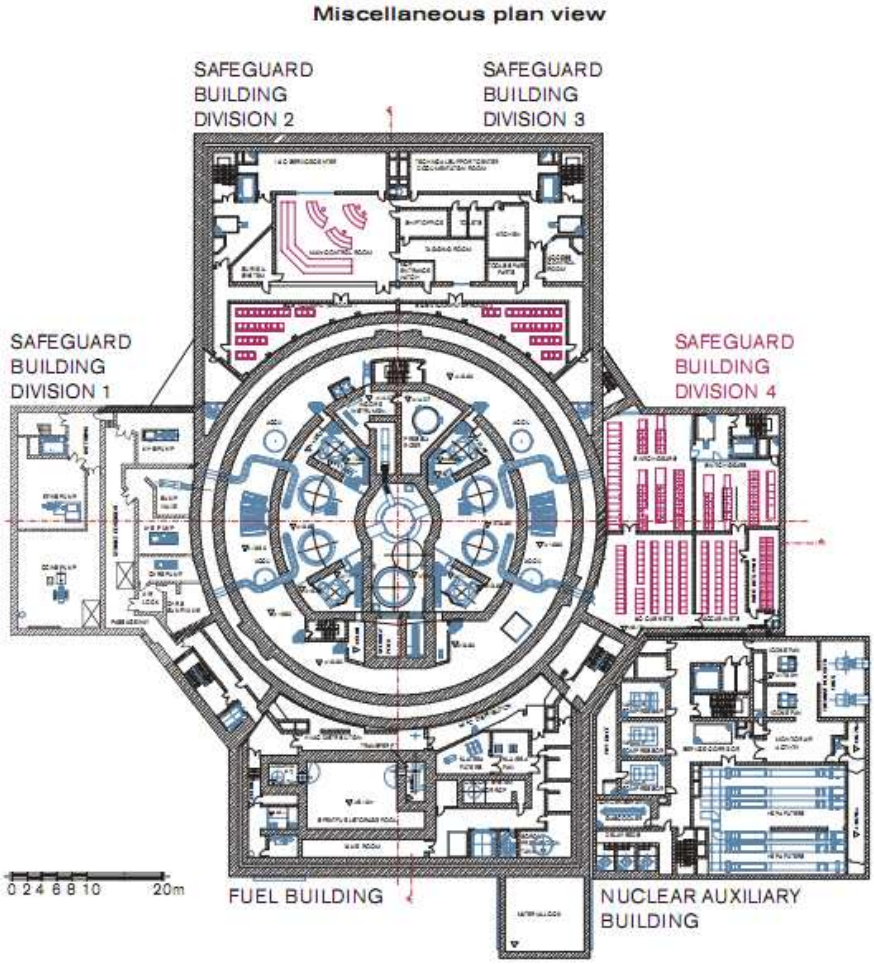
5) Budova pomocných aktivních provozů je místo, kde se nalézá systém chlazení technologické vody, systémy pro vzorkování a zkoušení, údržbu a odkládací oblast pro komponenty potřebné k výměně paliva.

6) Budova pro nakládání s odpady je navržena pro shromažďování a skladování kapalných i pevných radioaktivních odpadů.

7) Budova turbíny (strojovna) obsahuje všechny hlavní části sekundárního okruhu (turbína, generátor, kondenzátor, atd.).



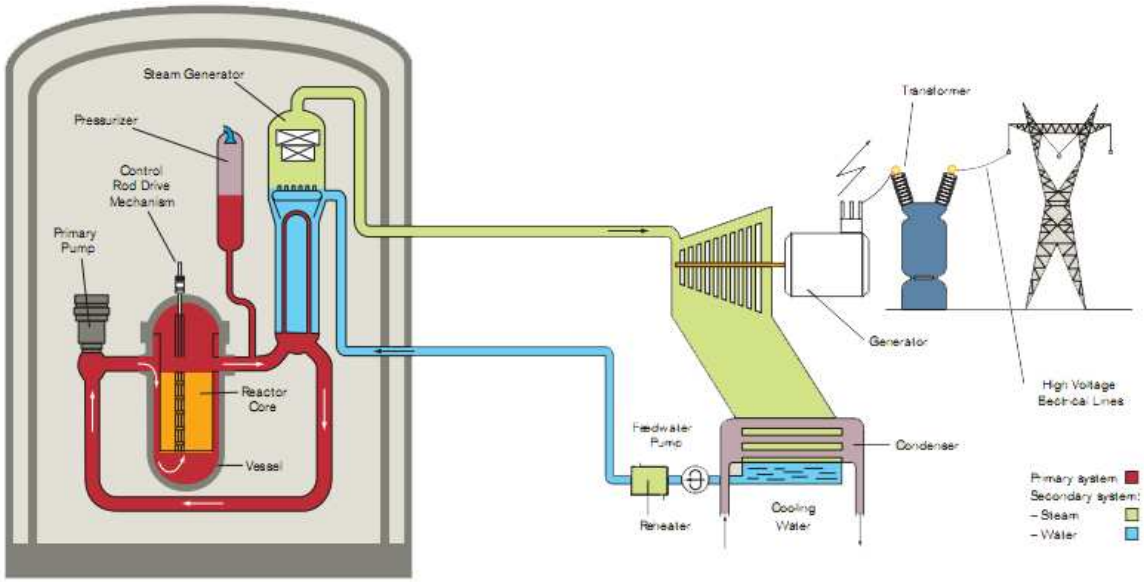
obr. 2.1b) Vertikální řez jaderným ostrovem, [3]



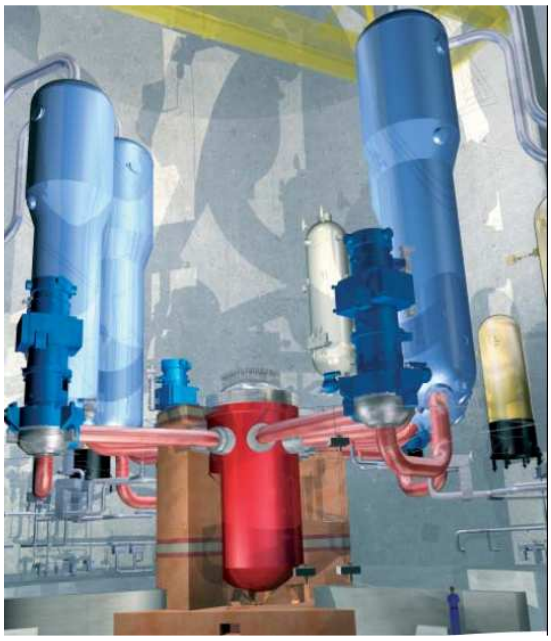
obr. 2.1c) Horizontální řez jaderným ostrovem, [3]

