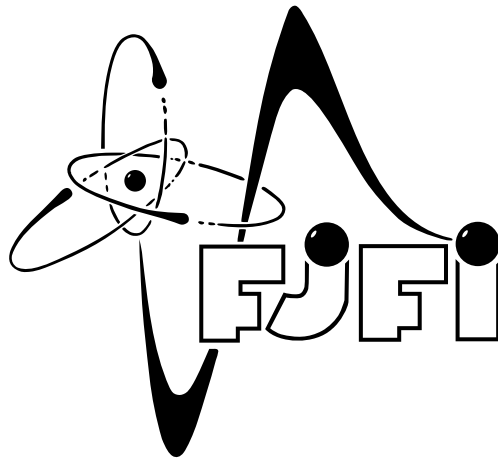


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderných reaktorů

Obor: Jaderné inženýrství



**Ocenění vlivu nového jaderného paliva na průběh
těžké havárie: simulace JE Temelín kódem
ASTEC**

**Impact of a New Fuel Assembly Design on the
Course of a Severe Accident: Simulation of the
Temelín NPP with the ASTEC Code**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Ondřej Brhlík

Vedoucí práce: Ing. Sebastian Nývlt

Konzultant práce: Ing. Miroslav Kotouč, Ph.D.

Rok: 2024



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student:	Ondřej Brhlík
Studijní program:	Aplikace přírodních věd
Obor:	Jaderné inženýrství
Název práce česky:	Ocenění vlivu nového jaderného paliva na průběh těžké havárie: simulace JE Temelín kódem ASTEC
Název práce anglicky:	Impact of a New Fuel Assembly Design on the Course of a Severe Accident: Simulation of the Temelin NPP with the ASTEC Code
Jazyk práce:	čeština

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se se základními charakteristikami reaktoru VVER-1000 (vzor JE Temelín). Zaměřte se zejména na design palivových souborů výrobce TVEL, a to v provedení první generace TVSA-T *mod1* (zavážené od r. 2012) resp. *mod2* (zavážené od r. 2018).
2. Nastudujte základní fenomenologii těžkých havárií (TH) jaderných energetických reaktorů lehkovodního typu, a to především jevy spjaté s degradací aktivní zóny (AZ): růst teploty paliva a ostatních komponent AZ, únik štěpných produktů (ŠP), oxidaci palivového pokrytí, hroucení a stékání (relokaci) částí AZ, tvorbu bazénů taveniny ve dně tlakové nádoby reaktoru (TNR) a porušení integrity TNR vlivem tepelně-mechanického namáhání.
3. Seznamte se s aktuální verzí (V3.0) kódu ASTEC, a to zejména s jeho modulem ICARE (řešícím degradaci AZ a s tím spojené teplosměnné a oxidační procesy) a modulem CESAR (řešícím 2-fázové proudění v TNR a primárním/sekundárním okruhu). Nastudujte architekturu souboru vstupních dat pro kód ASTEC, a to na příkladu předpřipraveného vzorového vstupního modelu pro JE Temelín s palivem TVSA-T *mod1*.
4. Upravte vstupní model tak, aby reflektoval použití paliva ve variantě *mod2* (lišící se vyšším množstvím uranu a vyšším počtem distančních mřížek). Spusťte ověřovací/porovnávací výpočet a vyhodnoťte změny v odezvě jaderného bloku na postulovanou TH. Srovnání proveďte např. na množství vyprodukovaného H₂, čase selhání nosné desky AZ či velikosti úniku některých vybraných radioaktivních prvků do kontejnmentu jaderné elektrárny.

Doporučená literatura:

- [1] Sehgal B. R.: Nuclear Safety in Light Water Reactors, Severe Accident Phenomenology, ELSEVIER, 2012, ISBN: 978-0-12-388446-6
- [2] Jacquemain D. et al.: Nuclear Power Reactor Core Melt Accidents: Current State of Knowledge, EDP sciences – IRSN, 2015, ISBN: 978-2-7598-1835-8
- [3] Chailan L., Laborde L.: Overview of the integral code ASTEC V2.2, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, 2021, IRSN/2021-00298
- [4] Topin V., Carénini L., Coindreau O., Laborde L.: ASTEC ICARE module: user manual, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, 2021, IRSN/2021-00300
- [5] Kotouč M.: Výchozí parametry palivového systému JE Temelín se soubory TVSA-T pro účely analýz těžkých havárií, ÚJV Řež, 2010, Z-3020-T
- [6] Kotouč M.: Vstupní model reaktoru VVER-1000 (ETE) s palivem TVSA-T mod2 pro kód MELCOR 2.2, ÚJV Řež, 2022, Z-5881-T

Jméno a pracoviště vedoucího práce: **Ing. Sebastian Nývlt**
KJR FJFI ČVUT v Praze

Jméno a pracoviště konzultanta práce: **Ing. Miroslav Kotouč, Ph.D.**
ÚJV Řež, a. s.

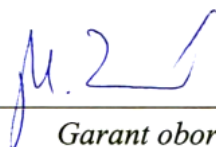
Datum zadání bakalářské práce: 14.10. 2022

Datum odevzdání bakalářské práce: 2.8. 2023

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

V Praze dne 14.10. 2022

doc. Ing. Martin Kropík, CSc.



Garant oboru

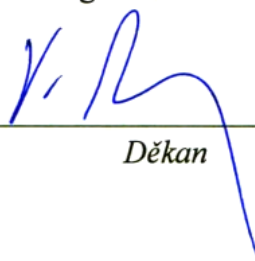
Ing. Jan Rataj, Ph.D.



Vedoucí katedry



doc. Ing. Václav Čuba, Ph.D.




Děkan

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 7.1.2024



Ondřej Brhlík

Poděkování

Chtěl bych poděkovat některým důležitým lidem, bez nichž by tato práce nikdy nevznikla. Prvně bych rád vyjádřil své poděkování mému vedoucímu práce Ing. Sebastianu Nývltovi a konzultantovi Ing. Miroslavu Kotouči, Ph.D. za jejich velkou podporu, ochotu, trpělivost, značné množství věnovaného času a cenné rady. Bez přispění jejich znalostí by tato práce dnes neexistovala.

Dále bych chtěl poděkovat celé svojí rodině za obrovskou podporu během bakalářského studia a při psaní této práce. Moje poděkování také směřuje všem kamarádům, kteří při mně stáli a podporovali mě, a také mému Bohu, neboť všechno dobré a krásné pochází od Něj.

Ondřej Brhlík

Název práce:

Ocenění vlivu nového jaderného paliva na průběh těžké havárie: simulace JE Temelín kódem ASTEC

Autor: Ondřej Brhlík

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Jaderné inženýrství

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Sebastian Nývlt
Katedra jaderných reaktorů
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
České vysoké učení technické v Praze

Konzultant: Ing. Miroslav Kotouč, Ph.D.
ÚJV Řež

Abstrakt: Práce analyzuje vliv přechodu z paliva TVSA-T mod1 na palivo TVSA-T mod2 na průběh těžké havárie. To je provedeno na modelu temelínského jaderného reaktoru typu VVER-1000 s využitím integrálního kódu ASTEC. Práce zahrnuje informace o jaderné elektrárně Temelín včetně popisu jednotlivých okruhů a paliva, dále pak fenomenologii těžkých havárií, strukturu a vlastnosti výpočetního kódu ASTEC. V závěru práce je proveden výpočet hodnotící vliv obou paliv na průběh těžké havárie se ztrátou chladiva, zejména pak na klíčové okamžiky havarijní sekvence a na časový vývoj charakteristických veličin.

Klíčová slova: jaderná elektrárna, VVER-1000, těžká havárie, ASTEC, jaderné palivo

Abstract: The study scrutinizes the influence of transitioning from TVSA-T mod1 fuel to TVSA-T mod2 fuel on the progression of a severe nuclear accident. This is done on a model of Temelín nuclear reactor type VVER-1000 using the integral ASTEC code. The thesis includes information about Temelín nuclear power plant, including a description of individual circuits and fuels, as well as the phenomenology of severe accidents, the structure and characteristics of the ASTEC code. At the end of the thesis, a calculation is performed that evaluates the impact of both fuels on the progression of a loss of coolant accident, mainly on key moments of the severe accidents sequence and the time development of characteristic quantities.

Key words: nuclear power plant, VVER-1000, severe accident, ASTEC, nuclear fuel

Obsah

Seznam použitých zkratek	2
Seznam tabulek	5
Seznam obrázků	6
Úvod	9
1 Charakteristiky reaktoru VVER-1000	10
1.1 Design palivových souborů	11
1.2 Základní zařízení I.O.	15
1.2.1 Reaktor VVER-1000/320	16
1.2.2 Parogenerátor	18
1.2.3 Kompenzátor objemu	18
1.2.4 Hlavní cirkulační čerpadlo	19
1.3 Kontejnment	19
1.4 Základní zařízení II.O.	20
1.4.1 Rozvody ostré páry	20
1.4.2 Rozvody páry vlastní spotřeby	21
1.4.3 Parní turbína	21
1.4.4 Systém kondenzace	22
1.4.5 Nízkotlaká regenerace	22
1.4.6 Systém odplynění kondenzátu	22
1.4.7 Systém napájení parogenerátorů	22
1.4.8 Vysokotlaká regenerace	23
1.4.9 Systém pomocného kondenzátu	23
1.4.10 Systém zásobování JE teplem	23
2 Fenomenologie těžké havárie	24
2.1 Definice TH	25
2.2 Stav JZ a hodnocení jaderných událostí	25
2.3 Termohydraulické jevy před poškozením AZ	29
2.4 Výzkum v oblasti TH	30
2.5 Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti	30

2.6	Přehled nejdůležitějších jevů při TH	31
2.6.1	Oxidace materiálů AZ	32
2.6.2	Ztráta geometrie AZ	34
2.6.3	Ex-vessel fáze	38
3	Integrální kód ASTEC	43
3.1	Modul CESAR	45
3.2	Modul ICARE	46
4	Změna vstupního modelu pro palivo TVSA-T mod2	50
4.1	Nodalizace oblasti TNR pro moduly ICARE a CESAR	51
5	Analýza výsledků havarijního scénáře pro paliva TVSA-T mod1 a TVSA-T mod2	54
5.1	Porovnání výsledků analyzovaného scénáře dle časových vývojů charakteristických veličin	54
5.2	Porovnání výsledků analyzovaného scénáře dle 2D snímků stavu AZ	58
	Závěr	60
	Přílohy	67
A	Grafy dalších významných veličin	I.A
B	2D snímky postupu degradace AZ	I.B

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam zkratky
0D	nula-dimenzionální
1D	jedno-dimenzionální
2D	dvou-dimenzionální
AP	absorpční proutek
AZ	aktivní zóna
BN	barbotážní nádrž
CT	centrální trubka
DBA	základní projektová nehoda (design basic accident)
DEC	rozšířené projektové podmínky (design extension conditions): DEC A – události bez vážného poškození paliva, DEC B – události s vážným poškozením paliva
DiD	ochrana do hloubky (defence in depth)
DM	distanční mřížka
DSK	dolní směšovací komora
ETE	jaderná elektrárna Temelín
HA	hydroakumulátor
HCČ	hlavní cirkulační čerpadlo
I.O.	primární okruh
II.O.	sekundární okruh
III.O.	chladičí okruh
INES	Mezinárodní stupnice jaderných událostí (The International Nuclear Event Scale)

Zkratka	Význam zkratky
IRSN	Institut pro ochranu před radiací a pro nukleární bezpečnost (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire)
IVR	strategie zachování taveniny uvnitř tlakové nádoby reaktoru (in-vessel retention)
JE	jaderná elektrárna
JZ	jaderné zařízení
KO	kompensátor objemu
KTMT	kontejnment
LOCA	havárie se ztrátou chladiva (loss of coolant accident)
MCCI	interakce taveniny s betonem (molten core-concrete interaction)
MDB	materiálová databanka (material data bank)
PG	parní generátor
PIU	postulovaná iniciační událost
PP	palivový proutek
PS	palivový soubor
PSA	pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti (probabilistic safety assessment)
PWR	tlakovodní reaktor (pressurized water reactor)
RaL	radioaktivní látka
RO	regulační orgán
SBO	úplná ztráta vnějších i vnitřních zdrojů střídavého elektrického napájení (station black-out)
SDM	směšovací distanční mřížka
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
ŠR	šachta reaktoru
ŠP	štěpný produkt
ŽP	životní prostředí
IAEA	Mezinárodní agentura pro atomovou energii (International Atomic Energy Agency)
TH	těžká havárie

Zkratka	Význam zkratky
TMI-2	jaderná elektrárna Three Mile Island Unit 2
TNR	tlaková nádoba reaktoru
VT	vodicí trubka
VVER	vodo-vodní energetický reaktor (přeloženo z ruštiny)

Seznam tabulek

2.1	Stavy JZ	25
2.2	Přehled úrovní ochrany do hloubky dle SÚJB	26

Seznam obrázků

1.1	Konstrukce PP a PS pro palivo TVSA-T mod1	12
1.2	RO-klastry	15
1.3	Schéma I.O.	16
1.4	Jaderný reaktor VVER-1000/320	17
2.1	Stupnice INES	28
2.2	Druhy přirozené cirkulace	29
2.3	Rozvoj TH	32
2.4	Poškození paliva při nízkotlaké sekvenci havárie	34
2.5	Poškození paliva při vysokotlaké sekvenci havárie	35
2.6	Znázornění dějů v tavenině při strategii IVR	38
2.7	Protavování betonu korím	40
3.1	Moduly integrálního kódu ASTEC	48
4.1	Diskretizace AZ v modulu ICARE	52
4.2	Rozdělení stěny TNR na 15 axiálních úrovní	52
4.3	Nodalizace oblasti výpočtu pro moduly ICARE/CESAR	53
5.1	Hmotnost vody v TNR	55
5.2	Tlak v I.O. (v KO)	56
5.3	Množství vodíku vzniklého z oxidace struktur AZ	57
A.1	Množství vody ve dvou HA vstřikujících nad AZ	I.A
A.2	Množství Cs uvolněného do KTMT	I.A
A.3	Množství I uvolněného do KTMT	II.A
A.4	Množství pevných trosk a taveniny v oblasti AZ	II.A
B.1	Simulace LOCA: stav AZ v čase 0 s	I.B
B.2	Simulace LOCA: stav AZ v čase 1000 s	I.B
B.3	Simulace LOCA: stav AZ v čase 2000 s	II.B
B.4	Simulace LOCA: stav AZ v čase 3000 s	III.B

B.5	Simulace LOCA: stav AZ v čase 4000 s	III.B
B.6	Simulace LOCA: stav AZ v čase 5000 s	IV.B
B.7	Simulace LOCA: stav AZ v čase 6000 s	IV.B
B.8	Simulace LOCA: stav AZ v čase 7000 s	V.B
B.9	Simulace LOCA: stav AZ v čase selhání TNR pro TVSA-T mod1 . .	V.B
B.10	Simulace LOCA: stav AZ v čase selhání TNR pro TVSA-T mod2 .	VI.B

Úvod

Jaderné elektrárny mají v energetickém mixu stále své významné zastoupení. Kvůli jeho udržení je však patrný trend růstu požadavků na jadernou bezpečnost a s tím i na porozumění fyzikální podstaty jednotlivých jevů při těžkých haváriích. Tyto události mají sice nízkou pravděpodobnost výskytu, avšak havárie druhu Three Mile Island, Černobyl nebo Fukušima dodnes rezonují společností. Pokud tedy chceme těmto událostem předcházet, je nutné jim prvně porozumět. Experimenty v této oblasti jsou značně omezeny pro svoji náročnost na bezpečnost a nákladnost. Množství informativních dat je tedy značně omezeno, a to platí i pro data z již nastalých těžkých havárií. Z tohoto důvodu jsou pro zkoumání těžkých havárií včetně jejich průběhů a následků stěžejní simulační výpočetní kódy. Jedním z nich je i integrální kód ASTEC vyvinutý francouzskou společností IRSN. Tento výpočetní kód simuluje celou sekvenci těžké havárie od vzniku iniciační události až po únik radioaktivních látek do okolí.

Tématem této práce je ocenění vlivu paliva TVSA-T mod2 na průběh těžké havárie se ztrátou chladiva ve srovnání s palivem TVSA-T mod1. Konkrétně byla uvažována netěsnost na studené větvi 4. cirkulační smyčky o ekvivalentním průměru 200 mm, současně za úplné ztráty vnějších a vnitřních zdrojů střídavého elektrického napětí. To způsobí neúčinnost všech aktivních komponent a možnost využívat pouze ty pasivní. To vše je simulováno pro temelínský jaderný reaktor VVER-1000/320.

Úkolem této práce bylo přepracovat vstupní model pro palivo TVSA-T mod1 na vstupní model pro palivo TVSA-T mod2 a porovnat, jak se projeví rozdíly mezi těmito dvěma palivy v průběhu a výsledcích postulovaného scénáře těžké havárie.

Kapitola 1

Charakteristiky reaktoru VVER-1000

Jaderná elektrárna Temelín (ETE) vyrábí elektrickou energii ve dvou blocích s tlakovodním reaktorem typu VVER-1000 s instalovaným výkonem 1125 MWe. Ten má aktivní zónu (AZ) složenou z palivových souborů (PS) obsahujících palivové proutky (PP) a z regulačních orgánů (RO), tzv. klastrů. Štěpným materiálem je směs izotopů ^{238}U a ^{235}U , jehož horní hranice obohacení je 5 %. Palivo je používáno ve formě UO_2 . Součástí většiny temelínských PS je i vyhořívající absorbátor Gd_2O_3 (obvykle jen několik PP vybraných v rámci jednoho PS). Celá jaderná elektrárna (JE) se pak skládá ze tří okruhů:

1. Primárního okruhu (I.O.), jehož součástí je samotný jaderný reaktor. I.O. je soustředěn v kontejnmentu (KTMT) a jeho součástí je taktéž i kompenzátor objemu (KO) a hlavní cirkulační čerpadla (HCČ). Voda, která se ohřívá průchodem přes reaktor, následně ohřívá vodu sekundárního okruhu v parogenerátoru (PG).
2. Sekundárního okruhu (II.O.), ve kterém pára vzniklá v PG pohání turbínu. Roztáčená turbína pohání generátor, kde se mechanická energie mění na elektrickou. Po průchodu turbínou je pára svedena do kondenzátoru, kde zkondenzuje na vodu. Ta potom slouží k opětovnému napájení PG.
3. Terciárního okruhu (III.O.), ve kterém se voda ohřívá v kondenzátoru ochlazuje proudícím vzduchem. Tak tomu je v případě temelínské JE, ale obecně lze použít odvod tepla i do moře nebo jezera.