2.2 KOMPONENTY A USPOŘÁDÁNÍ PRIMÁRNÍHO OKRUHU EPR

Charakteristické prvky pro projekty EPR jsou také úpravy zabezpečení a zařízení primárního okruhu. Kompenzátor objemu je umístěn v samostatné místnosti, cirkulační smyčky i jejich větve jsou od sebe navzájem odděleny zdí a celý primární okruh je uzavřen v další masivní zdi. To vykazuje zvýšenou ochranu proti poškození dalšího zařízení, pokud by došlo k utržení větve cirkulační smyčky. Uspořádání primárního okruhu EPR je navrženo jako čtyřsmyčkové se svislými parogenerátory, čtyřmi hlavními cirkulačními čerpadly ve studené větvi a kompenzátorem objemu připojeným k jedné z horkých větví. V tlakové nádobě je voda tlačena směrem dolů při okraji pláště a poté je skrze aktivní zónu hnána směrem vzhůru.



obr. 2.2a) Oběh vody v projektu EPR, [3]



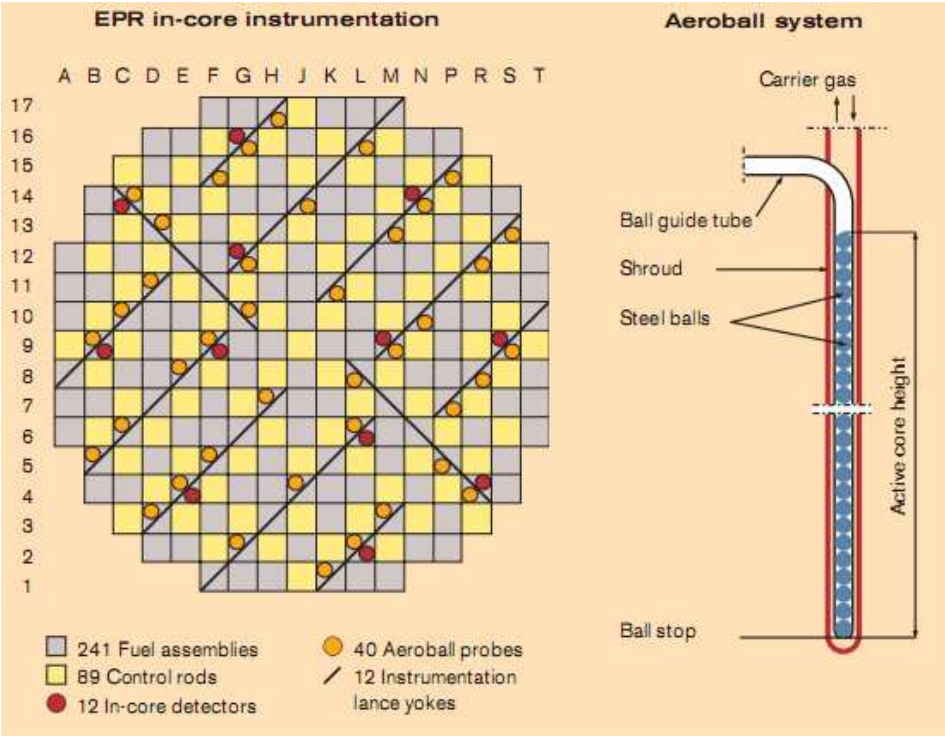
obr. 2.2b) Uspořádání primárního okruhu EPR, [3]

Prvky primárního okruhu jako tlaková nádoba, kompenzátor objemu a parogenerátor vykazují větší objem, než tomu bylo u předchozích podobných projektů. Tento fakt má především kladný bezpečnostní dopad. V případě tlakové nádoby je zvýšen obsah vody nad aktivní zónou (mezi AZ a nátrubky vývodu vody z tlakové nádoby), což může mít velký vliv při úniku chladiva z primárního okruhu nebo dochlazování. Větší objem kompenzátoru zaručuje dostatečnou časovou rezervu při abnormálních komplikacích. Zvětšení parogenerátoru poskytuje například výhodu větší zásoby vody v okruhu, což by při havárii spojené s únikem chladiva mohlo dát časovou rezervu do vysušení. Sekundární strana parogenerátoru je také zvětšena a to může poskytnout potřebný čas pro reakci, pokud by došlo například k výpadku napájecího čerpadla parogenerátoru. Naddimenzování součástí také prodlužuje jejich životnost. Dále můžeme pozorovat některé zvýšené parametry.

Výkon reaktoru	4500 MWt
Počet cirkulačních smyček	4
Průtok chladiva jednou cirkulační smyčkou	28330 m^3/h
Teplota chladiva na vstupu do reaktoru	295,9 °C
Teplota chladiva na výstupu z reaktoru	327,2 °C
Projektovaný tlak v primárním okruhu	17,6 MPa
Provozní tlak v primárním okruhu	15,5 MPa
Projektový tlak v sekundárním okruhu	10,0 MPa
Tlak napájecí vody za normálních podmínek	7,8 MPa
Tlak páry při najíždění reaktoru při horké záloze	9,0 MPa

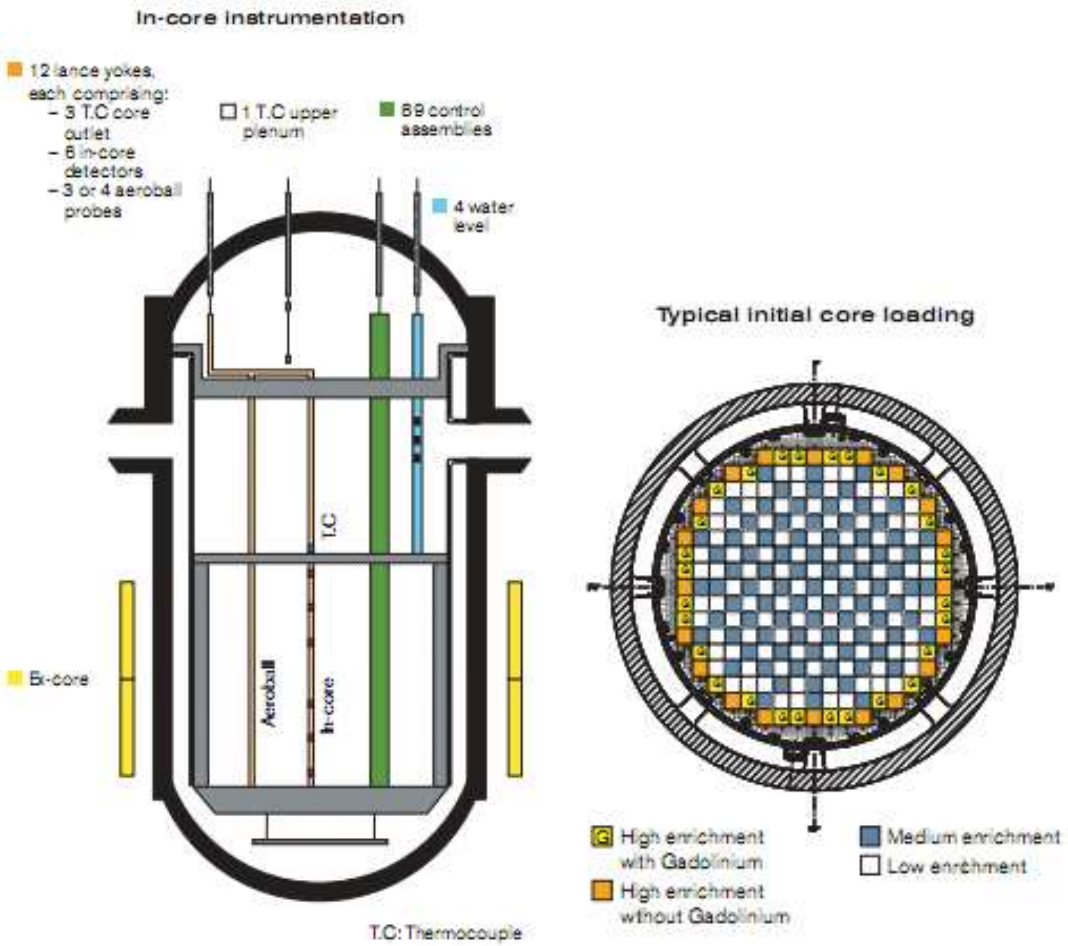
2.3 AKTIVNÍ ZÓNA, PALIVO, MĚŘENÍ A REGULACE

U zařízení projektů EPR došlo k mnoha změnám a vylepšením v oblasti měření v aktivní zóně, ale také v palivovém a absorpčním obsahu AZ. Jednou z takových věcí jsou postupně vyhořívající absorbátory (gadolinium), které jsou umístěny v některých palivových kazetách jako tablety palivových prutů. Tyto jsou používány k nastavení počáteční reaktivity a rozložení výkonu. Reaktory EPR byly navrženy pro různé možnosti paliva založeného na UO_2 (nízko-obohacený uran do 5%) nebo MOX (směs UO_2 a PuO_2). Umožňují také rozšířit spektrum palivových cyklů, vyšší účinnosti a efektivnější spotřebu paliva.
Novinkou objevující se v projektu EPR je jeden ze systémů měření rozložení výkonu (neutronového toku) v aktivní zóně tzv. aeroball systém.



obr. 2.2c) Schéma AZ se zobrazeným měřením – vlevo, systém aeroball – vpravo
fuel assembler – palivové soubory, control rods – regulační tyče,
in-core detectors – vnitroreaktorové měření, aeroball probes – aeroball systém měření,
[3]

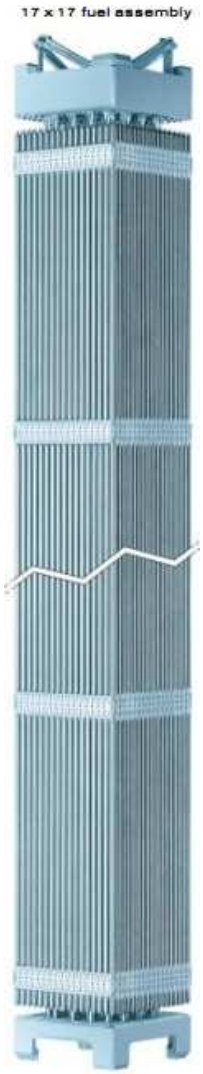
Prakticky se jedná o vanadové kuličky (sondy), které jsou periodicky vstřelovány pomocí hnacího plynu do vodících kanálů v aktivní zóně. Tyto kanály jsou na třiceti pozicích a během pěti minut jsou známy výsledky. Na základě rozdílu aktivační úrovně kuliček před a po zavedení se vyhodnocují potřebné parametry. Neutronový tok je možné zobrazit v trojrozměrném modelu. Všechny měření jsou vyvedeny skrze víko tlakové nádoby, tedy spodní vrchlík tlakové nádoby může být celistvý.



obr. 2.2d) Schéma měření uvnitř reaktoru EPR – vlevo,
typická první zavážka paliva aktivní zóny EPR reaktoru – vlevo, [3]

Další důležité výhody, které sebou aktivní zóna reaktoru EPR přináší, jsou:
17% úspory ve spotřebě uranu na jednu vyrobenou megawatthodinu,
15% snížení produkce dlouhodobých aktinoidů na jednu vyrobenou megawatthodinu,
možnost použití palivových souborů MOX, což je výhodné pro opětovné využití plutonia extrahovaného z vyhořelého paliva. Parametry aktivní zóny reaktoru EPR:

Ekvivalentní průměr aktivní zóny	3767 mm
Aktivní délka paliva	4200 mm
Počet palivových souborů v AZ	241
Počet palivových proutků v AZ	63 865
Průměrná úroveň lineárního výkonu	156,1 W/cm
Maximální vyhoření	> 70 000 MWd/t
Vnější průměr palivového proutku	9,5 mm
Tloušťka pokrytí	0,57 mm
Materiál pokrytí	M5 – zirkonová slitina



obr. 2.2e) Palivový soubor (kazeta) pro reaktory EPR, [3]

Palivové soubory (kazety) jsou čtvercového příčného průřezu s počtem prutů na jednu kazetu 289 ve čtverci 17x17. Palivové soubory zaručují minimalizovaný hydraulický odpor a dobrý přestup tepla.
Aktivní zóna má k dispozici 89 regulačních a havarijních tyčí (souborů) ve formě klastrů, které jsou dále rozděleny podle skupin pro rychlé odstavení, regulaci teploty moderátoru, axiálního vyvážení, atd. Regulační tyče jsou sestaveny z regulačních prutů (1tyč = 24prutů) podobně jako palivové kazety a taktéž pruty regulačních tyčí jsou konstruovány jako palivové. Obsahují válce a tablety z účinných absorbátorů Ag – stříbra, In – india a Cd – kadmia. Tyto jsou uzavřeny v pokrytí z nerezové oceli. Problém opotřebení pokrytí při používání regulačních tyčí byl vyřešen iontovou nitridací, čímž se stal povrch prutů extrémně odolný proti opotřebení. Regulační klastry po zasunutí do reaktoru zabírají téměř celou aktivní délku palivových souborů (kazet).

obr. 2.2f) Pohled na regulační klastr (tyč) reaktoru EPR, [3]

Další posun projektů EPR je v ovládacích mechanizmech regulačních tyčí. Ovládací mechanizmy jsou chlazeny přirozenou konvekcí, čímž odpadají jeho chladicí systémy a je možné ušetřit místo nad víkem tlakové nádoby.