1.1 Design palivových souborů¹

V době vzniku této práce se JE Temelín připravuje na přechod od ruského paliva dodávaného společností TVEL na palivo od americké společnosti Westinghouse a francouzské společnosti Framatome. Ovšem zatím je nadále plně využíváno ruské palivo typu TVSA-T, které se od roku 2018 zaváží v modifikaci mod2. To postupně nahradilo používané soubory paliva v modifikaci mod1, jejichž schéma je vyobrazeno na Obr. 1.1.

Palivo TVSA-T se obecně ve všech modifikacích skládá z:

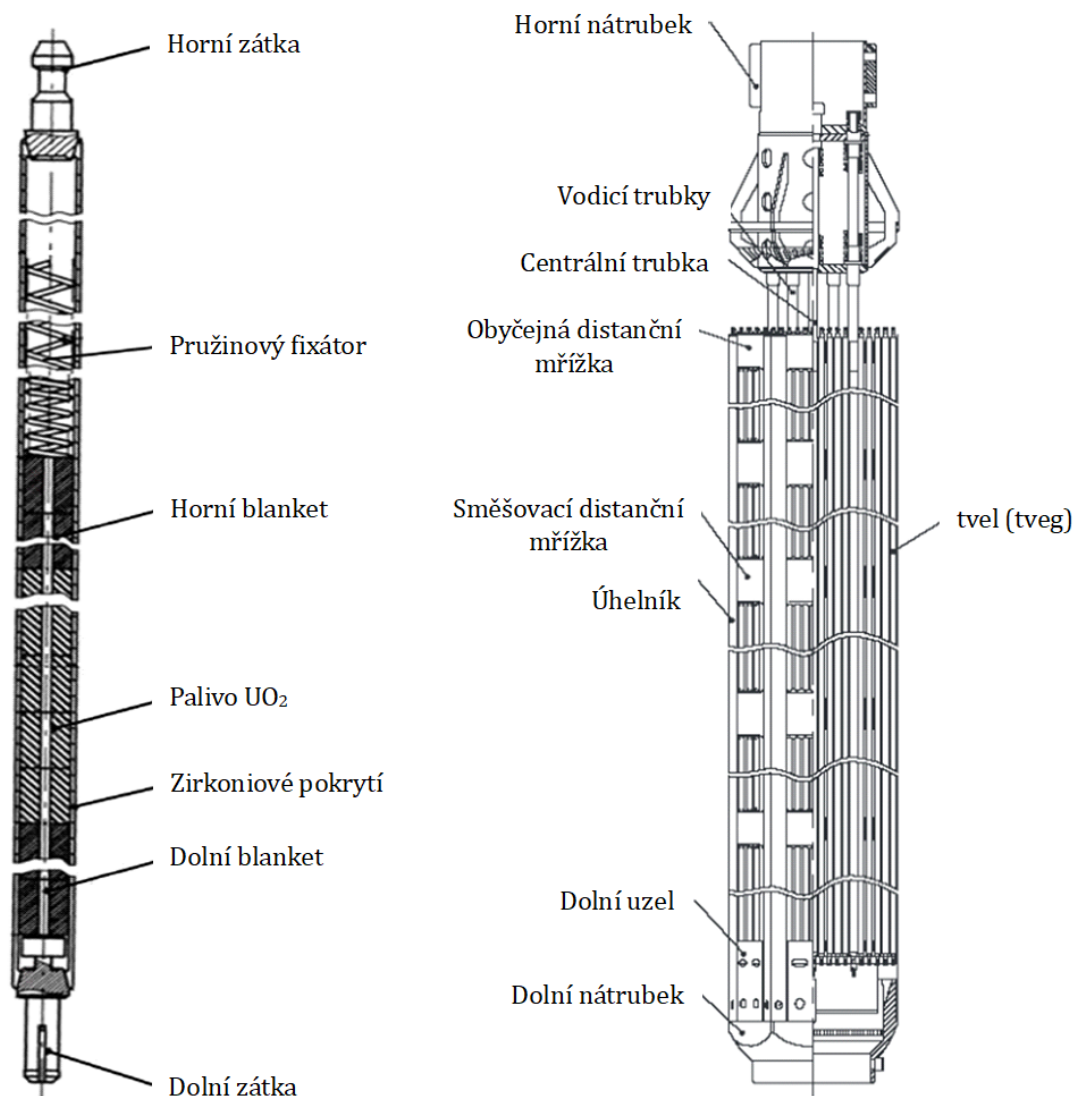
- nosného skeletu
- patice (koncovky)
- hlavice (dolního a horního nátrubku)
- svazku PP

Nosný skelet slouží k zajištění geometrické stability a celistvosti PS. Pro palivo TVSA-T mod1² je skládá z:

- 2 obyčejných distančních mřížek (DM)
- 6 směšovacích distančních mřížek (SDM)
- 18 vodicích trubek (VT)
- centrální trubky (CT)
- dolního opěrného uzlu
- 6 úhelníků
- 12 omezovacích objímek

¹V celé kapitole byly využity informace z interního textu skupiny ČEZ pro přípravu personálu JE [24] a technických zpráv firmy ÚJV [11, 19].

²Od této chvíle se bude v rámci této kapitoly uvádět popis výhradně pro palivo TVSA-T mod1. Rozdíly mezi ním a palivem TVSAT-T mod2 jsou detailně popsány v kapitole 4.



Obr. 1.1: Konstrukce PP (vlevo) a PS (vpravo) pro palivo TVSA-T mod1, upraveno z [11]

Součástí PS je více druhů DM. Obyčejná DM je nejvýše a nejnižše položenou DM v rámci PS. Tyto DM slouží k fixaci PP v radiálním směru. Pro dolní DM je vzhledem k horní DM rozdíl v absenci 19 objímek, které zvyšují ohybovou tuhost horní části PS. SDM, které na rozdíl od obyčejných DM mají jiné geometrické parametry, zajišťují správnou rozteč všech PP a současně i promíchávání vody díky mixážním křidélkům, které v ní indukují turbulenci pro lepší odvod tepla. Za jeden z druhů DM lze považovat i antivibrační DM, která je součástí dolního opěrného uzlu. Všechny

DM jsou vyrobeny ze slitiny zirkonia (E110) kvůli minimalizaci parazitní absorpce neutronů.

CT vytváří v PS kanál pro umístění detektorů neutronového toku. VT zase vytváří kanály pro RO nebo proutky s neutronovými zdroji a prochází skrze DM (na rozdíl od CT s drobnou vůlí), aby se zabránilo axiálnímu namáhání. Oba zmíněné druhy trubek jsou opět vyrobeny ze slitiny zirkonia. Na VT jsou pod a nad nejspodnější DM umístěny omezovací objímky.

Dolní nátrubek plní funkci fixace PS ve spodní opěrné desce šachty reaktoru (ŠR) a přívodu vody do PS. Jeho tvar se odspodu mění z válcového přes sférický až na konečný hexagonální. Ve spodní válcové části se nachází fixační kolík, který slouží k zajištění úhlové orientace a fixaci polohy PS při jeho zavezení do opěry umístěné v ŠR. Celkem 3 žebra (dvě paralelní a jedno na ně kolmé) zajišťují tuhost nátrubku. Pro zachyt případných nečistot z I.O. a ochranu PS proti poškození z uvolněných trosek je součástí dolního nátrubku i ochranný filtr, tzv. anti-debris mřížka. Na dolní nátrubek je přišroubováno 6 úhelníků. Každý z nich obepíná tři PP. Materiálem dolního nátrubku je korozivzdorná ocel, zatímco úhelníky jsou vyrobeny ze slitiny zirkonia.

Horní nátrubek zajišťuje především spojení PS s dolní deskou bloku ochranných trub pomocí pružin, axiální fixaci PS v AZ, stabilizaci výtoku vody, ochranu koncovek PP, kompenzaci dilatace VT a tlumení rázu při pádu RO do reaktoru. Horní nátrubek je tvořen válcovým pláštěm, distančním skeletem, blokem pružin a spojovacími prvky. Horní válcová část slouží jako styčná plocha hlavice pro zavážecí stroj. Celý horní nátrubek je vyroben z korozivzdorné oceli a k nosné konstrukci PS je připevněn rozebíratelným spojem.

Ke generování tepelného výkonu se využívá svazek celkem 312 PP. Ty jsou buď typu *tveg* (PP obsahující gadoliniový vyhořívající absorbátor) a nebo typu *tvel* (PP bez gadoliniového vyhořívajícího absorbátoru), které jsou pravidelně rozmístěny v trojúhelníkové mříži. Pro každý PS lze měnit následující charakteristiky:

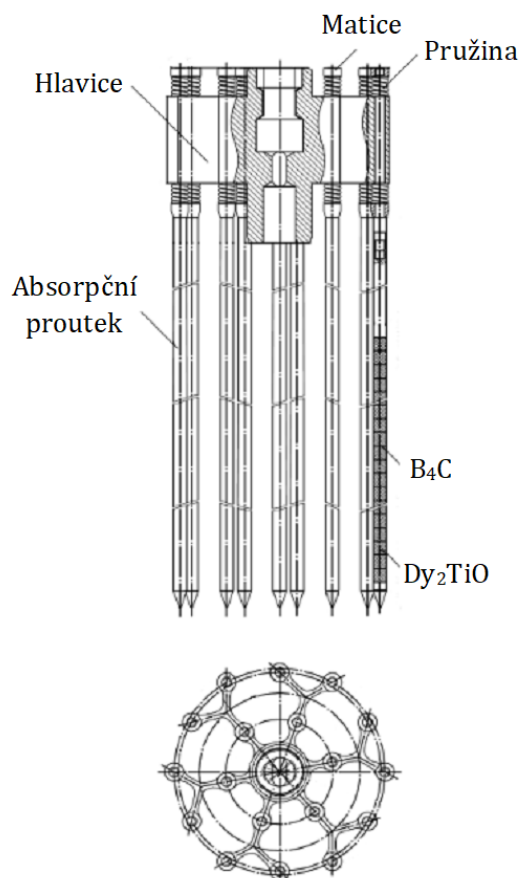
- míru obohacení izotopem ^{235}U v jednotlivých PP
- množství vyhořívajícího absorbátoru Gd_2O_3 v PP *tveg*
- kombinaci PP *tveg* a *tvel* s různým obohacením ^{235}U v rámci jednoho PS
- počet a lokaci PP *tveg* v rámci jednoho PS

PP uvedený na Obr. 1.1 se skládá z horní a dolní zátky, vnějšího zirkoniového pokrytí, palivových tabletek a fixátoru (vnitřní pružiny). Vnitřek PP je vyplněn plnicím plynem – heliem. To způsobí vnitřní přetlak, který za provozu pomáhá lepšímu odolávání vnějšímu tlaku v AZ. Z důvodu kompenzace nárůstu tlaku způsobeného nahromaděním štěpných produktů (ŠP) se v horní části PP nachází volný objem. Jako první a poslední tabletky je použit tzv. blanket, což je tabletky vyrobená z přírodního uranu.

Uvnitř AZ se do vodicích kanálů vybraných PS zasouvají RO, které slouží k regulaci výkonu reaktoru. Pomocí RO se též kompenzuje reaktivita vyvolaná změnami tepelného výkonu a změnami teploty chladiva. Dále slouží ke kompenzaci otravy xenonem nebo zajišťují přechod reaktoru ze stavu s maximálním dovoleným výkonem do horkého odstaveného stavu a udržují podkritičnost reaktoru v odstaveném stavu spolu s kyselinou boritou. Ta slouží pro pomalé změny reaktivity. Pohyb RO svisle podél osy reaktoru zajišťují lineární krokové pohony. Systém RO obsahuje 61 totožných RO a je rozdělen do 10 skupin. 1.–8. a 10. skupina obsahují 6 RO. Skupina 9 obsahuje 7 RO, kde centrální RO této skupiny je umístěn v ose reaktoru. Funkce jednotlivých skupin je v AZ následující:

- 1.–6. skupina plní odstavnou funkci, tedy při havarijním odstavení padají RO volným pádem do AZ.
- 7.–10. skupina plní regulační funkci. Ovšem při havarijním odstavení reaktoru padají taktéž do AZ. Celková doba pádu RO při havarijním odstavení reaktoru nesmí překročit 4 s.

Uspořádání svazku absorpčních tyčí je patrné z Obr. 1.2. Hvězdicová sestava je tvořena konzolovými žebry, v nichž je vytvořeno celkem 18 otvorů pro umístění absorpčních proutků (AP). K připevnění centrální objímky sestavy na závěsnou tyč RO dochází pomocí závitů. Úhlovému natočení brání jisticí kolík. Na každém AP jsou umístěny vinuté pružiny, které tlumí ráz na horní nátrubek při pádu klastrů do AZ. Na každém AP je z důvodu jeho fixace našroubována matice. Jejím nedovolenému povolení brání pojistný svar. Absorpčním materiálem je ve většině AP karbid bóru, v dolní části AP se pak nachází titaničitan dysprositý. Tento konec RO je trvale zasunut v AZ. Volba koncovky z titaničitanu dysprositého je kvůli tomu, že při ozařování karbidu bóru v AZ dochází k jeho poškozování, a taky má menší absorpci neutronů (nejedná o tzv. černý absorbér). Oba tyto absorpční materiály jsou hermeticky uzavřeny v obálce z chromniklové slitiny.



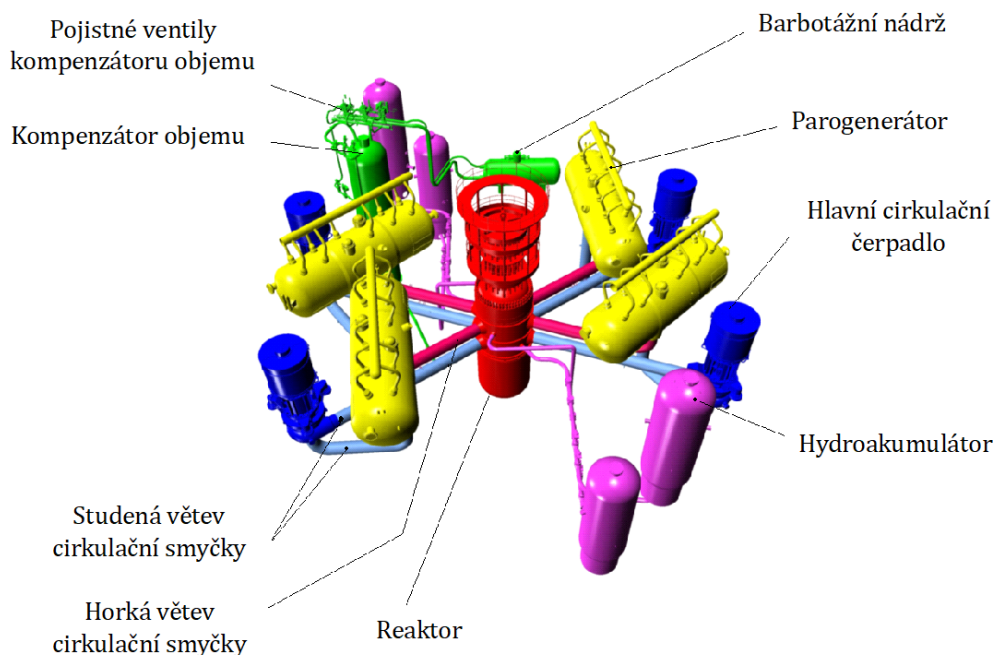
Obr. 1.2: RO-klastry, upraveno z [11]

1.2 Základní zařízení I.O.³

Řízená štěpná reakce produkuje v AZ značné množství tepla, které je nutné odvádět pryč. Pro tlakovodní reaktory, kterým je i reaktor VVER-1000 v Temelíně, je chladicím médiem voda. Ta zároveň slouží jako moderátor – tedy ke zpomalování neutronů do tepelné oblasti. Do vody se přidává i kyselina boritá (kvůli kompenzaci pomalých změn reaktivity a udržení podkritického stavu při odstávce), hydroxid draselný (kvůli udržení optimálního pH) nebo hydrazin (pro udržení bezkyslíkového režimu). Toto chladivo je pak pomocí HCČ přiváděno při teplotě 290 °C do reaktoru. Ven z AZ vychází chladivo o teplotě zhruba o 30 °C vyšší. Běžný pracovní tlak je 15,7 MPa. Ohřáté chladivo následně přenáší přes teplosměnnou pracovní plochu

³V celé kapitole byly využity informace z interních textů skupiny ČEZ pro přípravu personálu JE [25, 26].

v PG teplo do vody II.O. Úsek, kdy chladivo proudí z AZ do PG, označujeme za tzv. *horkou větev*. Úsek, kdy chladivo jde z PG přes HCČ do reaktoru, označujeme za tzv. *studenou větev*. Dohromady pak tvoří tzv. *cirkulační smyčku* I.O. temelínského reaktoru. Ten je utvořen celkem čtyřmi cirkulačními smyčkami. Součástí I.O. jsou zařízení vyobrazená na Obr. 1.3.

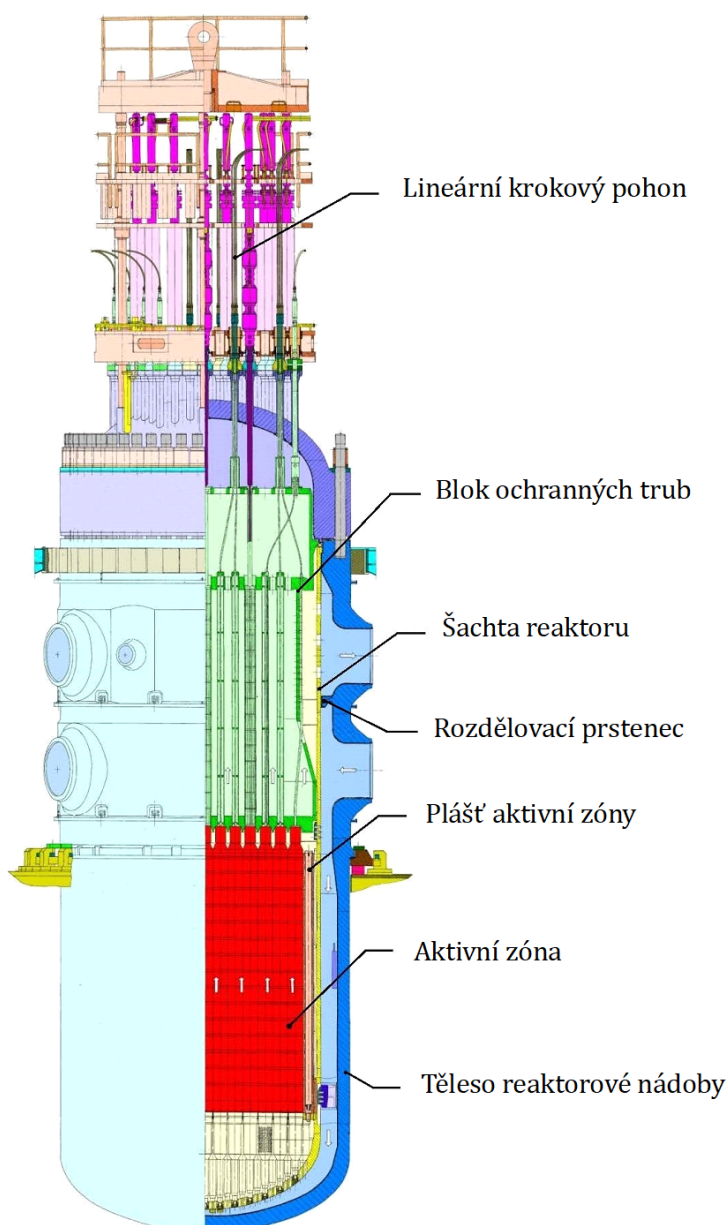


Obr. 1.3: Schéma I.O., upraveno z [26]

1.2.1 Reaktor VVER-1000/320

Reaktor je hlavní zařízení, na němž stojí celá funkce i životnost JE. Reaktor VVER-1000/320, znázorněný na Obr. 1.4, je sériově vyráběným typem. Jeho základní strukturální částí je těleso tlakové nádoby reaktoru (TNR) vyrobené z vysokojakostní uhlíkové oceli, která je na vnitřním povrchu opatřena nerezovým návarem. Uvnitř TNR je usazena ŠR. Ta zajišťuje přívod chladiva I.O. pod AZ. Na vnitřní straně dna ŠR jsou umístěny podpěry PS. Díky tomu, že je ŠR lokalizována mezi AZ a TNR, slouží taktéž jako tepelný a radiační štít. Stejnou roli zastává i plášť AZ. Ten vymezuje prostor mezi ŠR a AZ a je na své pozici pevně zafixován. V horní části ŠR se nachází otvor pro průtok chladiva do výstupního hrdla TNR. To je od vstupního hrdla odděleno rozdělovacím prstencem. Nad AZ je v ŠR umístěn blok ochranných trub. Ten shora zajišťuje správnou pozici PS a vytváří ochranné prostory pro klastry vytažené z AZ a vývody z měřičů provozních parametrů (hustota

neutronového toku, teplota chladiva na výstupu z AZ atd.). Všechny vnitřní vestavby reaktoru jsou vystaveny agresivnímu korozivnímu prostředí kyseliny borité, a proto jsou stejně jako TNR opatřeny návarem z korozivzdorné oceli. Analogicky je tímto korozivzdorným materiálem ošetřeno i víko reaktoru, které je součástí tzv. horního bloku reaktoru. Skrze něj jsou až na reaktorový sál vyvedena měření vystupující z AZ a jsou v něm taktéž umístěny lineární krokové pohony. S jejich pomocí se provádí manipulace s klastry.



Obr. 1.4: Jaderný reaktor VVER-1000/320, upraveno z [26]

1.2.2 Parogenerátor

Teplo vyvinuté a odvedené chladičem z AZ se přivádí skrze hlavní cirkulační potrubí do PG. Ten je pro případ východní koncepce horizontálně umístěný rekuperační tepelný výměník, kde ohřáté chladivo proudí do trubiček teplosměnné plochy PG. Těch je vetknuto 11 000, mají tvar písmene U a propojují horký kolektor (ukončuje horkou větev) s kolektorem studeným (začíná studenou větev). Přes stěnu trubiček se předává teplo napájecí vodě, ta vře a vzniká mokrá pára. Možnost varu je dána rozdílným tlakem I.O. a II.O. Vzniklá pára s sebou odnáší i drobné kapičky vody, které je nutné od páry oddělit. K tomuto účelu slouží tzv. *separátor vlhkosti*. Napájecí vodu dodává do PG po předchozím nahřátí turbonapáječka nebo pomocná napájecí čerpadla. Z důvodu značného tepelného i mechanického namáhání hrozí vznik netěsností v trubičkách PG a kontaminace vody II.O. V tomto případě pak dochází k zaslepení trubičky. Při tvorbě syté páry z napájecí vody dochází k odpaření pouze čistého H_2O . Nečistoty ve formě rozpuštěných a vysrážených solí zůstávají v PG. Pro jejich odvod slouží tzv. *systém odluhu a odkalu PG*. Ten odebírá část napájecí vody z PG a přivádí ji do čisticí stanice, odkud se voda vrací zpět do II.O.

1.2.3 Kompenzátor objemu

Při zahřívání vody v uzavřeném prostoru dochází ke zvětšení jejího objemu a tlaku. Pro vyrovnání těchto fyzikálních procesů v I.O. využíváme KO. V něm máme chladivo I.O. ohřáté k bodu varu pomocí elektroohříváků s tím, že jeho hladina sahá cca do 2/3 KO a zbytek je vyplněn parním polštářem. Je-li v I.O. přetlak oproti nominální hodnotě, pak je jeho snížení nutné kvůli zajištění stability a hermetičnosti celého I.O., který je dimenzován na jistou maximální přípustnou tlakovou hodnotu. Požadovaného snížení tlaku se dosáhne pomocí kondenzace části parního polštáře (s použitím sprchového systému), která zmenšuje jeho objem, a dochází tedy také ke snížení tlaku. Naopak expanzí parního polštáře (výrobou další páry za pomoci elektroohříváků) se zvyšuje tlak v I.O. To je nutné v případě, kdy v I.O. je tlak nižší oproti nominální hodnotě a hrozí var chladiva. Jelikož celý I.O. tvoří jeden celek se stejným tlakem, KO je připojen pouze k jedné ze smyček.

Pro případ, kdy není již samotný KO schopen vyrovnání nárůstu tlaku v I.O., je ke KO připojeno také pojistné zařízení. To obsahuje tři ventily s odstupňovaným zafungováním úměrným zvýšení tlaku v I.O. První na změnu tlaku reaguje tzv. od-

lehčovací ventil, který po dosažení určitého tlaku a aktivaci jeho řídicího ventilu upustí část páry z KO. To způsobí pokles tlaku v I.O. Pro případ selhání otevírání pojišťovacího ventilu, přichází na řadu první pojistný ventil a pro případ dalšího růstu tlaku v I.O. i druhý pojistný ventil. Pojistné ventily jsou nastaveny pružinou na otevření při dosažení daného tlaku a jsou tedy nezávislé na přívodu elektrické energie. Vypuštěná pára je kvůli své radioaktivitě odváděna do barbotážní nádrže (BN). Pro případ nárůstu tlaku v BN přes povolenou mez dojde k porušení pojistné membrány a uvolnění páry do prostoru KTMT.

1.2.4 Hlavní cirkulační čerpadlo

Teplotní rozdíl mezi teplou a studenou větví I.O. je cca 30 °C. Tato nedostatečná teplotní odlišnost vylučuje vznik významnější přirozené cirkulace schopné odvádět generované teplo. Nucenou cirkulaci mezi AZ a PG zajišťují HCČ. Pro temelínský reaktor je každá cirkulační smyčka osazena jedním HCČ. To je konstrukčně řešeno jako jednostupňové, svislé, odstředivé čerpadlo, kde je oběžné kolo umístěno na svislé hřídeli. Těsnost HCČ zajišťuje zahlcená mechanická ucpávka – součástka, do které je přivedena těsnicí kapalina. HCČ funguje tak, že chladivo je vháněno odstředivou silou (vznikající rotací oběžného kola) dále do výtlačného potrubí. Pro funkci čerpadel slouží elektromotory o příkonu více než 5 MW. Tato energie se kromě běžného provozu využívá i při odstávce reaktoru, kdy je I.O. o pokojové teplotě ohříván na provozní teplotu. Samotný ohřev funguje na principu vnitřního tření kapaliny, tření kapaliny o technologii a ohřevu od samotného zahřátého čerpadla. Součástí HCČ jsou i další různá pomocná zařízení, která se starají o promazávání zařízení a systém oplachu ucpávky.

1.3 Kontejnment

KTMT plní ochrannou funkci pro I.O. a jeho zařízení před vnějšími vlivy (např. proti pádu letadla apod.) a současně tvoří poslední fyzickou bariéru proti úniku ŠP do životního prostředí (ŽP) při těžké havárii (TH) (více viz kapitola 2.2). KTMT je projektován na tzv. maximální projektovou havárii, což je pro ETE tzv. velká LOCA (loss of coolant accident) – více viz kapitola 5.

Temelínské reaktory chrání KTMT v podobě plnotlaké jednoduché ochranné obálky tvořené z betonového pláště. Ten je předepjatý pomocí lan a obsahuje vrstvu

oceli, která zajišťuje hermetičnost vnitřního prostoru KTMT. Celý KTMT musí ustát přetlak vzniklý při maximální projektové nehodě. Za běžného provozu je v KTMT naopak udržován podtlak z důvodu udržení případné kontaminace uvnitř KTMT.

1.4 Základní zařízení II.O.⁴

Hlavní funkcí II.O. je zajištění vysoké účinnosti přeměny tepelné energie získané ze štěpení jaderného paliva a předané do II.O. parogenerátory na energii mechanickou a dále na energii elektrickou pomocí turbosoustrojí (tj. parní turbíny a turboalternátoru). Z PG vychází mokrá pára, která se po separaci vlhkosti stává sytou párou a je vedena na vysokotlaký díl turbíny. Zde dochází k částečnému předání energie páry (cca 40 %) turbíně, v jejímž důsledku část páry zkondenzuje. Za vysokotlakým dílem turbíny tedy opětovně dochází k separaci vlhkosti a taktéž k přehřívání páry nad mez sytosti, po níž se přivádí pára do jednotlivých těles nízkotlakých dílů turbíny. Přehřívání provádí pára odebraná z vysokotlakého dílu turbíny. Z nízkotlakého dílu turbíny vychází mokrá pára ke kondenzaci. Každé ze tří těles, ze kterého je nízkotlaký díl turbíny tvořen, má napojení na vlastní kondenzátor. V každém z nich se zbytková tepelná energie předává vodě II.O. a kondenzát je pomocí kondenzačních čerpadel odveden přes nízkotlakou regeneraci do napájecí nádrže. Pro ETE existuje možnost nevyužít veškerou páru z PG pro expanzi na turbíně a využít ji jako tepelný zdroj dodávaný do blízkého okolí. Díky tomu se zvyšuje termická účinnost JE. Základní zařízení II.O. jsou následující:

1.4.1 Rozvody ostré páry

Rozvody páry obecně zajišťují dopravu páry z PG do turbíny a dále pak i rozvod páry pro vlastní spotřebu. Za běžného provozu proudí ostrá pára celkem čtyřmi parovody ze čtyř PG. Z každého parovodu vychází odbočka, která se spojuje do sdíleného hlavního parního kolektoru. Tyto odbočky nabývají funkčnosti pouze při najíždění či odstavování bloku. Po cestě k turbíně projde ostrá pára prvně přes vysokotlaké odlučovače (ty za pomoci působící odstředivé síly při náhle změně směru odstraní z ostré páry část kondenzátu). Pak jde již ostrá pára na vysokotlaký díl

⁴V celé kapitole byly využity informace z interních textů skupiny ČEZ pro přípravu personálu JE [27, 28, 29].

turbíny, odkud se odebere její část pro následné přehřívání. Páru je možné pomocí tzv. bypassu turbíny odvádět mimo turbínu přímo do kondenzátoru.

1.4.2 Rozvody páry vlastní spotřeby

Rozvody páry vlastní spotřeby jsou subsystemy rozvodu tepla elektrárny, mezi něž patří i rozvod technologické páry. Funkcí tohoto systému je mimo jiné umožnění horkých zkoušek zařízení jednotlivých bloků, jejich přípravu pro najíždění a následně samotné najíždění bloků. Po spuštění bloku a jeho uvedení na výkon přebere tuto roli zdroj tepla.

1.4.3 Parní turbína

Parní turbína je základní součástí turbosoustrojí sloužícího k přeměně tepelné a tlakové energie páry na energii mechanickou. Ta je následně využita k pohonu generátoru. Pro případ temelínské parní turbíny vstupuje ostrá pára do jejího středu a expandující pára následně proudí ke dvěma koncům. Temelínská parní turbína se skládá z vysokotlakého dílu a nízkotlakého dílu tvořeného třemi tělesy.

Pára nejprve proudí skrz rychlozávěrný ventil, který plní bezpečnostní roli. Dále pak jde skrze regulační ventil, který reguluje množství páry vstupující do turbíny – tedy její výkon. Expanzí na vysokotlakém díle turbíny dochází k odběru cca 40 % celkově využitelné energie. Část páry je z výstupu vysokotlakého dílu turbíny odvedena pro následnou regeneraci kapaliny v nízkotlakém ohříváku. Na tři tělesa nízkotlakého dílu turbíny vstupuje pára po průchodu separátory-mezipřehřívací. Výstupní hrdlo nízkotlakého dílu turbíny je připojeno na kondenzátor.

Turbosoustrojí je značně komplikované zařízení vyžadující podporu pomocných systémů. Mezi nejvýznamnější z nich patří např. systém mazacího oleje (zajišťující promazávání ložisek turbosoustrojí), elektrohydraulický regulační a zabezpečovací systém (sloužící k regulaci otáček a nouzovému odstavení turbíny) nebo systém ucpávkové páry (zabezpečující těsnicí funkci vzhledem k vnějšímu okolí). Celé turbosoustrojí je možné odstavit plánovaně (postupným snižováním výkonu) nebo poruchově (při překročení provozních parametrů). V tomto případě se přebytečná pára začíná bypassem přepouštět do kondenzátorů. Při snížení otáček na 26 ot/min se turbosoustrojí připojí na otáčecí zařízení. Protáčení rotoru se provádí, dokud teplota vysokotlakého dílu turbíny neklesne pod 100 °C.

1.4.4 Systém kondenzace

Systém kondenzace zajišťuje odvod tepla z páry vystupující z nízkotlakého dílu turbíny. V celkem třech kondenzátorech (na každé těleso nízkotlakého dílu turbíny připadá vlastní kondenzátor) se teplo z páry předává do chladicí vody III.O. přes teplosměnné plochy kondenzátoru. Na výstupu z kondenzátoru je teplota chladicí vody cca 33 °C. Tato ohřátá voda následně putuje do vratného kolektoru, odkud následně proudí do chladicích věží JE. Ochlazený kondenzát je dopravován pomocí kondenzačních čerpadel do systému odplynění.

V kondenzátoru je permanentně udržován nízký tlak, aby docházelo ke zvětšení využitelného tepelného spádu, a tedy ke zvýšení tepelné účinnosti systému. Nízký tlak se za provozu vytváří kondenzací páry (přeměna většího parního objemu na menší vodní objem) a k jeho udržování slouží systém vodoproudých vývěv, který odsává parovzdušnou směs z kondenzátoru.

1.4.5 Nízkotlaká regenerace

Zařízení nízkotlaké regenerace slouží k postupnému ohřevu kondenzátu před jeho vstupem do systému odplyňování. Potřebné teplo kondenzátu dodává odběrová pára z turbíny. Nízkotlaká regenerace je řešena jako třívětвовá, kde každá z větví je tvořena čtyřmi horizontálními nízkotlakými ohříváči. Kondenzát protéká při běžném provozu skrze všechny tři větve.

1.4.6 Systém odplynění kondenzátu

Úkolem tohoto systému je snížit obsah kyslíku, oxidu uhličitého a dalších plynů v kondenzátu. Systém odplynění kondenzátu se skládá celkem ze 4 termických odplyňovačů. Poté je kondenzát shromažďován v napájecí nádrži. Z té se následně kondenzát vrací do II.O.

1.4.7 Systém napájení parogenerátorů

Tento systém zajišťuje napájení PG ve všech režimech provozu bloku. Kondenzát z nádrže je pomocí čerpadel dopravován do PG. Počet a druh použitých napájecích čerpadel závisí na okamžitém tepelném výkonu bloku, jehož výkon ovlivňuje parní

výkon PG. Při najíždění bloku JE je voda do PG dopravována dvěma pomocnými napájecími čerpadly. V případě zvyšování výkonu se využívá již turbonapájecí soustrojí.

1.4.8 Vysokotlaká regenerace

Je použita kvůli dosažení vyšší tepelné účinnosti oběhu II.O. Ve vysokotlakém tepelném výměníku se ohřívá voda před vstupem do PG za pomoci páry odebrané z neregulovaného odběru parní turbíny a s využitím zbytkového tepla kondenzátu z topné páry, který je přiváděn ze separátorů-mezipřihříváčů.