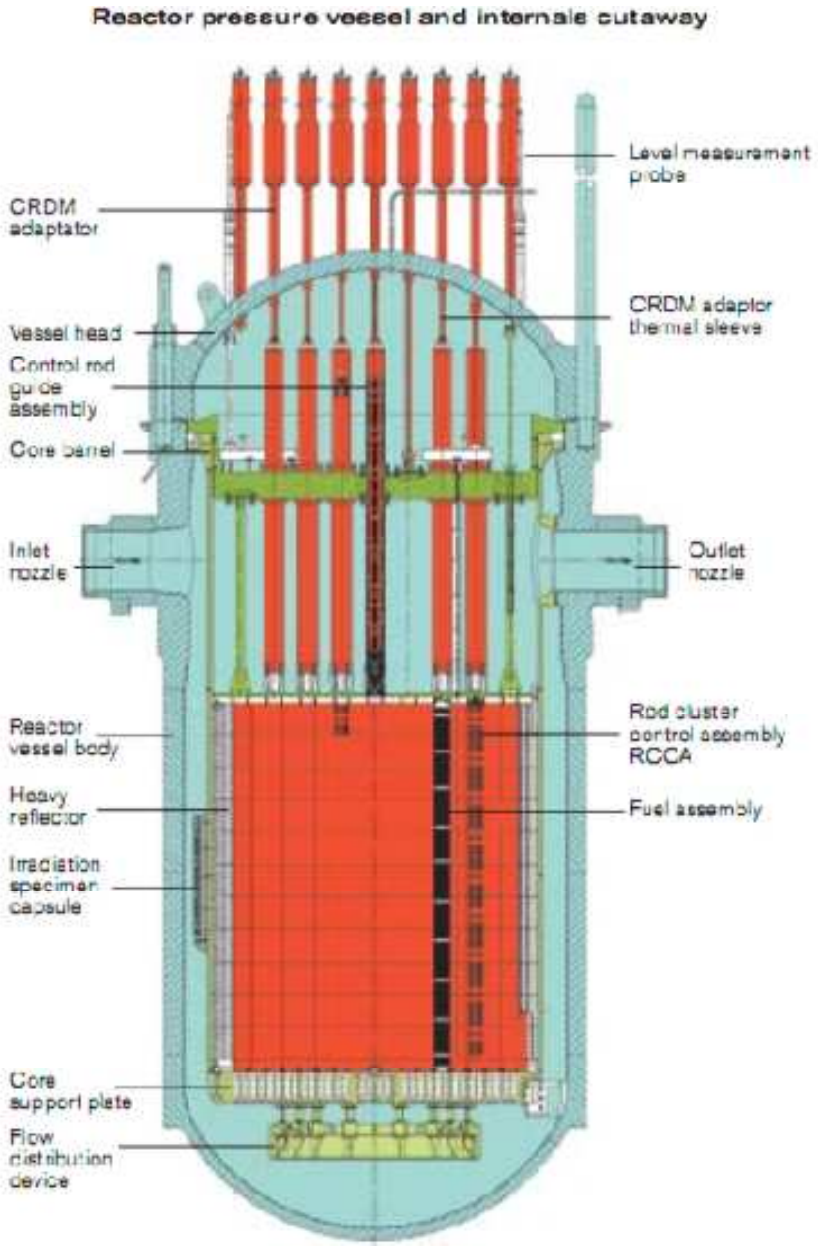
2.3 TLAKOVÁ NÁDOBA A VNITŘNÍ VESTAVBY

Tlaková nádoba reaktorů podle projektu EPR je principiálně obdobné konstrukce jako u starších lehkovodních tlakových reaktorů (PWR,VVER). Protože ale svary a jejich kontrola na tělese tlakové nádoby je nejen nákladná záležitost, přistoupilo se k jejich omezení a horní díl nádoby je vyroben vykováním z jednoho kusu. Dále pak všechny výstupy (vnitroreaktorové měření, regulační systémy, atd.) z tlakové nádoby vedou skrz víko, a proto je spodní díl (vrchlík) celistvý z jednoho kusu. Všechny vnitřní plochy nádoby jsou opatřeny nerezovým odolným návarem. Tlaková nádoba je navržena na dobu životnosti 60let.

obr. 2.3a) Prstenec tlakové nádoby reaktoru EPR s hrdly pro smyčky primárního okruhu, [3]

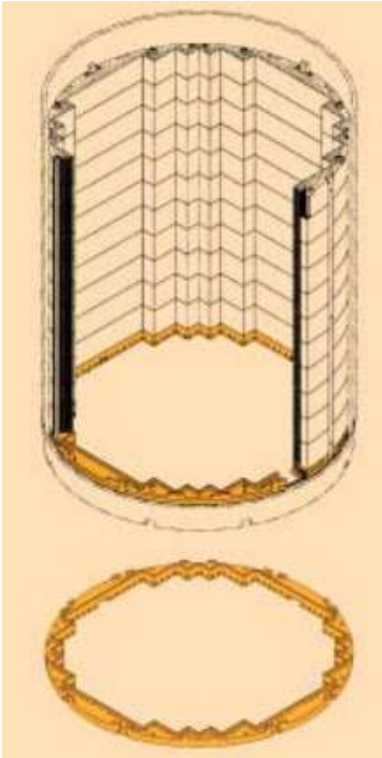
obr. 2.3b) Víko tlakové nádoby EPR – vlevo, tlaková nádoba reaktoru EPR – vpravo, [3]

Dosažená rezerva v životnosti tlakové nádoby je důsledkem kvalitnějších materiálů použitých pro její výrobu a také snížením neutronového toku, který namáhá tlakovou nádobu reaktoru a může být jedním z iniciátorů křehkého lomu. Toho se dosáhlo zvětšením průměru tlakové nádoby, palivovým managementem snižujícím úniky neutronů a také zavedením typického inovačního prvku zařízení EPR a tím je těžký reflektor.



obr. 2.3c) Řez reaktorem typu EPR s vyobrazením vnitřních vestaveb
heavy reflector – těžký reflektor, [3]

Na vnějším obvodu šachty pro tlakovou nádobu jsou umístěny vzorky materiálů (svědečné vzorky), ze kterých jsou vyrobeny vnitřní vestavby, a tlaková nádoba reaktoru. Zde jsou ozařovány a později prozkoumávány v procesu hodnocení tlakové nádoby. Mezi mnohoúhelníkovou aktivní zónou a tělesem tlakové nádoby je umístěn těžký reflektor (heavy reflector – plášť aktivní zóny). Tento je charakteristickým inovačním prvkem projektů EPR. Zabraňuje únikům toku neutronů, čímž zlepšuje neutronovou bilanci a prodlužuje životnost dalších vestaveb včetně tlakové nádoby samotné. Je zhotoven z prstenců nerezové oceli usazených na sebe a stažených k sobě. V jeho konstrukci se vyskytují otvory a kanálky, kudy se odvádí teplo vznikající při pohlcování gama záření v reflektoru. Je dalším prvkem tvořícím druhou bariéru proti úniku záření.