1.4.9 Systém pomocného kondenzátu

Tento systém plní funkci odvodu tepelné energie z I.O., a to v případech, kdy je zapotřebí snižovat teplotu I.O. nebo ji stabilizovat na dané úrovni. To je např. při najíždění bloku nebo naopak při odstavování bloku. Tento režim je na primární i sekundární straně PG charakterizován provozními parametry blízkými nominálními hodnotám, kdy je reaktor odstaven a je z něho odváděn zbytkový výkon.

1.4.10 Systém zásobování JE teplem

Systém zásobování JE teplem je komplexní celek, starající se o výrobu a rozvod tepla v jakémkoli provozním režimu jednotlivých bloků. Celkem má JE k dispozici tři zdroje tepla:

- 1x pomocnou plynovou kotelnu
- 2x výměňkové blokové stanice

Systém slouží pro tvorbu páry za účelem najíždění jednotlivých bloků do provozu, rozvodu tepla určeného technologickým systémům, ohřevu užitkové vody apod.

Kapitola 2

Fenomenologie těžké havárie

Jakákoliv havárie je obecně stav, který je nechtěný a může způsobit škody na zdraví či na majetku. Případná velikost těchto škod v rámci jaderného sektoru je důvodem, proč je v této oblasti značná snaha, aby havarijní situace vůbec nenastaly nebo byl jejich průběh pod kontrolou. Je tedy nutné dodržovat vysoké standardy tzv. jaderné bezpečnosti. Ta je definována v §4 bodu (2) atomového zákona jako „stav a schopnost jaderného zařízení (JZ) a osob obsluhujících jaderné zařízení, zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce, nedovolenému úniku radioaktivních látek (RaL) nebo ionizujícího záření do ŽP a omezovat následky nehod.“ [23] Ovšem i přes veškerou snahu o vysoké standardy je s nízkou pravděpodobností možné, že nastane havárie spadající do kategorie DEC (design extension conditions) – tedy incident, při kterém dojde k porušení nebo překročení projektových kritérií. Přehled možných stavů jaderného zařízení je ukázán v Tab. 2.1. Systémy JE jsou bezpečnostně designovány na DBA (design basis accident) událost – tedy na limitní nehodu. Kategorie DEC A představuje incident s vážnějšími důsledky než DBA s danou pravděpodobností výskytu, DEC B vážné poškození AZ s velmi malou pravděpodobností výskytu. [18]

Stavy jaderného zařízení (dle projektu)					Prakticky vyloučené skutečnosti (podmínky, stavy, události)
Provozní stavy		Havarijní podmínky			
Normální provoz	Abnormální provoz	Základní projektové nehody (DBA)	Rozšířené projektové podmínky (DEC)		
			Události bez vážného poškození paliva (DEC A)	Těžké havárie (události s vážným poškozením paliva) (DEC B)	

Tab. 2.1: Stavy JZ, upraveno z [18]

2.1 Definice TH

TH lze chápat a definovat různými způsoby. Například dle Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) se TH rozumí „*havarijní podmínky, při kterých dochází k vážnému poškození jaderného paliva, a to vážným poškozením a nezvratnou ztrátou struktury aktivní zóny jaderného reaktoru nebo systému pro skladování jaderného paliva, poškozením palivových souborů v důsledku tavení jaderného paliva*“ [22], či podle Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA) jako „*havárie závažnější než projektová havárie zahrnující významnou degradaci AZ.*“ [7] Všeobecně je základním znakem TH poškození PP, AZ nebo bazénu skladování vyhořelého paliva.

2.2 Stavy JZ a hodnocení jaderných událostí

Základní způsob pro ochranu před únikem RaL a ohrožením obyvatelstva udává tzv. princip ochrany do hloubky (DiD = defence in depth). Ten je popsán v §45 bodu (2) v Atomovém zákoně č. 263/2016 Sb. [23] Princip DiD je strukturován do pěti úrovní. Pokud dojde k porušení některé z nich, ochranné funkce přejdou ihned na další. Obsah těchto pěti struktur je popsán v Tab. 2.2.

Úroveň	Stav JZ	Skupina událostí	Cíle	Hlavní prostředky
1	Normální provoz	Provozní režimy a provozní zatížení	Prevence odchýlení provozního stavu JE od normálního provozu, prevence poruch komponent JE důležitých pro bezpečnost	Konzervativní projekt, vysoká kvalita výstavby a provozování JE, provozní systémy kontroly a řízení JE
2	Abnormální provoz	Očekávané provozní události	Detekce vzniku a zvládnutí očekávané události, prevence přechodu do základních projektových nehod	Řídící a limitační systémy a ostatní prostředky pro sledování provozu
3	a	Základní projektové nehody	Detekce vzniku a zvládnutí DBA a zvládnutí scénářů způsobených očekávanou provozní událostí	Bezpečnostní systémy a příslušné havarijní postupy, projektová opatření
	b	Rozšířené projektové podmínky	DEC A	Detekce vzniku a prevence přechodu rozšířených projektových podmínek do TH
4	TH	DEC B	Detekce vzniku a zvládnutí TH, prevence vzniku radiační havárie s únikem RaL do okolí JE	Havarijní informační systémy, projektové a alternativní prostředky, příslušné havarijní postupy
5	Situace při radiační havárii	Radiační havárie	Detekce a zmírnění následků radiační havárie	Havarijní informační systémy, projektová opatření dle vnitřního a vnějšího havarijního plánu JE

Tab. 2.2: Přehled úrovní ochrany do hloubky dle SÚJB, upraveno z [17]

Principy jaderné bezpečnosti určují, že JZ s jaderným reaktorem musí po dobu svého provozu [17]:

- umožnit v případě nutnosti okamžité a bezpečné odstavení reaktoru a jeho udržení v podkritickém stavu
- zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné reakce
- fyzikálně znemožnit vznik kritického a nadkritického stavu mimo vnitřní prostor jaderného reaktoru

- zajišťovat odvod tepla vytvořeného jaderným palivem a technologickými systémy
- zajistit stínění a zabránit úniku RaL a šíření ionizujícího záření do ŽP

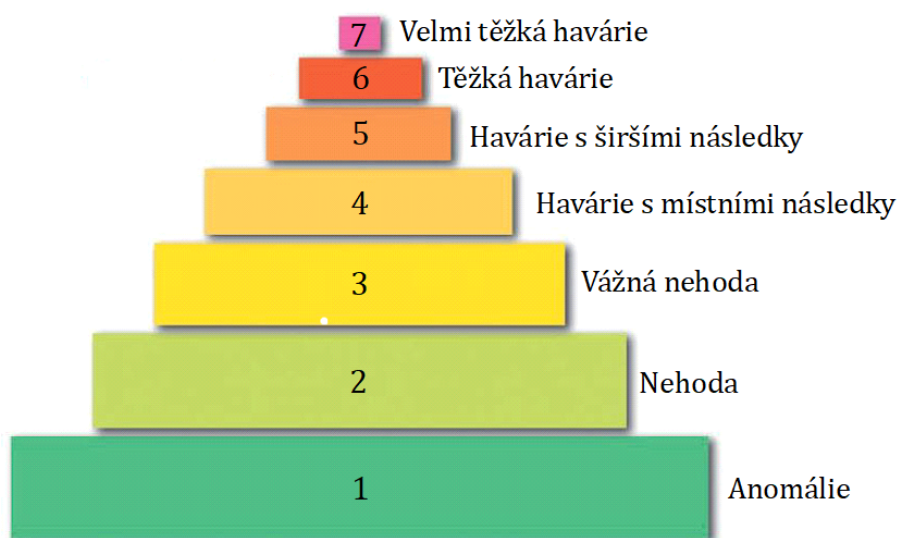
Dosažení izolace RaL a zamezení jejich úniku do ŽP zajišťuje systém čtyř ochranných bariér, jimiž jsou vzestupně palivová matrice, pokrytí paliva, hermetická hranice I.O. a KTMT [5].

V matrici uranových tabletek dojde k záchytu netěkavých ŠP. Pokrytí palivových proutků dále hermeticky zabraňuje úniku i plyných ŠP a odděluje tabletky od moderátoru. Celý I.O. pak vytváří hermeticky uzavřený systém. Ten musí odolat převážně teplotnímu, tlakovému, radiačnímu, mechanickému a chemickému zatížení. KTMT pak tvoří poslední fyzickou bariéru, která obklopuje celý reaktor a zařízení I.O. Tato nejčastěji silná železobetonová obálka má za úkol zamezit úniku RaL do okolí, a také zabránit poškození přicházejícího z vnějšku.

Pro případ, kdy v jaderné elektrárně nastane nějaký incident, je jedním ze způsobů ocenění jeho závažnosti mezinárodní stupnice INES (International Nuclear and Radiological Event Scale). Tato stupnice bere více v potaz radiační následky incidentu než fyzikálně-technologické procesy a slouží jako komunikační nástroj, který usnadňuje komunikaci mezi odbornou a laickou veřejností. Je členěna do 7 stupňů. Nultý stupeň je přiřazen takovým situacím, které jsou klasifikovány jako situace bez bezpečnostního významu. Stupeň 1 až 3 představuje nehody. Havárie jsou v rozmezí 4. až 7. stupně. Neplatí tedy, že TH je z hlediska klasifikace INES automaticky na nejhorším 7. stupni [15]. Grafické znázornění stupnice INES je ukázáno na Obr. 2.1. Každá událost se hodnotí vzhledem k:

- obyvatelstvu a ŽP
- radiačním bariérám
- míry narušení DiD

Výsledné hodnocení je dáno nejvyšším stupněm dle všech tří kritérií.



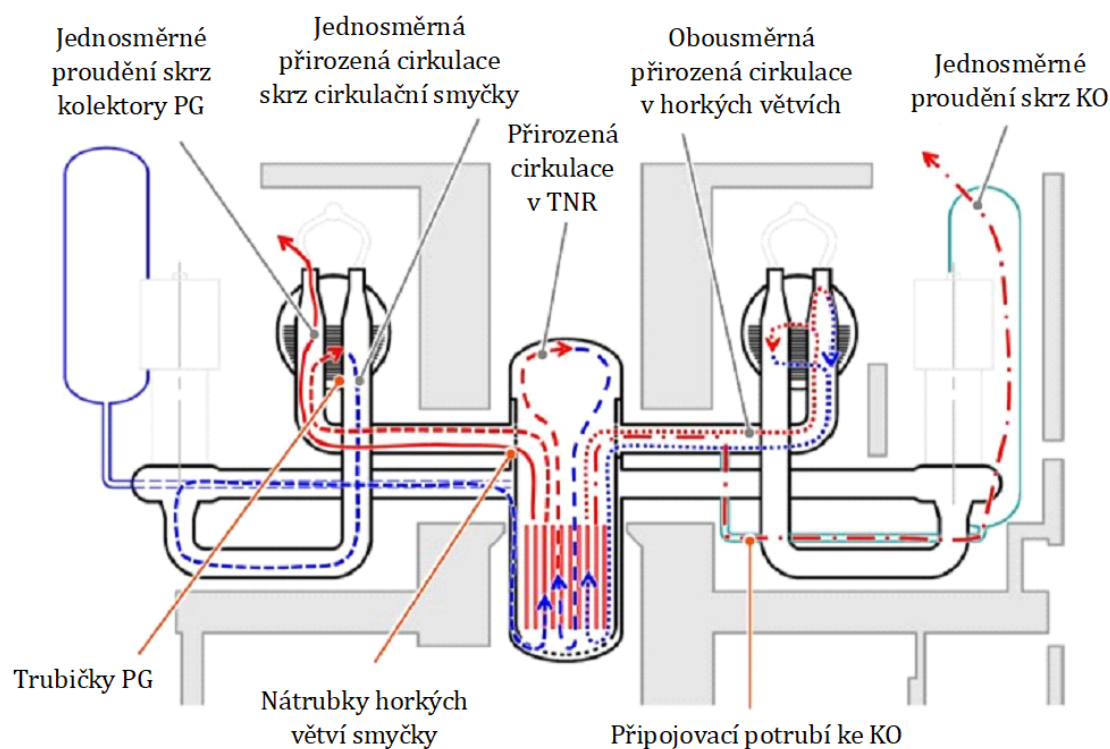
Obr. 2.1: Stupnice INES, upraveno z [20]

Význam jednotlivých bodů je následující [15]:

- (1) - Běžné poruchy bez významu pro bezpečnost.
- (2) - Nehody, které nepředstavují riziko, ale jsou odchýlením od normálního provozu.
- (3) - Nehody, které neovlivňují bezpečnost přímo, ale mohou vést k úpravě bezpečnostních opatření.
- (4) - Významná havárie, v důsledku které došlo k ozáření personálu či menšímu úniku radioaktivity do okolí.
- (5) - Vážná havárie s účinky přímo ovlivňující JZ. Příkladem je částečné poškození AZ nebo větší únik RaL.
- (6) - Závažná havárie s nutností aktivace havarijních plánů k ochraně okolí v důsledku značného úniku RaL mimo JZ.
- (7) - Velká havárie s okamžitými zdravotními následky a dlouhodobým znehodnocením ŽP.

2.3 Termohydraulické jevy před poškozením AZ

Cirkulační smyčka reaktoru obsahuje teplou a studenou větev. Pro průběh TH jsou důležité termo-hydraulické procesy. To jsou děje mající vysoký význam i před poškozením paliva nebo významnou oxidací palivového pokrytí. Jedním z nejdůležitějších dějů je tzv. přirozená cirkulace. Ta může vznikat uvnitř TNR nebo také mezi TNR a cirkulační smyčkou (či její částí). To je znázorněno na Obr. 2.2. Za běžných podmínek probíhá v I.O. nucená cirkulace pomocí HCČ, ale při havárii může přinést přirozená cirkulace způsobená rozdílnými teplotami mezi jednotlivými částmi I.O. pozitivní vliv v podobě zpomalení ohřevu AZ. To však může vést k poškození navazujících komponent I.O. kvůli přenosu tepla a může dojít k vytvoření potenciálních cest pro únik RaL. To vše za stavu, kdy AZ ještě není poškozena [14].



Obr. 2.2: Druhy přirozené cirkulace, upraveno z [20]

2.4 Výzkum v oblasti TH

Oblast výzkumu TH je ovlivněna značnou složitostí JZ a nesčetným počtem situací, které mohou nastat. Provádí se různé experimenty, které jsou ale finančně náročné nebo kladou vysoké nároky na bezpečnost. Tyto experimenty se zabývají buď jedním konkrétním jevem a jsou tedy úzce specializované (tzv. „separate effect test“ či „small scale test“) nebo celou škálou jevů, které jsou vzájemně provázané (tzv. integrální experimenty). Mimo provedené experimenty je zkušenost s TH fenomenologií omezená na znalosti incidentů, které se již staly. Dohromady tyto informace slouží k vytvoření fyzikálních modelů a jejich aplikaci na konkrétní JZ, kde je snahou určit slabá místa a tam zaměřit zodolňovací úsilí. [6]

2.5 Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti

Pomocí pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti (PSA = Probabilistic safety assessment) lze určit míru pravděpodobnosti vzniku určitých stavů JZ včetně případných vzniků radiační mimořádné události různé závažnosti. Studium analýzy PSA dělíme na 3 úrovně [5]:

1. úroveň – hodnocení poškození jaderného paliva a tavení AZ
2. úroveň – hodnocení odezvy KTMT na havarijní scénáře identifikované a popsané v 1. úrovni
3. úroveň – hodnocení následku úniku RaL mimo prostory JE a jejich vliv na ŽP a obyvatelstvo

Výsledkem PSA 1. úrovně je pravděpodobnost závažného poškození (tavení) paliva v AZ. Výsledkem PSA 2. úrovně je stanovení velikosti úniku RaL do okolí (tzv. zdrojový člen).

PSA 1. úrovně je provedena téměř na všech JE na světě a většinově si též JE nechaly provést i PSA 2. úrovně. PSA 3. úrovně se již zpravidla nedělá, protože tato studie je velice náročná, drahá a národní regulátoři ji nevyžadují. Taktéž je tomu v České republice, kde je národním regulátorem SÚJB [16].

PSA utváří popis, který dále slouží k následným bezpečnostním analýzám deterministického druhu. Dává také přehled o možných sekvencích při TH. Je tedy možné

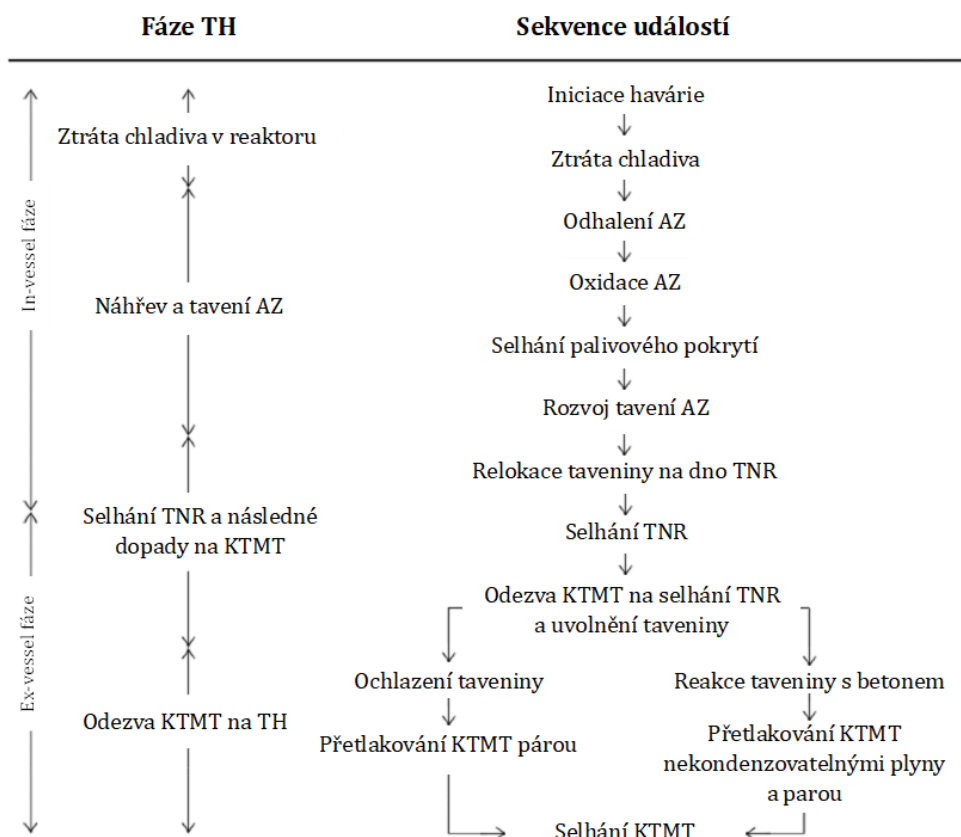
identifikovat slabá místa projektu JZ a dodatečnými prostředky tyto slabiny eliminovat. To se následně promítne do aktualizované frekvence výskytu určité negativní události (tavení AZ, velký či časný únik RaL do okolí atd.) v rozvoji TH.

Mezi výsledky PSA patří například fakt, že maximální projektové havárie v podobě roztržení cirkulačního potrubí v celém průřezu jsou velice málo pravděpodobné. Tedy vzhledem k větší pravděpodobnosti může být větším rizikem malá LOCA než velká LOCA [4].

V §6 bodu (5) vyhlášky 329 ze dne 26. září 2017 [22] je dáno, že každé JZ musí mít naprojektována proveditelná opatření pro zvládnutí postulované TH. Pro zvážení jednotlivých postulovaných iniciačních situací (PIU), které mohou vyústit v TH, se využívá právě PSA. Na základě výstupů z 1. úrovně je sestaven seznam PIU.

2.6 Přehled nejdůležitějších jevů při TH

Fáze TH se dělí do dvou skupin: in-vessel fázi a ex-vessel fázi. O in-vessel fázi hovoříme, pokud je degradovaná AZ stále ještě lokalizovaná uvnitř TNR (tj. do jejího selhání). Neznamena to však, že by určité jevy a procesy neprobíhaly i vně TNR. Při ex-vessel fázi TH pak naprostá většina procesů probíhá mimo TNR [2]. Jednotlivé fáze TH a jejich sekvence událostí jsou pro případ LOCA (která byla uvažována jako PIU při přepracování vstupního modelu havarijní sekvence pro palivo TVSA-T mod1 na palivo TVSA-T mod2) popsány na následujícím Obr. 2.3.



Obr. 2.3: Rozvoj TH, upraveno z [20]

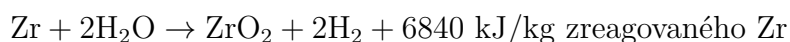
2.6.1 Oxidace materiálů AZ

Oxidace kovových materiálů má vysoký význam na průběh in-vessel fáze, a je tedy jednou ze stěžejních hnacích sil TH. Oxidace se týká především palivového pokrytí, tedy oxidace zirkonia, ale týká se též oxidace karbidu bóru a oceli, u kterých je vyprodukované teplo při TH spíše zanedbatelné.

Oxidace zirkoniového pokrytí paliva

Oxidace palivového pokrytí (reakce zirkonia s párou) nastává při podmínkách, kdy je z většiny v AZ již jen přehřátá pára a dolní směšovací komora (DSK) reaktoru spolu s nejnižší částí AZ je stále s vysokou mírou pravděpodobnosti zaplavena vodou. Zirkoniové reakce s sebou přináší dvě velká rizika v podobě tvorby vodíku a faktu,

že se jedná o silně exotermickou reakci. Proces oxidace je dán chemickou rovnicí [21]:



Tato reakce je v zanedbatelné míře přítomna i za normálních provozních podmínek. Při překročení teploty cca 1200 °C se uvolňuje značné množství chemického tepla, které dosahuje zhruba srovnatelných hodnot odpovídajících zbytkovému výkonu reaktoru [30]. Dojde tedy ke zdvojnásobení množství energie, která je produkována v AZ. Při teplotách přesahujících 1500 °C se prudce zrychluje kinetika oxidace vlivem přechodu krystalové mřížky ZrO_2 z tetragonální na kubickou, a tedy dojde i k zlepšení difúzních vlastností. Může dojít až k produkci desetinásobku výkonu reaktoru. Při těchto teplotách již dochází k tavení materiálů, jež mají individuální teploty tavení relativně vysoké, nicméně v kontaktu s jinými materiály dochází ke vzniku eutektických slitin s nižší teplotou tavení. Zirkoniová reakce dokáže ohřát AZ až na teplotu přes 2800 °C, při které již dochází k tavení samotných palivových proutků z oxidu uranu [20].

Rychlost oxidace zirkoniového pokrytí paliva a DM je funkcí především teploty. Při dané teplotě je produkce vodíku z oxidace větší při vyšším tlaku. To je způsobené zvýšenou koncentrací molekul vody. Tedy je rozdíl i mezi vysokotlakou havarijní sekvencí – ztráta všech střídavých zdrojů elektrárny (SBO = station blackout) nebo nízkotlakou havarijní sekvencí – LOCA. Vyprodukovaný vodík při zirkoniových reakcích s sebou přináší riziko hoření a exploze. Pokud vodík unikne do KTMT, vytváří se vzduchem hořlavou směs [6].

Oxidace klastrů karbidu bóru a ostatních materiálů

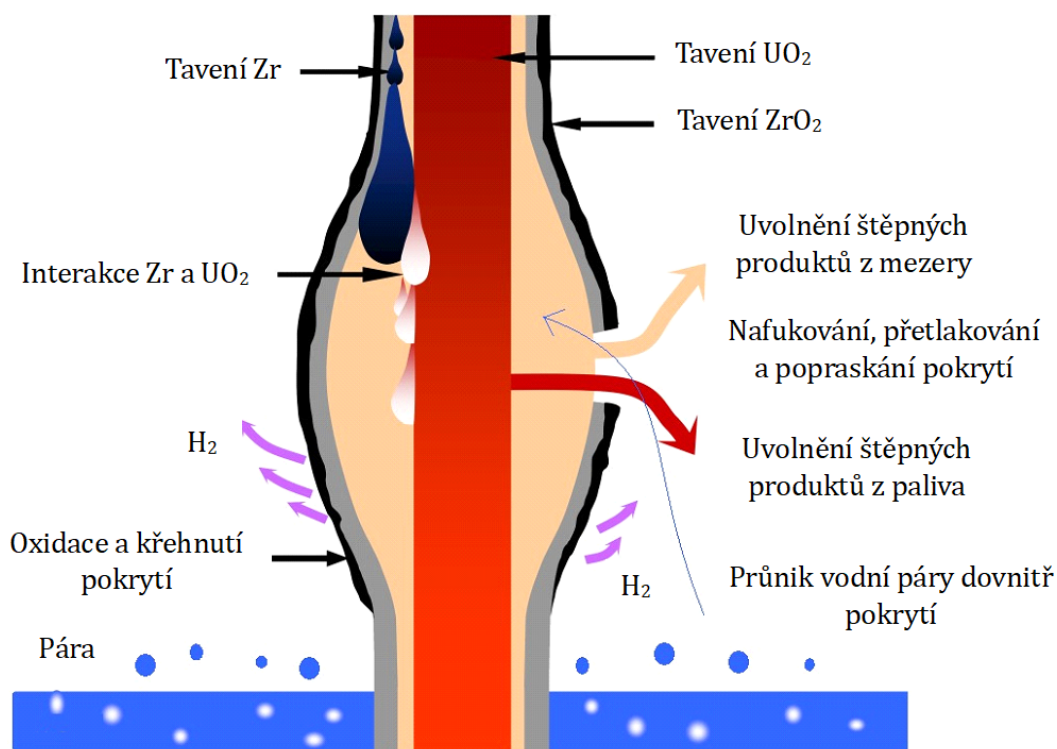
Při oxidaci karbidu bóru (B_4C) se při teplotách nad 1200 °C také produkuje vodík a i další plyny jako CO , CO_2 či CH_4 , a také aerosoly s obsahem bóru. Ty mají vliv na změnu chemických procesů během TH a šíření RaL. Množství B_4C je však oproti zastoupení zirkonia mnohem menší, tedy i v produkci vodíku může být z jeho oxidace zastoupena maximálně z 15 %. Z experimentu Phébus FTP3 [3] plyne vliv B_4C na postup relokace materiálů AZ, a to díky tvoření eutektických slitin s nižší teplotou tavení. Dále také produkce CH_4 může s jodem tvořit těkavé organické jodidy. Pravděpodobnost tohoto děje je však minimální.

Oxidace probíhá i v jiných materiálech, které jsou součástí AZ. Takovým materiálem je např. nerezová ocel. Tato reakce však již není exotermická a výsledná

produkce vodíku je v řádu maximálně nižších desítek procent. Navíc také konstrukční materiály vyrobené z nerezové oceli se většinou roztaví a přemístí do spodní části AZ dříve, než stihnou více zoxidovat.

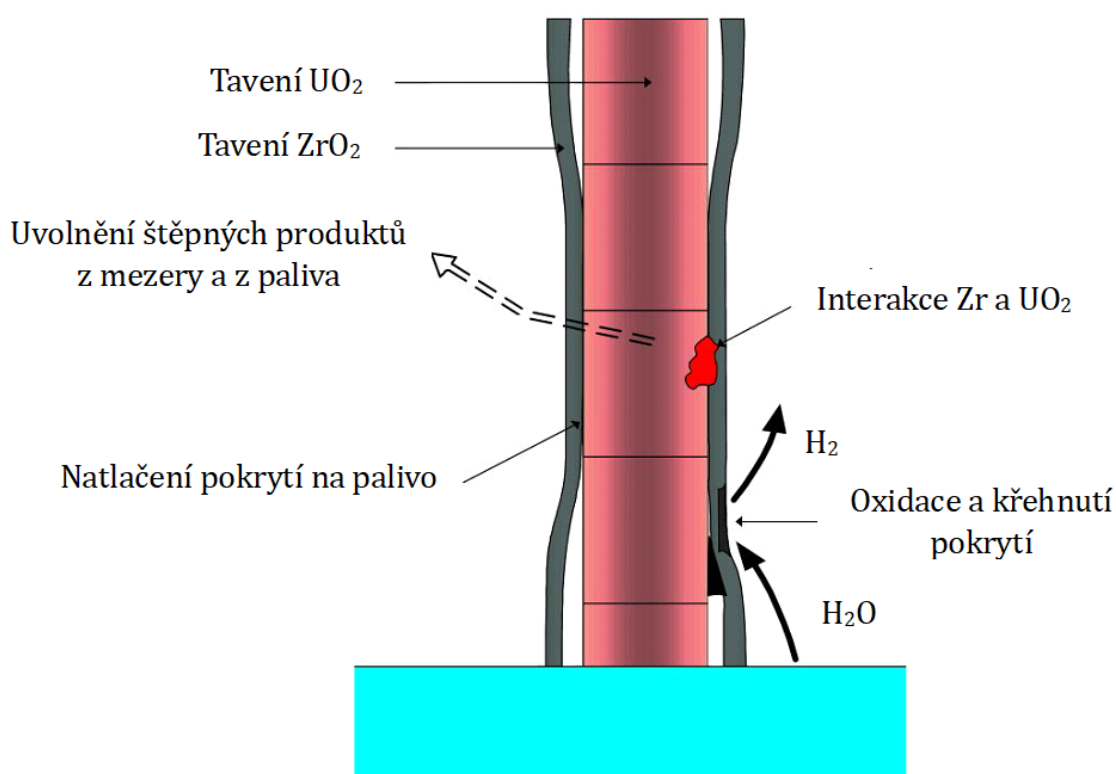
2.6.2 Ztráta geometrie AZ

Geometrické změny AZ jsou závislé na mnoha faktorech: na teplotě a času jejího působení, tlaku, materiálech zastoupených v AZ nebo na průběhu odhalování AZ. Prvním jevem, který vzniká již při teplotách v rozmezí 700 až 900 °C, je nafukování (balooning) paliva a jeho následné praskání [2]. Tento jev je vystihnout na Obr. 2.4. Toto platí pro nízkotlakou havarijní sekvenci (např. LOCA) a samotný proces je ovlivněn tlakem uvnitř jednotlivých PP. Čím je větší vyhoření paliva, tím více je uvnitř PP nashromážděných plynných ŠP, které způsobují vnitřní přetlak až cca 8–10 MPa.



Obr. 2.4: Poškození paliva při nízkotlaké sekvenci havárie, upraveno z [20]

Při vysokotlaké havarijní sekvenci působí vysoký tlak z vnějšku na PP, a to současně za působení vysoké teploty. Dojde tedy ke stlačení palivového pokrytí na samotné palivové tabletky, viz Obr. 2.5. V tomto případě nedojde k porušení pokrytí prasknutím, ale vlivem chemických interakcí a vzniku sloučenin, které mají nižší teplotu tavení. Míra oxidace je v tomto případě vysokotlaké sekvence vyšší. Toto poškození palivových proutků má za následek uvolnění RaL do prostoru I.O., průnik vody či vodní páry do vnitřního prostoru PP a tím pádem i oxidaci vnitřního povrchu, což vede k nárůstu teploty a zvýšené produkci vodíku [14].



Obr. 2.5: Poškození paliva při vysokotlaké sekvenci havárie, upraveno z [20]

Dojde-li ke kontaktu materiálů, jako jsou Fe – Zr, B₄C – Fe, B₄C – Zr nebo Zr – UO₂, pak se vytvoří sloučeniny s nižší teplotou tavení, než jsou teploty tavení individuálních materiálů. To nastává v rozmezí teplot 1200 °C až 1400 °C. Hrozí tedy tavení a přesun komponent AZ, a to v místech jako jsou kontakty DM s pokrytím (v případě inconelových DM) nebo také povrchu klastrů s VT či materiál absorbéru s pokrytím kontrolních tyčí. Případné vytavení a uvolnění klastrů představuje riziko v dosažení opětovné kritičnosti při znovuzaplavení AZ [2].

K tavení samotného zirkoniového pokrytí dochází při teplotě zhruba 1750 °C. To ale neplatí pro ZrO₂, jehož teplota tavení je zhruba 2700 °C. Je však pravděpodobné, že vznikem eutektických slitin bude směs různých materiálů tekutá již při nižších teplotách. Roztavené zirkonium tak stéká dolů do spodní části AZ. To je všeobecně lepší varianta pro průběh TH, protože zde dochází k jeho ochlazení. Přesun taveniny ovšem může způsobit ovlivnění nahřátí respektive chlazení AZ, protože mnoho termo-hydraulických kanálů se může ucpat taveninou. Na povrchu palivového pokrytí vzniká oxidací ZrO₂. Chemická interakce mezi UO₂ a ZrO₂ způsobí, že dojde k natavení UO₂ i ZrO₂ při teplotách nižších, než jsou jejich běžné teploty tavení [6]. Čím je vrstva ZrO₂ silnější, tím déle je roztavené zirkonium v kontaktu s UO₂ a tím i více může ovlivnit jeho chemické a fyzikální vlastnosti. Experimenty Phébus navíc ukázaly, že vzájemné rozpouštění UO₂ – ZrO₂ může nastat již při nižších teplotách, než je teoretická teplota eutektické slitiny (cca 2520 °C), a to už v rozmezí 2200 °C až 2300 °C [20]. AZ v této fázi rozvoje TH a při těchto teplotách obsahuje zpravidla vytavením vytvořenou dutinu a taveninu (tzv. korium) ve spodní části, která je obklopena krustou. Proudění vody skrz tuto taveninu je prakticky nemožné a odvod jejího tepla je zase vysoce obtížný. Zároveň přenos tepla z poškozené AZ je menší díky tomu, že energie se akumuluje převážně uvnitř taveniny. Je-li oblast taveniny, která je obklopena krustou, dostatečně velká, pak se v ní ustaví vnitřní přirozená cirkulace [14]. Jejím vlivem se přenáší teplo více na vrchní a boční části krusty. To může způsobit zeslabení těchto více ohřívaných částí, zatímco krusta na dně může zůstat relativně pevná. O tom, jaký je v TNR tepelný tok, vypovídá experiment COPO [13]. Ten ukázal, že přibližně 50 % výkonu taveniny je vyzařováno vzhůru nezávisle na vnitřním uspořádání taveniny. Tepelný tok horizontálním směrem a směrem šikmo dolů je dle experimentu značně proměnlivý a tepelný tok na dno TNR je defakto nulový.

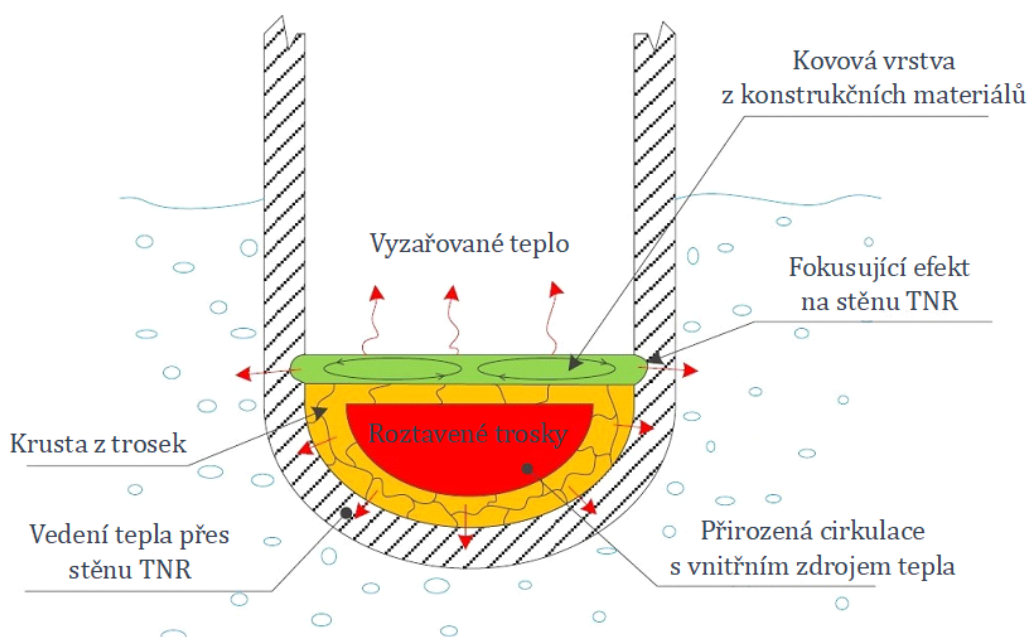
Uvažujme nyní případ, než dojde k relokaci taveniny na dno TNR, dojde s vysokou mírou pravděpodobnosti k několika cyklům postupného propadávání taveniny níže směrem ke dnu TNR. Potom mluvíme o tzv. by-passu. Další průběh TH je nyní značně závislý na tom, jestli je na dně TNR přítomna voda. Je-li tam přítomna pouze pára (což je varianta méně pravděpodobná), tavenina může přímo interagovat s materiálem TNR a způsobit tak rychleji jeho selhání. Provedené experimenty ale ukazují v zásadě jiné chování. Jelikož TNR je z oceli, a ta je velice dobrý tepelný vodič, tak z taveniny, která na ni dopadá, velice rychle odvádí teplo. Díky tomu vzniká na vnitřním povrchu TNR krusta ztuhlého oxidického materiálu, která vytváří ochrannou izolační vrstvu. Ta značně zpomaluje prostup taveniny skrz stěnu TNR. To platí za podmínky, kdy TNR má kam odvádět teplo a nepřehřívá

se. Mluvíme zde o strategii IVR (in-vessel retention), kdy je cílem udržet korium uvnitř TNR. Existuje však i koncept s tzv. lapačem tekutého koría, kde je tavenina dochlazována až po protavení TNR [14].