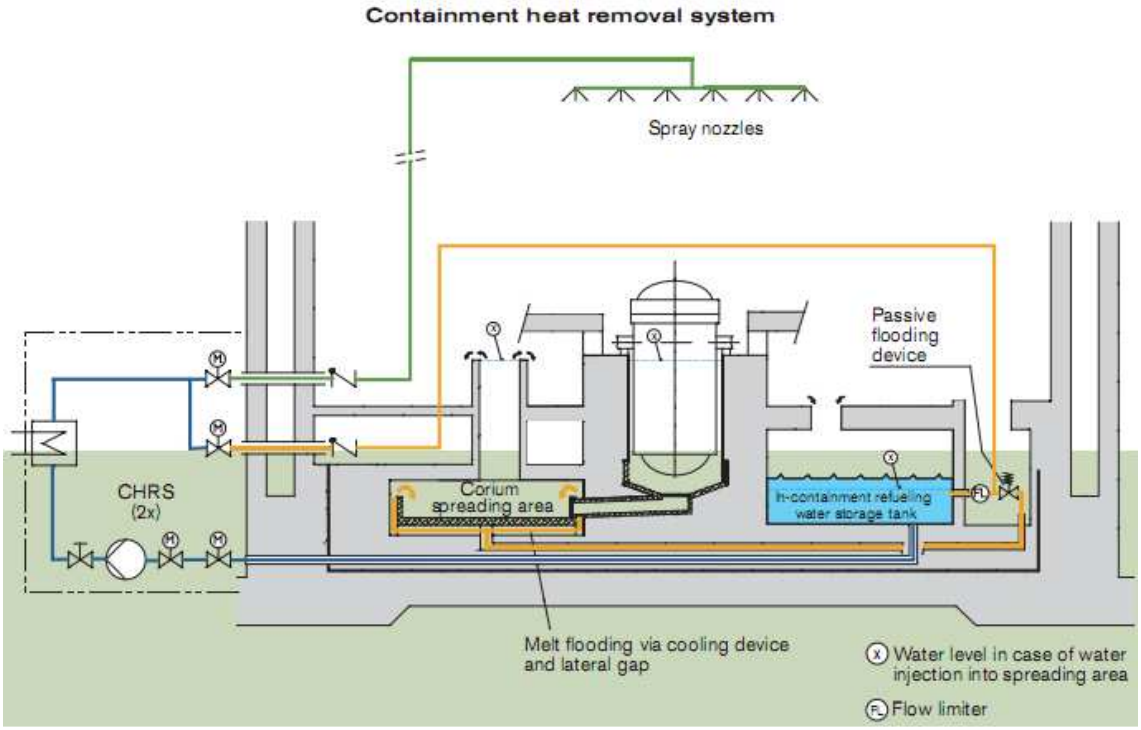
obr. 2.3d) Řez těžkým reflektorem (těžký reflektor) – nahoře,
prstenec (segment reflektoru) – dole, [3]

Těžký reflektor poskytuje zlepšení z hlediska mechanického chování vnitřních vestaveb. Žádné přerušení ani svary v blízkosti aktivní zóny, účinné chlazení reflektoru zamezuje výrazným deformacím.

Návrhový tlak tlakové nádoby reaktoru	17,6 MPa
Návrhová teplota tlakové nádoby reaktoru	351 °C
Životnost nádoby	60 let
Vnitřní průměr nádoby (bez nerezového návaru)	4885 mm
Tloušťka stěny nádoby (bez nerezového návaru)	250 mm
Tloušťka dna	145 mm
Výška nádoby včetně víka	12 780 mm
Hmotnost nádoby včetně víka	526 t
Tloušťka víka tlakové nádoby	230 mm
Ovládací mechanizmy regulačních tyčí	89
Měření teploty víka	1
Měření	16
Měření výšky hladiny chladiva	4
Hmotnost těžkého reflektoru	90 t

2.4 PREVENCE A LIKVIDACE TĚŽKÝCH HAVÁRIÍ V PROJEKTECH EPR

Prevence a bezpečnostní opatření jsou výsadním prvkem projektů jaderných zařízení EPR. Jedním z takových je prevence před tavením aktivní zóny při vysokém tlaku v primárním okruhu. Toho je dosaženo přidáním dalších ventilů, které by zajistily rychlé snížení tlaku i za předpokladu, že by selhal odlehčovací ventil kompenzátoru objemu. Ventily jsou konstruovány tak, aby při jejich prvním spuštění již zůstaly trvale otevřené. I při tak rozsáhlé havárii jako je tavení aktivní zóny a protržení tlakové nádoby je zajištěno, že všechny nebezpečné prvky zůstanou uzavřeny v kontejnmentu. Vysoká pevnost a odolnost tlakové nádoby by ale měla vyloučit jakékoli její poškození vlivem styku coria (roztavené aktivní zóny) a chladícího media. Projekty EPR počítají i s nejhorším případem, že by opravdu k porušení tlakové nádoby došlo a roztavená aktivní zóna by vytekla. K tomuto případu je určena tzv. usazovací oblast coria, kam by roztavená aktivní zóna bezpečně odtekla a následně byla chlazena a snižována její reaktivita.