Na dně TNR je defakto vždy přítomen zbytek chladiva (nejpravděpodobnější varianta – i při havárii na TMI-2 nikdy neklesla hladina vody pod spodní okraj PS [21]). To je možné díky krustě, která brání relokaci taveniny na dno a má značné izolační vlastnosti. Díky tomu je tepelný tok směrem dolů minimální. Dojde-li ale k porušení krusty a k následné interakci taveniny a vody na dně TNR, nejpravděpodobnější variantou je fragmentace taveniny na malé částičky (v řádu mm) a var vody, v jehož důsledku dojde ke zvýšení tlaku. Tento děj má pozitivní vliv na dlouhodobé chlazení, ale i napadání stěn TNR [20].

Taveninu na dně TNR tvoří směs UO_2 , Zr, ZrO_2 , Fe, B_4C a ŠP. Tekuté fáze kovů (např. Fe) nejsou rozpustné v roztavených oxidech a mají menší měrnou hmotnost – tvoří vrchní metalickou vrstvu taveniny lokalizované na dně TNR. Dochází k tzv. stratifikaci (rozvrstvení) taveniny, kdy zirkonium formuje společnou fázi s oxidy, neboť je v nich rozpustné. Jelikož oxidické materiály mají vyšší teplotu tavení, existuje oxidická vrstva, která odděluje korium od samotné TNR. Horní metalická vrstva při dokončené relokaci veškeré taveniny na dno TNR způsobuje tzv. fokusační efekt. Část tepelného toku z taveniny se soustředí do bočních stěn TNR, ale značná část jde do horní metalické vrstvy. Pokud není v TNR přítomna voda, potom je teplo většinou odvedeno do malé oblasti boční stěny TNR. S menší výškou metalické vrstvy roste tepelné namáhání TNR v této oblasti, neboť veškeré teplo je předáváno menší ploše. Chlazení vnější stěny TNR tedy musí být schopno odvést ono vzniklé teplo. K tomuto účelu se využívá porovnání s tzv. kritickým tepelným tokem, tj. maximální hodnotou tepelného toku, při které ještě dochází na vnější stěně TNR k bublinkovému varu vody. Pokud bude tepelný tok vyšší než je kritický, dojde ke krizi varu prvního stupně a dojde k selhání materiálu vlivem jeho rychlého ohřevu [2].

Ve fázi havárie, která je znázorněna na Obr. 2.6, je nutné uchládit taveninu a zabránit protavení TNR. Přesné lokální teplotní gradienty a shluky materiálů uvnitř taveniny je v reálu nemožné predikovat. Známý je díky havárii TMI-2 pouze fakt, že se tavenina může pohybovat v TNR i po spuštění vysokotlakého havarijního doplňování [4]. Analýza uchláditelnosti taveniny v TNR je závislá na mnoha různých fyzikálních jevech.



Obr. 2.6: Znázornění dějů v tavenině při strategii IVR, upraveno z [21]

2.6.3 Ex-vessel fáze

Ex-vessel fáze přináší spoustu nových fenoménů do průběhu TH. Obecně nastává, když dojde k poškození TNR. Její součástí bývá i relokace paliva do KTMT. K poškození TNR může dojít protavením AZ, jak bylo popsáno výše, plastickou deformací, která nastává po překročení meze kluzu, nebo na tzv. creep, což je vysokoteplotně a časově závislý proces. Experimentem v oblasti poškození TNR je např. LHF/OLHF, kde byl použit model TNR pro PWR reaktor, materiál analogický jako v PWR reaktorech a indukčně ohřívána nádoba natlakovaná argonem [14]. Výsledkem experimentu bylo mimo jiné, že lom nastává v místě s nejvyšší teplotou, s drobnými vadami a nepřesnostmi. Dále také, že lom je iniciován na vnějším povrchu TNR, a to v místě koncentrace nejvyššího napětí.

Po selhání TNR nastává:

- nárůst teploty a tlaku v KTMT a současně pokles teploty a tlaku v I.O.
- nárůst teploty v ŠR
- uvolnění velkého množství RaL

- zvýšená koncentrace vodíku v KTMT
- tlakové rázy v KTMT, které jsou důsledkem interakce taveniny s vodou

Rozlišuje se protavení vysokotlaké a nízkotlaké. Při vysokotlakém případě dochází k rychlému výstřiku taveniny vně TNR. Tavenina se rozptýlí do malých kapiček. To má za následek natlakování KTMT přímým ohřevem jeho atmosféry. Důsledkem toho může dojít k časnému selhání KTMT. Při nízkotlakém protavení hrozí pozdní selhání KTMT. Po selhání TNR dochází k interakci taveniny s betonem na dně šachty reaktoru (MCCI = molten corium concrete interaction). Po protavení koria skrz TNR se následně při interakci taveniny s betonem uvolňuje např. vodík a oxid uhelnatý, které jsou hrozbou pro integritu KTMT. K tzv. ablaci (natavování a rozkládání) betonu dochází již v rozsahu teplot 1100–1450 °C. Fáze fenoménu MCCI na základě podílu betonu rozpuštěného v tavenině a rychlosti produkce plynů jsou následující [20]:

1. Krátká úvodní fáze s méně než 25% rozpuštěností betonu v tavenině

Tavenina má v této fázi téměř analogické složení a vlastnosti jako při vylití z TNR. Dochází též k vysokému tepelnému toku do krajových částí taveniny. Tato fáze trvá jen pár hodin po iniciaci MCCI.

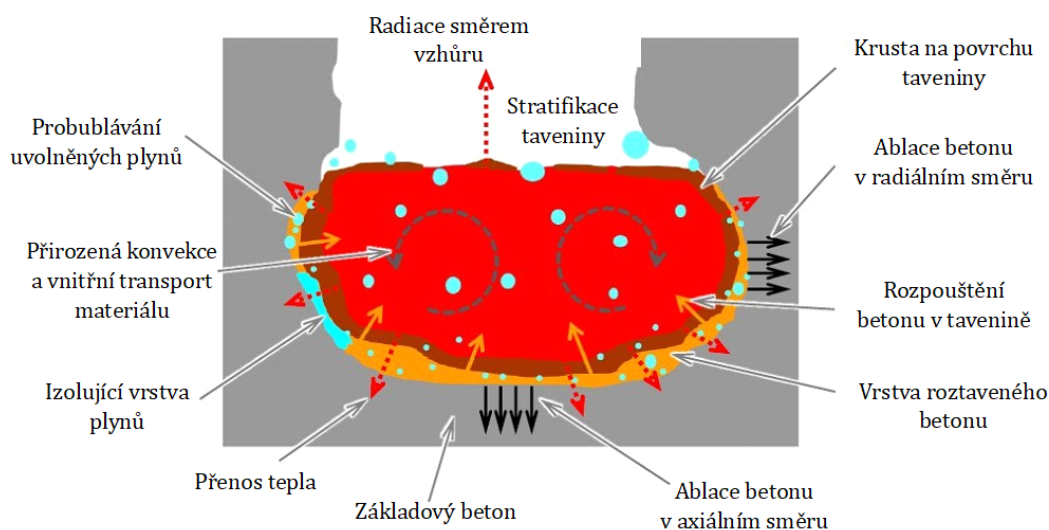
2. Střední fáze s podílem betonu okolo 50 %

Dochází k menší produkci plynů a ke změně složení i fyzikálních vlastností taveniny. Rovněž dochází k definitivní oxidaci zbylého roztaveného zirkonia a oceli – tím i k nárůstu tepla. Tato fáze trvá zhruba do 15 hodin od iniciace MCCI.

3. Závěrečná fáze s většinovým podílem rozpuštěného betonu v tavenině

Dochází k redukci tepelného toku a tvorby plynů.

Proces postupu taveniny betonem je znázorněn na Obr. 2.7.



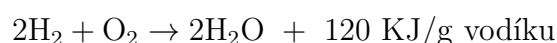
Obr. 2.7: Protavování betonu korigem, upraveno z [30]

Aby se zabránilo protavení TNR a tím i iniciaci MCCI, je snaha opět dosáhnout zaplavení AZ. To s sebou ale přináší i negativní důsledek v podobě popraskání materiálů AZ kvůli tepelnému šoku způsobenému rychlým zchlazením. V oblasti, kde již došlo k lokálnímu tavení, dojde k popraskání ztuhlé taveniny. Nedochozí ovšem k výrazným změnám v geometrii. V místech, kde jsou PS stále na původní pozici a všeobecně není geometrie AZ výrazně poškozena (a za předpokladu, že teplota v AZ nepřesáhla 1200 °C), dochází k popraskání pokrytí i paliva, následné fragmentaci a přesunu úlomků směrem ke dnu TNR. Důsledkem toho dochází k uvolňování značného množství RaL. Úlomky navíc také způsobují blokaci proudění v AZ, což negativně ovlivňuje uchlazenost. Ta je ovšem v porovnání s případem praskání roztavených komponent AZ zajištěna mnohonásobně lépe. V případě, že dojde ke znovuzaplavení odhalené AZ, kde teplota již přesáhla hodnotu 1200 °C , dochází v ní k prudkému nárůstu teploty kvůli oxidaci [2].

Po selhání TNR, který představoval bariéru proti šíření RaL, je nutné zajistit hermetičnost a integritu KTMT. Následující jevy ji mohou narušit, a tak způsobit únik RaL do okolí.

Hořlavé plyny v KTMT

Nejvýznamnějším plynem, k jehož vznícení může v KTMT dojít, je vodík. Příkladem další látky, tvořící se vzduchem hořlavou směs, je oxid uhelnatý. Ten uniká do KTMT z MCCI. Avšak pomocí experimentů a výpočtů se ukázalo, že vodík je pro pozdní vývoj havárie dominantní hrozbou. K uvolnění vodíku dochází převážně z oxidace paliva a MCCI. Hrozbou je jeho zapálení či detonace, či prosté natlakování KTMT. Vodík chemicky reaguje s kyslíkem za vzniku vody a uvolnění tepla podle rovnice [2]:



Zápalná teplota vodíku je zhruba 570 °C, teplota vodíkového plamene je až 2400 °C a energie výbuchu 1 kg vodíku je ekvivalentem 24 kg TNT. Aby došlo k zahoření vodíku, je nutný iniciační jev – zapálení (samovznícení v podmínkách TH ovšem nepředstavuje významnou hrozbu). Při zapálení vodíku ve směsi vzduch-pára-vodík mohou nastat dvě situace [14]:

1. Plamen setrvává na jednom místě, pokud směs v KTMT není dostatečně promíchána. Při tomto ději je riziko pouze v lokálním ohřevu části KTMT.
2. Rozšiřování plamene v KTMT nastane u promíchané směsi. Pokud je rychlost šíření plamene vyšší než rychlost zvuku, pak mluvíme o detonaci, pokud je naopak nižší, jedná se o zahoření. Zahoření může být buď rychlé turbulentní nebo pomalé laminární.

Nejpravděpodobnějším dějem je zahoření a vznik nejdříve laminární fáze (analogie nafukování bubliny) a následný přechod do turbulentní fáze. Před plamennou frontou vznikají rázové vlny, a ty mohou ohrozit integritu KTMT. Při méně pravděpodobné detonaci dojde k vytvoření vysokotlaké rázové vlny, která s větší pravděpodobností může způsobit narušení integrity KTMT.

Jako akceptovatelná koncentrace vodíku se pro riziko exploze považuje hodnota nižší než 8 % (objemových). Do této hodnoty nehrozí destrukce integrity KTMT. Pro zabránění zahoření nebo detonaci vodíku se využívají nejvíce následující přístupy [20]:

1. Inertizace atmosféry – tj. zředění oxidačního činidla. Inertním plynem může být např. dusík nebo oxid uhličitý. Jeho koncentrace musí být cca 60 - 75 % objemu KTMT.
2. Promíchávání atmosféry KTMT – tj. vytvoření homogenní směsi, kde koncentrace vodíku nedosáhne meze hořlavosti.
3. Rekombinátory vodíku – tj. za pomoci katalyzátoru dochází z vodíku a kyslíku ke tvorbě vody a uvolnění tepla.
4. Zapalovače vodíku – tj. zapálení směsi v oblasti co nejnižších koncentrací, které jsou již hořlavé.

Parní výbuch

V průběhu TH může nastat situace, kdy se do kontaktu dostane tavenina a voda. Dochází zde k rychlému přenosu značného množství energie z taveniny do vody – interakce taveniny s vodou při relokaci v TNR, interakce taveniny a zbytku vody na dně TNR nebo interakce taveniny uniklé do ŠR s vodou. Voda se může začít explozivně vypařovat. Tomuto jevu říkáme parní výbuch. Ten se jeví jako spíše nepravděpodobný, avšak při jeho uskutečnění by konstrukce KTMT nemusela vydržet.

Kapitola 3

Integrální kód ASTEC

Havárie TMI-2 urychlila vývoj počítačových kódů pro simulace TH nejdříve ve Spojených státech a poté i v Evropě. Výpočetní kódy dělíme do tří tříd [2]:

1. **Integrální kódy**, které simulují celkovou odezvu JE, zahrnují kombinace mechanistických a parametrických modelů pro simulaci příslušných jevů. Tyto kódy nejsou vytvořeny pro provedení vysoce exaktního odhadu, ale spíše pro znázornění posloupnosti důležitých procesů a jevů s definovanými parametry. Tyto kódy se využívají např. pro podporu PSA 2. úrovně, kde výpočty slouží pro zlepšení odhadu rizik spojených s daným scénářem TH a zpravidla končí uvedením velikosti úniku RaL do okolí.
2. **Detailní kódy** jsou sestaveny pro nejlepší odhad daného jevu. Rozdíl oproti integrálním kódům je např. nahrazení parametrických modelů přesnějšími fyzikálními modely. Základním požadavkem pro detailní kódy je, aby nejistota modelu byla srovnatelná s nejistotou experimentálních údajů. Vzhledem k vysoké výpočetní době slouží detailní kódy pouze pro část zařízení JE.
3. **Dedikované kódy** jsou zpravidla zaměřené na zkoumání jediného jevu. Tyto kódy jsou důležité obzvláště při navrhování nových JE, kde slouží k snížení nejistoty rizikových jevů. Typické využití je pro simulaci parních výbuchů nebo rozlivu či uchlazenosti taveniny vně TNR.

Kód ASTEC (Accident Source Term Evaluation Code) patří mezi integrální výpočetní kódy – má za cíl simulovat celou sekvenci TH od vzniku iniciační události až po případný únik RaL do ŽP. ASTEC je vyvinut IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) a slouží pro výpočty na tlakovodních jaderných reaktorech

západní i východní koncepce a na varných reaktorech. Mezi jeho hlavní aplikace patří [1]:

- využití k deterministickým bezpečnostním analýzám průběhu scénářů TH včetně stanovení zdrojových členů
- PSA 2. úrovně včetně odhadu nejistot (pomocí provádění tzv. citlivostních analýz)
- fyzikální analýzy experimentů pro lepší pochopení jevů nastalých v průběhu hypotetické TH

ASTEC je strukturován do modulů. Každý z nich simuluje určitou fyzickou část JZ nebo soubor fyzikálních jevů. Jednotlivé moduly mezi sebou komunikují prostřednictvím dynamické paměti. Data mezi moduly se vyměňují v makročasových krocích skrze tuto dynamickou databázi. V programu ASTEC jsou možné dva různé provozní režimy:

1. Samostatný režim, kde každý modul běží nezávisle.
2. Sekvenční režim, kdy jsou všechny moduly (nebo jejich zvolená podmnožina) spouštěny sekvenčně v rámci makročasového kroku.

Sekvenční režim umožňuje explicitní zpětnou vazbu, tj. spojení mezi jednotlivými moduly je explicitní ve způsobu, jakým každý modul spouští svůj výpočet, když modul předchozí v předem určeném pořadí dokončil svou práci. Výjimka je u spojení mezi modulem CESAR a ICARE, pro které došlo ke stanovení poloimplicitního spojení kvůli stabilitě a výpočetnímu času.

Celá databáze je spravována nástrojem ODESSA vyvinutým IRSN v programovacích jazycích C a Fortran. ODESSA umožňuje zejména kontrolu syntaxe a konzistenci vstupních dat. Poskytuje taktéž online vizualizace a nástroje pro následné zpracování. Pro vlastnosti materiálů IRSN vyvinula knihovnu MDB (material data bank). Díky ní mohou všechny moduly získat aktuální informace, neboť MDB je průběžně doplňována [1]. Pro konkrétní výpočet je nutné provést správnou nodalizaci – tedy výběr uzlů či nódů (prvků prostorové diskretizace úlohy) se specifickými fyzikálními vlastnostmi.

3.1 Modul CESAR⁵

Modul CESAR simuluje dvoufázové proudění v celém I.O., části II.O., TNR a případně simuluje odvod tepla z vnějšího povrchu TNR při aplikaci strategie IVR. Při využívání těchto simulací je důležitá volba vhodného fyzikálního modelu. Existují dva druhy:

1. Modely pojímající dvoufázovou směs vody a páry jako celek

Ty lze ještě dále rozdělit na:

- *Homogenní model rovnovážné směsi*

Jedná se o model se třemi rovnicemi, kde předpokládáme, že rychlost, teplota a tlak jsou mezi fázemi stejné. Dvoufázová směs je považována za pseudojednofázovou tekutinu za předpokladu, že fáze jsou v termodynamické rovnováze a pohybují se stejnou rychlostí. Takže používáme jednu rovnici hmotnostní bilance, jednu rovnici energetické bilance a jednu rovnici bilance hybnosti.

- *Drift-flux model*

Zde je dvoufázová směs považována za celek, přičemž každá fáze má svou vlastní rychlost. Model dává do souvislosti rozdíl rychlostí mezi plynem a kapalinou na tzv. drift-flux (driftovou rychlost).

2. Dvoufázové modely

Ty lze také ještě dále rozdělit na:

- *5-rovnicový model*

Zahrnuje dvě rovnice hmotnostní bilance, dvě rovnice energetické bilance a jednu rovnici bilance momentové. Tím lze simulovat tepelnou nerovnováhu a pomocí tzv. phase-slip modelu i mechanickou nerovnováhu mezi oběma fázemi.

- *6-rovnicový model*

Obsahuje oproti 5-rovnicovému modelu ještě navíc druhou rovnici momentové bilance pro rozlišení kapalně a plynné fáze.

⁵V celé kapitole byly využity informace z manuálů pro ASTEC [1, 9] a manuálu pro modul CESAR [8].

Výběr konkrétního modelu závisí především na rovnováze mezi časem simulace, požadovanou přesností a na charakteru daného problému. Pro případ rychlých změn tlakových přechodových podmínek, což je účelem modulu CESAR, je vhodné využít dvoufázové modely, proto jsou pro něj k dispozici jak 5-rovnicový (využívaný spíše v předchozích verzích) tak 6-rovnicový model. Termohydraulika je tedy při výpočtu úlohy TH na reaktoru VVER-1000 modelována pomocí 1D dvoufázového proudění s $6 + N$ diferenciálními rovnicemi, kde N značí počet nekondenzovatelných plynů. Pro modul CESAR je jich možné zahrnout až pět. Většina fyzikálně-konstitutivních zákonů modulu CESAR vychází z korelací, které jsou obsaženy ve francouzském kódu CATHARE2.

Modelovány jsou v modulu CESAR různé procesy přestupu tepla, např. jednorozměrné vedení tepla, přirozená a nucená konvekce, var, kritický tepelný tok, radiace atd. Mezi fázemi je obecně (pro 5-rovnicový model či 6-rovnicový model) uvažována tepelná nerovnováha s možností podchlazené kapaliny a přehřáté páry. V modulu CESAR se rovněž počítá s mechanickou nerovnováhou mezi fázemi a možností protiproudu i stratifikovaných toků. V oblasti AZ se využívá 2D diskretizace v axisymetrickém uspořádání (tj. v r - z geometrii), což umožňuje řešit 2D dvoufázové proudění. Tepelně-hydraulické modelování bere v úvahu i konkrétní zařízení, např. čerpadla či ventily. K výpočtu modulem CESAR se využívá numerická metoda konečných objemů. Časová integrace probíhá s využitím Newtonovy metody.

3.2 Modul ICARE⁶

Modul ICARE rozlišuje následující fáze TH:

- *Časná fáze*, která zahrnuje prvotní zahřátí materiálu ještě před jeho relokací (např. zahřívání a bobtnání PP včetně jeho prasknutí) a první krok fáze ztráty geometrie AZ s tím, že tavící se a relokující se materiály mohou být přemístěny s využitím modelů vzniku pevných trosk (DEBRIS) či taveniny (MAGMA).
- *Pozdní fáze*, která odpovídá pokročilé degradaci AZ zahrnující významnou relokaci taveného koria. Přesné pochopení těchto jevů není zcela možné např. kvůli vysokým teplotám, materiálům s vícero složkami a fázemi nebo proměnlivé geometrické konfiguraci. Díky poznatkům z analýzy TH v TMI-2 byly

⁶V celé kapitole byly využity informace z manuálů pro ASTEC [1, 9] a manuálu pro modul ICARE [10].

v modulu ICARE vyvinuty modely zohledňující dynamiku tvorby taveniny, aby bylo možné předpovídat množství a složení taveniny v DSK, která je v modulu ICARE modelována přístupem 0D. S těmito modely je možné studovat tepelné a mechanické chování struktur a komponent AZ, včetně vnitřních částí reaktoru a zkoumat možnosti chlazení k zastavení postupu tavení.

V souhrnu popisuje modul ICARE degradaci AZ uvnitř TNR až do selhání dna TNR (nebo pro případ IVR strategie až po dlouhodobou stabilizaci koria na dně TNR) a modeluje časnou fázi TH a následně i pozdní fázi TH. Hlavní modely, které lze aktivovat, jsou:

- **Přenos tepla**

Konkrétně se jedná o axiální nebo radiální vedení tepla mezi dvěma komponentami, výměnu tepla mezi tabletkami uranu a pokrytím paliva, výměnu tepla mezi tekutinou a stěnou, a také sdílení tepla radiací.

- **Výkon**

Lze uvažovat výkon generovaný PS nebo v daném materiálu (pouze pro případy simulace experimentálních zařízení, např. s elektricky vyhřívanými sloupci simulujícími palivo).

- **Mechanika PP**

Uvažuje se fenomén bobtnání paliva a praskání pokrytí PP. Dále pak i ztráta integrity PS v závislosti na teplotě a množství zoxidovaného materiálu.

- **Chemie**

Jeho součástí je např. oxidace zirkonia a oceli, rozpouštění UO_2 tekutým zirkoniem nebo oxidace RO z B_4C .

- **Tavení a přemístování materiálu**

Počítá se s tvorbou a 2D pohybem koria (axiální relokace nebo radiální tečení).

- **Chování koria na dně TNR**

Využívá se 2D síťování spodní části stěny TNR kombinované s 0D přístupem pro vnitřní objem. Ten zahrnuje až 3 možné vrstvy koria: těžké kovy, oxidy a lehké kovy. Vznik těchto vrstev a migrace jednotlivých materiálů mezi nimi je řízena rovnovážnými thermochemickými modely s uvažováním zjednodušených fázových diagramů.

- **Porušení spodní části TNR**

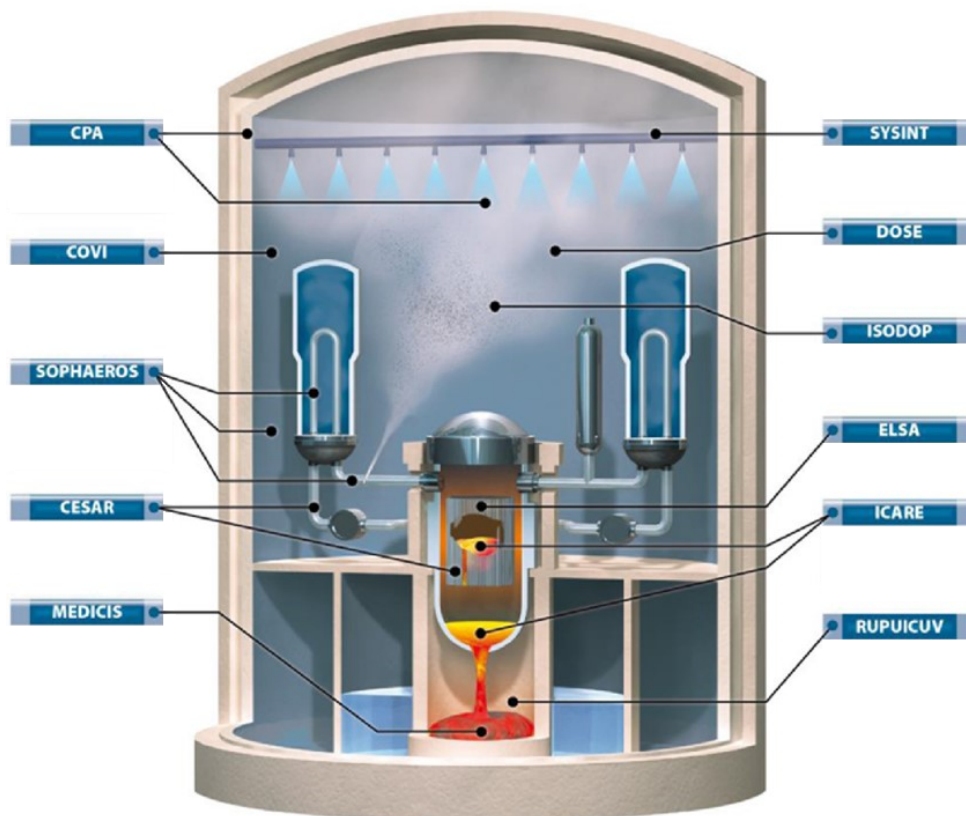
Může se jednat o protavení dna TNR nebo prasknutí vlivem mechanického namáhání (tj. selhání na plasticitu či creep).

- **Ex-vessel chladicí okruh**

Tento okruh modeluje chlazení vnějšího povrchu TNR.

Numerické řešení pro modul ICARE je rozděleno do tří hlavních kroků:

1. Modul ICARE určí relokaci materiálu a také míru oxidace. Následně odhaduje teplotu ve strukturách TNR pomocí Newtonovy metody.
2. Modul CESAR využije aktualizovanou výstupní geometrii poskytnutou z modulu ICARE k určení nového termohydraulického stavu s reálnou dostupností páry pro oxidaci.
3. ICARE použije opravený termo-hydraulický stav k výpočtu konečných teplot komponent AZ a stěny nádoby. Odchytky mezi předpovídaným a opraveným termohydraulickým stavem umožňují přizpůsobit vnitřní časový krok.



Obr. 3.1: Moduly integrálního kódu ASTEC, upraveno z [1]

Součástí výpočetního kódu ASTEC jsou i další moduly viditelné na Obr. 3.1. Jejich účel ve smyslu výpočtu v integrálním kódu je následující:

- **CPA** – termohydraulika v KTMT s modely pro hoření plynů
- **COVI** – okamžité virtuální zahoření
- **SOPHAEROS** – chování aerosolů a chemie ŠP
- **MEDICIS** – interakce betonu a koria
- **SYSINT** – řízení činností bezpečnostních systémů
- **DOSE** – dávkový příkon v KTMT
- **ISODOP** – rozpad radioaktivních izotopů a sledování jejich aktivity
- **ELSA** – uvolnění ŠP z paliva
- **RUPUICUV** – protavení koria do KTMT

Kapitola 4

Změna vstupního modelu pro palivo TVSA-T mod2

Předmětem této práce je upravení dostupného vstupního modelu pro ETE s palivem TVSA-T mod1 na palivo TVSA-T mod2. Výrobce obou paliv je ruská firma TVEL a rozdíly, které jsou převážně konstrukčního druhu, bylo nutné zahrnout v přepracovaném vstupním modelu. Pro obě paliva je uvažován scénář TH s velkou ztrátou chladiva ukončený selháním TNR (kdy všechny aktivní havarijní systémy jsou postulovány jako nefunkční). Následující parametry patří mezi nejdůležitější při zadávání změn do vstupního modelu:⁷

Počet a velikosti DM

U paliva TVSA-T mod2 došlo ke zvýšení počtu DM z 8 na 12. Došlo taktéž k zavedení 3 mísicích mřížek. Vzhledem k vyššímu počtu mřížek v rámci jednoho PS a ke zmenšení jejich vzájemné vzdálenosti byla provedena úprava axiální diskretizace s ohledem na novou pozici každé z mřížek (viz Obr. 4.3). Zároveň došlo k úpravě rozměrové geometrie jednotlivých mřížek a ke změně jejich hmotnosti. Jelikož zirkonium se v sekvenci TH při své oxidaci aktivně podílí na vzniku tepla a tvorbě vodíku, je tato aktualizace jedna z nejvýznamnějších pro průběh TH.

⁷Informace o rozdílech mezi oběma druhy paliva byly převzaty z [11, 19, 24].

Rozměry VT, pokrytí PP a patice PS

Pro VT došlo při uvažování paliva TVSA-T mod2 ke zvětšení jejich vnějšího průměru oproti VT na palivu TVSA-T mod1. Ke změně v průměru došlo rovněž pro pokrytí PP. U patice PS došlo k jejímu zkrácení.

Geometrie palivových tabletek

Palivová tabletky u TVSA-T mod1 obsahovaly centrální otvor. Palivové tabletky PS TVSA-T mod2 centrální otvor již neobsahují.

Hmotnost UO_2

V případě TVSA-T mod2 došlo k navýšení hmotnosti UO_2 oproti TVSA-T mod1, a tedy i k celkovému zvýšení nominální hmotnosti PS. Ta se však ve vstupním modelu explicitně nezadáva – ASTEC ji dopočte z přesných geometrických údajů palivového sloupce a z hustoty paliva získané z MDB.

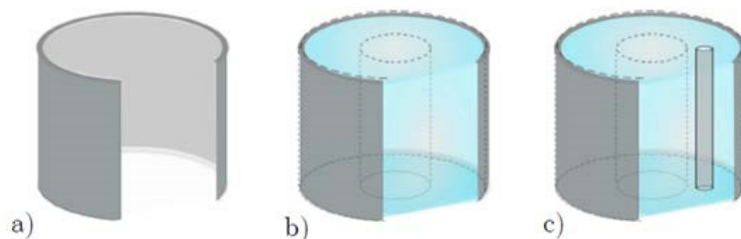
Výpočetní kód ASTEC požaduje zadání přesných hodnot. I když jsou jednotlivé parametry zadány s jistou tolerancí, ve výpočtu byly použity projektové hodnoty. V rámci výpočtu došlo rovněž k zanedbání změn v axiálním a radiálním výkonovém rozložení. Vzhledem k podobnosti paliv byl taktéž použit stejný inventář ŠP v čase odstavení reaktoru, což znamená i stejný průběh zbytkového výkonu od havarijního odstavení reaktoru.

4.1 Nodalizace oblasti TNR pro moduly ICARE a CESAR

Pro modul ICARE/CESAR se zavádí tzv. *makro-komponenta*, která představuje určitý konstrukční celek. Ten je definován svým tvarem a rozměrem. Ve výpočtu jsou využity tvary [10]:

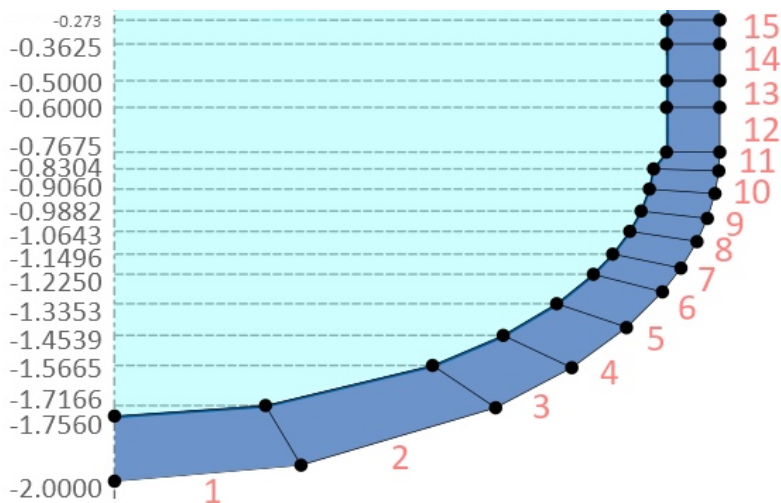
- Válec (CYLINDER)
- Mřížka (GRID)
- Deska (PLATE)

Pro typ válec je nutné zadat jak vnitřní tak vnější průměr a výšku komponenty, včetně radiální pozice v rámci AZ. Využijeme jej pro popis PP, pokrytí paliva, VT a CT, úhelníků, pláště AZ, ŠR a válcovou část TNR. Na Obr. 4.1 lze vidět pro případ a) definici pláště AZ (který byl pro zjednodušení sloučen se šachtou AZ), pro b) volbu rozdělení na 2 radiální termohydraulické kanály a pro bod c) definici makro-komponenty PP.