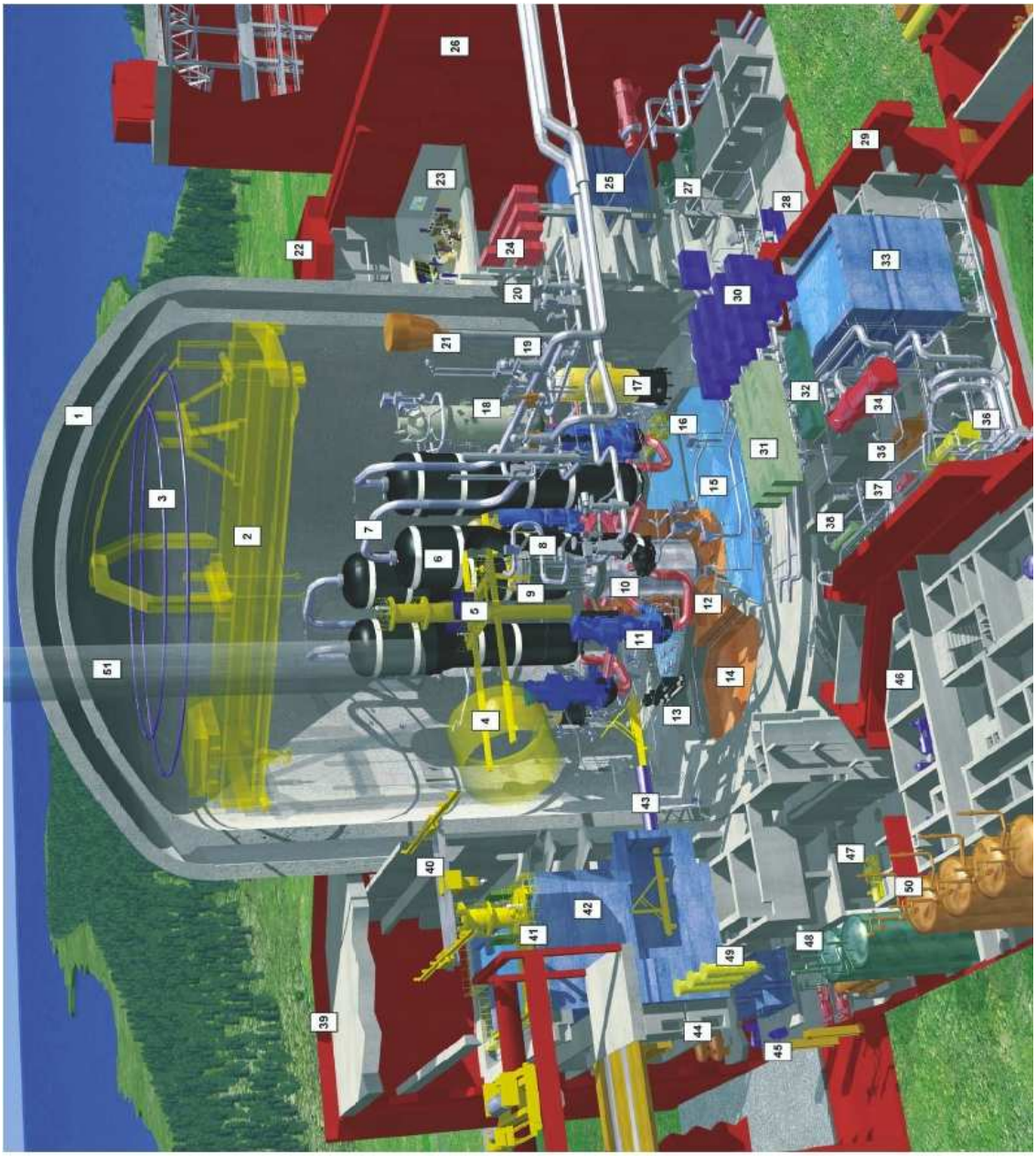
obr. 2.4a) Schéma systému odebírání zbytkového tepla, [3]
corium spreading area – rozšířená zóna pro corium (roztavenou aktivní zónu)

V případě výtoku coria do šachty reaktoru by byla zaplavena ocelová ucpávka odtoku a následně roztavena, tím by byl umožněn odtok roztavené aktivní zóny do rozšířené zóny pro corim, kde by bylo dále upraveno (vstřikováním vody gravitačními systémy z tanku uvnitř kontejnmentu). Povrch usazovací oblasti je 170m^2, který je dostatečně velký, aby byla zaručena potřebná teplosměnná plocha pro chlazení coria. Povrch betonové (předepjatý beton) šachty reaktoru je opatřen povrchem na bázi zirkonu, který je ochranou šachty před roztavenou AZ. Ve spodní části desky pro usazení coria jsou chladící kanálky, ve kterých cirkuluje voda pro chlazení. Chladící systémy jsou schopny, dochladit roztavené corium během několika hodin a úplně jej zpevnit (solidifikovat) do několika dní.

In the event of core meltdown, molten core escaping from the reactor vessel would be passively collected and retained, then cooled in a specific area inside the reactor building.

obr. 2.4b) Průhled kontejnmentem na usazovací zónu pro corium a tanky s vodou, [3]

V případě těžké havárie s roztavením aktivní zóny a poškozením tlakové nádoby by došlo k úniku vodíku, což by mohlo způsobit vodíkový výbuch. Vodík by vznikl při kontaktu chladícího media a zirkoniového pokrytí a při dalším tavení aktivní zóny v interakci coria a betonové nádrže v usazovací oblasti. Předepjatá vnitřní betonová zeď kontejnmentu je navržena tak, aby reakcím vodíku odolala. Včasné chlazení coria zamezuje dalšímu vzniku vodíku. Je zaveden také systém tzv. rekombinátorů, které udržují koncentraci vodíku pod 10%, pro vyloučení rizika výbuchu.
Zbytkové teplo vzniklé při havárii může být dlouhodobě odváděno pomocí zdvojených sprchových systémů, výměníků tepla a speciální tepelné vany. Při havárii je třeba minimálně 12 hodin k vychlazení celého prostoru kontejnmentu tedy 80 000m^3. Další výhodou je možnost napájení záchytné nádrže současně s napájením sprchových systémů.

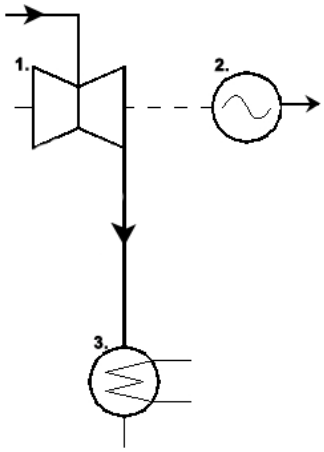


obr. 2.4c) Průhled jaderným zařízením podle projektu EPR, [3]

VÝPOČET JEDNOHO VYBRANÉHO ZAŘÍZENÍ

3. VÝPOČET POTŘEBNÉHO PRŮTOKU KONDENZÁTOREM

3.1 VÝPOČET ZBYTKU VÝKONU URČENÉHO K VYCHLAZENÍ V II. O.

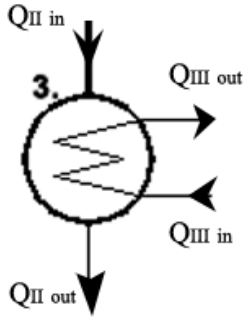


obr. 3.1 Část tepelného schématu sekundárního okruhu
1 – parní turbína, 2 – el. generátor, 3 – kondenzátor

Na základě praktických zkušeností a konzultací jsem zvolil vstupující výkon do sekundárního okruhu z parogenerátoru 4500 [MW]. Výkon převedený na elektrickou energii odpovídá hodnotě 1600 [MW]. Při výpočtu zanedbáváme odběry výkonu pro vysoko a nízkotlakové ohříváky. Tedy z jednoduchého výpočtu zbytkový výkon určený k vychlazení je 2900 [MW].

$$4500 - 1600 = 2900[MW]$$

3.2 PARAMETRY KONDENZOVÁNÉHO MEDIA



obr. 3.2 Schéma kondenzátoru a naznačenými tepelnými toky

Do kondenzátoru vstupuje pára se zbytkovým výkonem 2900 [MW]. Úkolem kondenzátoru je provést úplnou kondenzaci páry na vodu při zachování teploty media (40 °C na vstupu i výstupu chlazeného media z kondenzátoru). Přičemž je zbytek výkonu odváděn dalším chladícím okruhem do chladící věže a poté zpět do kondenzátoru. Nejprve je třeba zjistit základní parametry páry z parních tabulek na vstupu do kondenzátoru a poté spočítat hmotnostní tok.

VSTUP KONDENZOVÁNÉHO MEDIA DO KONDENZÁTORU

výkon	$\dot{Q}_{II\ in}$	2900	[MW]
teplota	$t_{II\ in}$	40	[°C]
entalpie	$i''_{II\ in}$	2573	[kJ/kg]

$$\dot{Q}_{II\ in} = i''_{II\ in} \times \dot{m}_{II\ in} \rightarrow \dot{m}_{II\ in} = \frac{\dot{Q}_{II\ in}}{i''_{II\ in}} = \frac{2900 \times 10^3}{2573} \doteq 1123\ [\frac{kg}{s}]$$

Na výstupu z kondenzátoru bude zachován hmotnostní tok jako na vstupu. Proudícím mediem ve výstupu chlazeného media bude voda ve stavu kapalném. Tedy nastane změna její entalpie.

VÝSTUP KONDENZOVANÉHO MEDIA Z KONDENZÁTORU

hmotnostní tok	$\dot{m}_{II\ out}$	1123	[kg/s]
teplota	$t_{II\ out}$	40	[°C]
entalpie	$i'_{II\ out}$	167,5	[kJ/kg]

$$\dot{Q}_{II\ out} = i'_{II\ out} \times \dot{m}_{II\ out} = 167{,}5 \times 1123 \doteq 188119[kW] \doteq 188{,}12[MW]$$

3.3 POTŘEBNÝ TOK CHLADÍCÍ VODY KONDENZÁTORU

Nyní lze dopočítat kolik výkonu je odvedeno chladícím médiem z kondenzátoru do chladící věže prostým výpočtem z rozdílu výkonů v tepelných tocích na vstupu a výstupu kondenzovaného media v kondenzátoru.

$$\dot{Q}_{III\ out} = \dot{Q}_{II\ in} - \dot{Q}_{II\ out} = 2900 - 188{,}12 = 2711{,}88[MW]$$

Z praktických znalostí víme, že chladnější větev chladící vody, která se vrací ochlazená z chladící věže do kondenzátoru, se pohybuje teplotně v rozmezí 13 – 33[°C]. To z důvodu, aby bylo možné udržet kondenzaci páry v kondenzátoru na požadovaných parametrech. Jsou však třeba teplotní nárůsty a poklesy, které vznikají zejména při změně ročního období, kompenzovat hmotnostním tokem chladícího media. Dalším zjištěným parametrem je teplota v horké větvi chladící vody, která vystupuje z kondenzátoru do chladící věže. Tato se pohybuje v hodnotách o 5 – 10[°C] vyšších než teplota ve studené větvi. Pro názornost příkladu však postačí zvolený průměr 8[°C]. Dále také víme, že hmotnostní tok chladící vody bude na vstupu a výstupu z kondenzátoru totožný. Poté z parních tabulek odvodíme hodnoty entalpie pro studenou i horkou větev ve zvolených teplotních rozsazích a spočteme potřebný průtok chladící vody kondenzátorem.

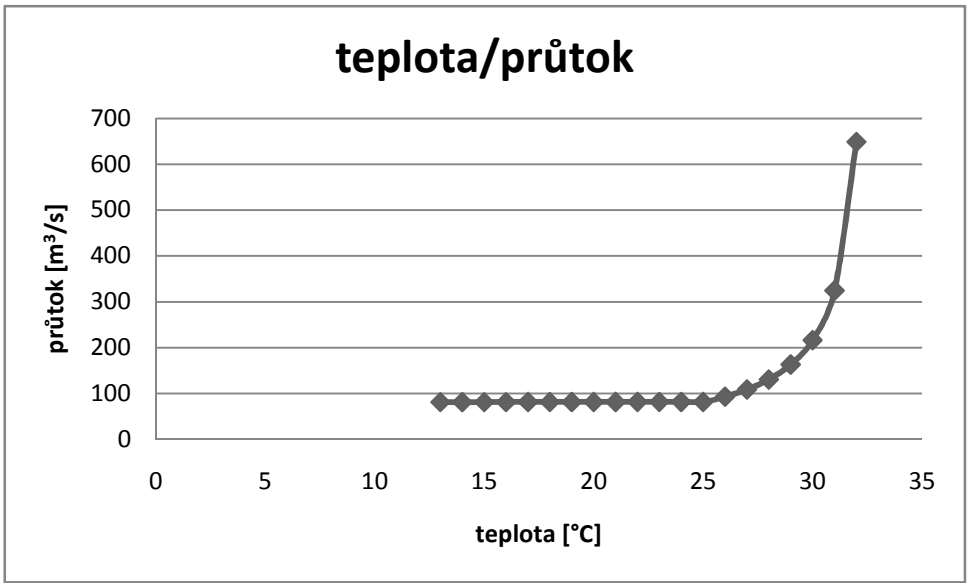
$$\dot{Q}_{III\ out} = \dot{m} \times (i'_{III\ out} - i'_{III\ in}) \rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{Q}_{III\ out}}{i'_{III\ out} - i'_{III\ in}} \left[\frac{kg}{s}\right]$$

$$\dot{m} = \rho \times \dot{V} \rightarrow \dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

studená větev	horká větev	entalpie studené větve	entalpie teplé větve	hustota vody	hmotnostní průtok	Průtok objemový
°C	+ 8°C	kJ/kg	kJ/kg	kg/m^3	kg/s	m^3/s
13	21	54,6	88,1	999,33	80951,64	81,00592
14	22	58,8	92,3	999,20	80951,64	81,01645
15	23	63	96,5	999,05	80951,64	81,02862
16	24	67,2	100,7	998,90	80951,64	81,04079
17	25	71,4	104,8	998,73	81194,01	81,29726
18	26	75,5	109	998,55	80951,64	81,06919
19	27	79,7	113,2	998,36	80951,64	81,08462
20	28	83,9	117,4	998,16	80951,64	81,10087
21	29	88,1	121,6	997,95	80951,64	81,11793
22	30	92,3	125,7	997,73	81194,01	81,37874
23	31	96,5	129,9	997,50	81194,01	81,39751
24	32	100,7	134,1	997,25	81194,01	81,41791
25	33	104,8	138,3	997,00	80951,64	81,19523
26	33	109	138,3	996,74	92555,63	92,85835
27	33	113,2	138,3	996,47	108043	108,4258
28	33	117,4	138,3	996,19	129755	130,2513
29	33	121,6	138,3	995,91	162388	163,0549
30	33	125,7	138,3	995,61	215228,6	216,1776
31	33	129,9	138,3	995,30	322842,9	324,3674
32	33	134,1	138,3	994,99	645685,7	648,9369
33	33	138,3	138,3	994,67	x	x

tab. 3.3a) Tabulka závislostí

Z vypočtených hodnot vyplývá, že čím menší je schopnost vychlazovat vodu v horké větvi, tím musí narůstat průtok. V hodnotách jsou patrné i podobnosti. V jistých rozsazích, viditelných v tabulce, je možné pozorovat stagnaci hodnot nebo jejich minimální odchylky, jak je vidět na grafu 3.3b).



graf 3.3b) Graf závislosti průtoku na teplotě

Protože z hlediska zachování procesu kondenzace v kondenzátoru není možné teplotu studené větve chladící vody navyšovat přes hraničních 33 [°C], stane se, že po dosazení hodnot odpovídajících 33 [°C] studené větve do výpočtového vztahu dosahuje hodnota průtoku nekonečna. Z toho vyplývá také jisté omezení rozsahu použitelných teplot, které budou zásadní zejména pro návrhy kondenzátoru, chladící věže a čerpadla.

4. ZÁVĚR

Zadány byly následují úkoly: literární studie současných tlakovodních reaktorů, popis základních inovačních prvků projektu EPR a výpočet jednoho vybraného zařízení. Jednotlivé úkoly jsou v práci vyřešeny v uvedeném pořadí.

V první části práce byl proveden rozbor starších typů tlakovodních jaderných zařízení pro komerční užití, na kterém byly demonstrovány jednotlivé základní prvky a jejich zapojení v celku.

Druhá část byla věnována novému projektu EPR (European Preasurized water Reactors). Z uvedeného je znát značných rozdílů. Novější projekty EPR sebou nesou vylepšení v oblastech měření, účinnosti a zejména bezpečnosti celého jaderného provozu. Mezi zásadní vylepšení v oblasti měření můžeme zařadit tzv. Aeroball systém pro měření a zobrazení 3D modelu neutronového toku. Význačným účinnostním prvkem je tzv. Heavy reflektor – těžký reflektor, který přidává na životnosti zařízení a zlepšuje neutronovou bilanci. Zvýšený faktor bezpečnosti můžeme pozorovat téměř na všech komponentech projektu EPR, zejména pak nejvýraznější prvek bezpečnosti dvouplášťový kontejnment z předepjatého betonu. Další důležitou věcí je fakt, že v projektech EPR dochází ke znatelné úspoře paliva, což způsobuje zejména lepší palivový management a možnost využití paliva MOX. To je další z věcí, která v důsledku zlepšuje faktor využitelnosti při regeneraci paliva.

Z hlediska budoucnosti si projekty EPR vedou velice dobře a patří mezi nejkonkurenceschopnější na trhu. Firma AREVA a její projekt EPR je jedním z účastníků výběrového řízení například pro dostavbu jaderné elektrárny Temelín v ČR, stejně jako další konkurenti.

Třetí část práce řeší výpočet potřebného průtoku chladící vody kondenzátorem. V tomto příkladě je demonstrováno, že průtok nemůže být konstantním. Množství proudící chladící vody je závislé na teplotě, na kterou se je schopna chladící voda vychladit v souvislosti například s ročním obdobím. S tím samozřejmě souvisí parametry dalších zařízení, jako například čerpadla chladící vody.

5. POUŽITÉ ZDROJE

[1] ŠEN, Hugo. Jaderná energetika. Brno, 2009. Matriály přednášek. VUT Brno.

[2] NERUD, Pavel. Porovnání a hodnocení konstrukčních uspořádání reaktorů V-213-č,VVER 440 a V-320-č,VVER 1000. Brno, 2006. 50 s. Diplomová práce. VUT Brno.

[3] Areva. firemní materiály. European pressurized water reactor

[4] Skupina ČEZ [online]. 1999 [cit. 2010-05-12]. Dostupné z WWW: http://www.cez.cz/cs/uvod.html.

[5] AREVA - Solutions for nuclear energy and renewable energies [online]. 1999 [cit. 2010-05-12]. Dostupné z WWW: http://www.areva.com/

6. POUŽITÉ SYMBOLY

VVER	.....	Vodo-Vodjanye Energetičeskyje reaktory
PWR	.....	Pressurized Water Reactors
EPR	.....	European Pressurized water Reactor
PHWR	.....	Pressurized Heavy Water Reactors
RBMK	.....	Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj
CANDU	.....	Canadian Deuterium Uranium
MOX	.....	palivo - směs UO_2 a PuO_2
M5	.....	zirkonová slitina
R	.....	reaktor
KO	.....	kompenzátor
HCČ	.....	hlavní cirkulační čerpadlo
PG	.....	parogenerátor
VTO	.....	vysokotlaké ohříváky
NTO	.....	nízkotlaký ohřívák
NČ	.....	napájecí čerpadlo
NN	.....	napájecí nádrž
K	.....	kondenzátor
VT	.....	vysokotlaká část turbíny
NT	.....	nízkotlaká část turbíny
OV	.....	odlučovač vody
PP	.....	přihřívák páry
KČ	.....	čerpadlo kondenzátu
AZ	.....	aktivní zóna
H_2O	.....	lehká voda
D_2O	.....	těžká voda
Zr	.....	Zirkonium
U238, U235	.....	izotopy Uranu
UO_2	.....	oxid uraničitý
He	.....	Helium
B	.....	Bor
Cd	.....	Kadmium
PuO_2	.....	oxid Plutoničitý
Ag	.....	Stříbro
In	.....	Indium
°C	.....	jednotka teploty
MPa	.....	jednotka tlaku
MWt	.....	jednotka tepelného výkonu
MW	.....	jednotka výkonu
mm	.....	jednotka délky
m3	.....	jednotka objemu
m2	.....	jednotka plochy
t	.....	jednotka hmotnosti
$\dot{m}$	.....	hmotnostní tok
$\dot{V}$	.....	objemový tok
ρ	.....	hustota
kg/s	.....	jednotka hmotnostního toku
kJ/kg	.....	jednotka entalpie

m3/s	.....	jednotka objemového toku
m3/h	.....	jednotka objemového toku
W/cm	.....	jednotka lineárního výkonu
%	.....	jednotka procenta
$\dot{Q}_{III\ out}$	.....	výkon vystupující s chladící vodou z kondenzátoru
$\dot{Q}_{II\ in}$	.....	výkon vstupující do kondenzátoru
$\dot{Q}_{II\ out}$	.....	výkon vystupující z kondenzátoru
$\dot{m}_{II\ in}$	.....	hmotnostní tok vstupující do kondenzátoru
$\dot{m}_{II\ out}$	.....	hmotnostní tok vystupujícího z kondenzátoru
$t_{II\ in}$	.....	teplota vstupující do kondenzátoru
$t_{II\ out}$	.....	teplota vystupující do kondenzátoru
$i'_{II\ out}$	.....	entalpie vody vystupující z kondenzátoru
$i''_{II\ in}$	.....	entalpie páry vstupující do kondenzátoru
$i'_{III\ out}$	.....	entalpie chladící vody kondenzátoru – výstup
$i'_{III\ in}$	.....	entalpie chladící vody kondenzátoru – vstup