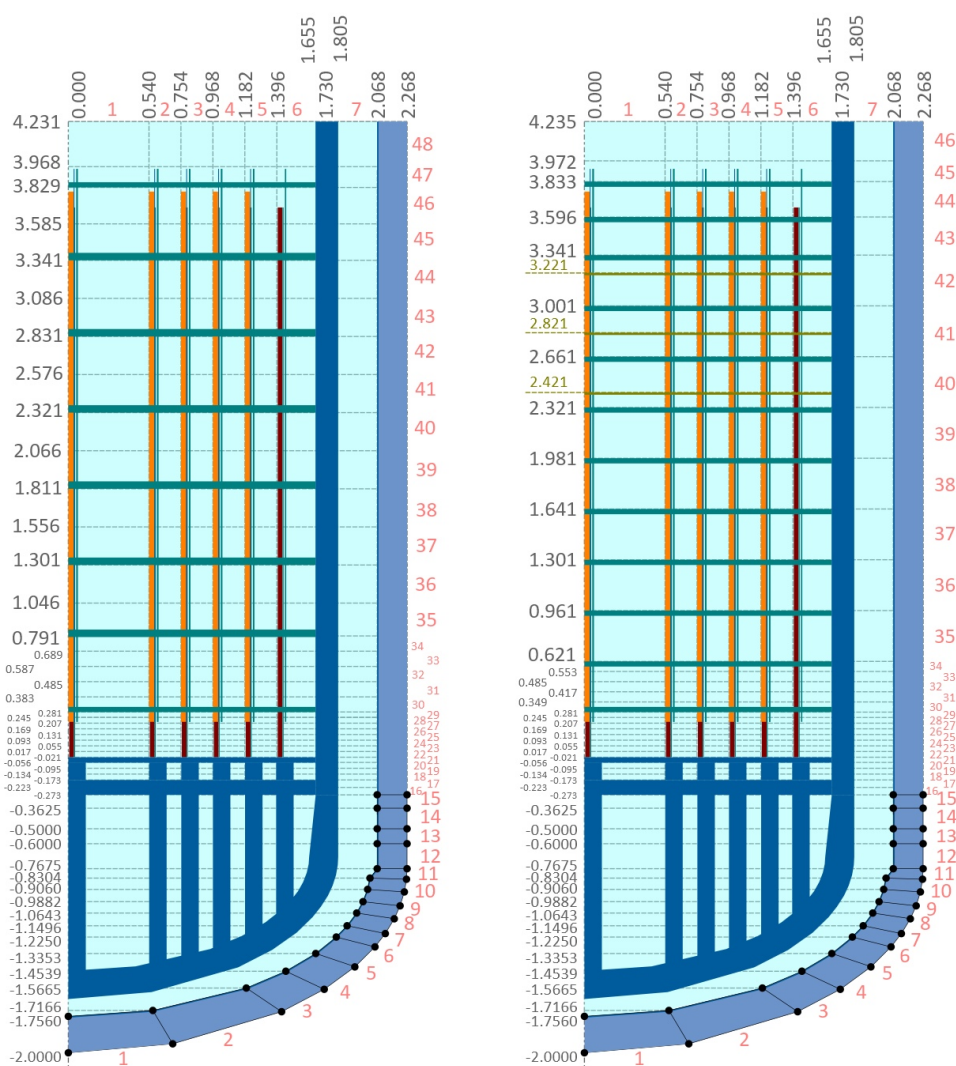
Obr. 4.1: Diskretizace AZ v modulu ICARE, upraveno z [12]

Dále lze využít typ mřížka, který vyžaduje znalost výšky a tloušťky daného materiálu a využívá se pro všechny druhy mřížek. Dolní opěrná mřížka v patičkách PS a nosná deska AZ jsou zadány jako typ deska. DSK je modelována jednou strukturou LOWERPLE, která může obsahovat vnitřní části – podpůrné sloupy a dno šachty AZ. Stěna TNR je rozdělena na 15 axiálních úrovní, což je patrné z Obr. 4.2. Jedná se však pouze o axiální rozdělení stěny TNR, oblast DSK je, jak již bylo zmíněno, modelována jako 0D entita. Radiálně je každý z axiálních segmentů stěny TNR rozdělen do 20 radiálních prstenců. Celkem se tedy stěna TNR v oblasti DSK skládá z 300 dílků – komponent.



Obr. 4.2: Rozdělení stěny TNR na 15 axiálních úrovní

Každá komponenta, která vznikne diskretizací jednotlivých mokro-komponent, má svoje vlastní číslo a je určena svojí pozicí v radiálně-axiálním dělení. Znázornění diskretizace výpočtové oblasti TNR v r-z geometrii a uvedení jednotlivých modelovaných makro-komponent pro paliva TVSA-T mod1, resp. TVSA-T mod2 je vidět na Obr. 4.3. Je zde také barevně rozlišen materiál dané části a to následovně: oranžově je označen B_4C , zeleně slitiny zirkonia, hnědě UO_2 (částečně překrytý absorpčními proutky v případě, že v daném radiálním kanále jsou klastry přítomné), tmavě modře nerezová ocel a světle modře uhlíková ocel. Současně jsou v obrázku zaznamenány kóty radiálních prstenců, vymežujících termo-hydraulické kanály, i axiálních úrovní.



Obr. 4.3: Nodalizace oblasti výpočtu pro moduly ICARE/CESAR včetně všech modelovaných makro-komponent pro palivo TVSA-T mod1 (vlevo) a pro palivo TVSA-T mod2 (vpravo)

Kapitola 5

Analýza výsledků havarijního scénáře pro paliva TVSA-T mod1 a TVSA-T mod2

Pro účely porovnání průběhu TH mezi dvěma různými typy ruských PS byl vybrán scénář iniciovaný velkou ztrátou chladiva – LOCA. K LOCA havárii zde dochází při ekvivalentním průměru 200 mm na studené větvi 4. cirkulační smyčky s připojeným KO. V tomto havarijním scénáři jsou postulovány všechny aktivní havarijní systémy (tedy ty, které vyžadují pro svoji činnost střídavé elektrické napětí) jako nefunkční – tedy se jedná i o SBO událost. Naopak všechny pasivní havarijní systémy (tedy systémy využívající samovolných fyzikálních principů či napájení z baterií) jsou uvažovány jako plně funkční. Mezi ně patří hydroakumulátory (HA), odlehčovací a pojistné ventily KO, pojistné ventily PG a přepouštěcí stanice do atmosféry na parovodech. Uvažovaný scénář byl spočten do času selhání TNR – tedy po dobu in-vessel fáze.

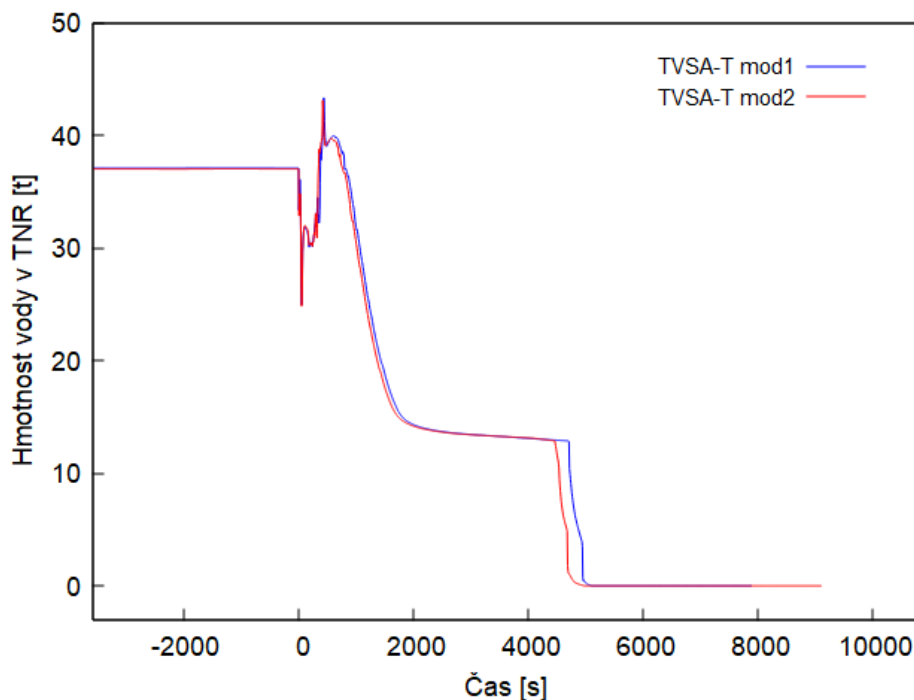
5.1 Porovnání výsledků analyzovaného scénáře dle časových vývoje charakteristických veličin

Srovnání výsledků a průběhů TH je znázorněno na Obr. 5.1 až 5.3, a také v příloze na Obr. A.1 až A.4. V každém z grafů je porovnáván průběh jiné charakteristické veličiny s tím, že palivo TVSA-T mod1 je v grafech vyobrazeno modrou a palivo TVSA-T mod2 červenou barvou. Všechny grafy končí v čase selhání TNR daného

paliva. K selhání TNR v závislosti na konkrétním druhu paliva došlo:

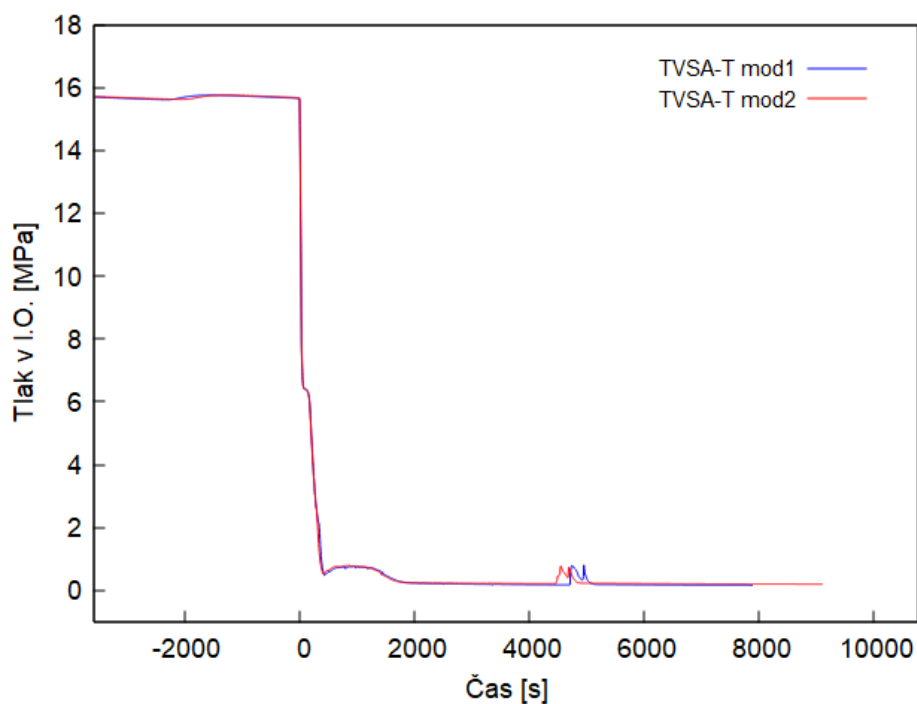
- pro TVSA-T mod1 v 7891 s
- pro TVSA-T mod2 v 9106 s

Na Obr. 5.1 je zachycen průběh hmotnosti vody v TNR. Téměř ihned po postulované iniciační události nastává razantní úbytek vody v reaktoru. K velmi mírnému zpomalení výtoku vody dojde v okamžiku, kdy hladina poklesne pod dolní okraj nátrubku studených větví cirkulačních smyček, čímž dojde ke zpomalení vylévání inventáře chladiva z I.O. otvorem ve studené větvi cirkulační smyčky. Opětovný nárůst vody v TNR je způsoben vylitím HA. Fakt, že k jejich vyprázdnění došlo během pár minut, je patrný z Obr. A.1 v příloze. V grafu průběhu hmotnosti vody v TNR lze pozorovat, že hmotnost chladiva v TNR je po vylití HA o něco vyšší, než byla za normálního provozu reaktoru. To je způsobené tím, že voda má při teplotě okolo 320 °C hustotu cca $680 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, zatímco voda z HA, která má teplotu cca 55 °C, má hustotu rozdílnou, a to blízko $1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Následný pokles množství vody v TNR je způsoben vypařováním vody v zahřívající se AZ. Do tohoto bodu jsou výsledky pro obě paliva srovnatelné. Rozdíl přichází až v posledním výraznějším poklesu v grafu, který je způsobený selháním nosné desky AZ, což vede k relokaci trosk a taveniny do DSK. Kvůli tomu v podstatě veškerá voda z DSK zmizí.



Obr. 5.1: Hmotnost vody v TNR

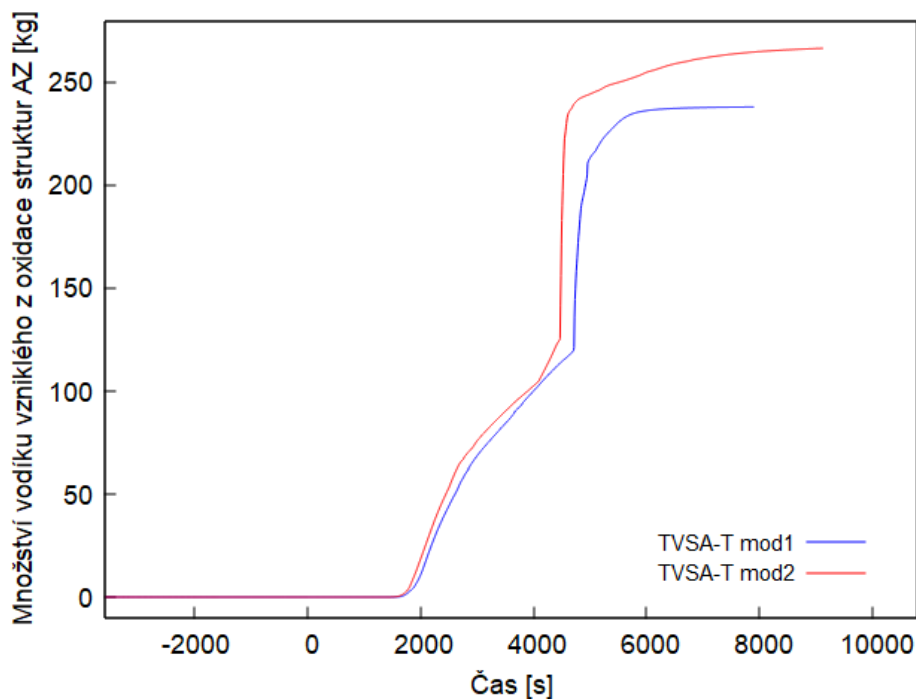
Po vzniku PIU vlivem úniku vody prudce klesá tlak v I.O., což je znázorněno na Obr. 5.2. Pozorovaná změna v trendu poklesu tlaku krátce po vzniku netěsnosti je způsobena vyrovnáním tlaku mezi I.O. a II.O. (cca 6,3 MPa), a tím i k obrácení toku tepla z II.O. do I.O. (inventář I.O. se odtlakováním vychlazuje a naopak sekundární strana PG již není napájena chladnou vodou, tudíž dochází k přestupu tepla ze sekundární strany PG do primární, která začíná vřít a tím se zpomalí pokles tlaku). Pokles hladiny pod dolní okraj studených větví cirkulační smyčky spolu s vyléváním HA způsobuje snížení trendu poklesu tlaku. V grafu je poté patrná oblast zvýšení tlaku přibližně do času 2000 s. To je dáno odpařováním vody z AZ (než hladina vody poklesne pod aktivní část paliva). Následně je v grafu viditelná i tlaková pulzace, která je rozdílná pro jednotlivé druhy paliv. Tato pulzace je způsobena pádem trosek do DSK a následným odparem vody. Rozdílnost času, kdy k tomuto jevu dojde, udává v grafu jiná pozice na časové ose.



Obr. 5.2: Tlak v I.O. (v KO)

Významným indikátorem rychlosti a velikosti degradace AZ je produkce vodíku z oxidických reakcí. Z Obr. 5.3 je patrný dřívější nástup degradace PS v AZ pro palivo TVSA-T mod2. Tento trend je dán především vyšším počtem DM a tím i vyšším množstvím zirkonia v AZ. Prudký nárůst produkce vodíku okolo času cca 5000 s je způsoben produkcí páry z relokovaných trosek a taveniny do vody v DSK. Ty způ-

sobí významnou oxidaci do toho času nezoxidovaných částí AZ. Pro palivo TVSA-T mod2 dojde oproti palivu TVSA-T mod1 rovněž k větší celkové produkci vodíku.



Obr. 5.3: Celkové množství vodíku vyprodukovaného z oxidačních reakcí materiálů AZ s vodní párou

Graf na Obr. A.4 v příloze ukazuje množství trosek, respektive množství taveniny v oblasti AZ. Dominantním členem je pro obě paliva tavenina, a to do momentu selhání nosné desky AZ, kde se tavenina relokuje do DSK. Zde dochází k jejímu zchlazení a tuhnutí. K této relokaci dochází při porovnání paliv dříve pro palivo TVSA-T mod2. Toto palivo má také vyšší zastoupení trosek v AZ v čase selhání TNR.

Porovnání obou paliv v rámci úniku vybraných RaL je viditelné v příloze na Obr. A.2 pro Cs a Obr. A.3 pro I. V obou případech platí, že vlivem prudší a masivnější degradace AZ pro palivo mod2 jsou úniky obou těkavých prvků větší (zejména díky vyšší tepelné produkci z oxidačních reakcí zirkonia v DM).

5.2 Porovnání výsledků analyzovaného scénáře dle 2D snímků stavu AZ

Pro celou sekvenci TH velká LOCA došlo k sestavení 2D snímků zobrazujících postupnou degradaci AZ až do okamžiku selhání TNR. Tyto snímky (viz Obr. B.1 až B.10 v příloze) jsou zobrazeny vedle sebe a znázorňují průběh TH od vzniku PIU až do času selhání TNR pro výpočty beroucí v potaz palivo TVSA-T mod1 (vlevo) a palivo TVSA-T mod2 (vpravo). Přehled začíná v čase 0 s, tedy v čase vzniku PIU (netěsnosti o ekvivalentním průměru 200 mm na studené větvi 4. cirkulační smyčky). Tento okamžik je znázorněn na Obr. B.1 v příloze. Zároveň jsou patrné rozdíly v designu obou paliv. Jak již bylo zmíněno při popisu vstupního modelu, tak DSK je modelována jakožto 1 struktura s parametrickým zadáním vnitro-reaktorových vestaveb.

V čase 1000 s, který je viditelný na Obr. B.2 v příloze, je patrný značný úbytek vody i po vylití HA, ale ještě nedochází k zahřátí PS na teplotu, která by způsobila jejich deformaci. První natavení PS můžeme vidět až na Obr. B.3 v příloze. Současně je v tomto čase přidána legenda znázorněných teplot (uvedených v jednotce Kelvin). V čase 3000 s, který je znázorněn na Obr. B.4 v příloze, vzniká již v horní části AZ kavita kvůli relokaci troskek a taveniny směrem k DSK. Zde je již patrný různý postup relokace a záchyt taveniny na DM pro obě uvažovaná paliva.

Po 4000 s od PIU je značná část taveniny zachycena na dolní ocelové opěrné mřížce. Ta byla v rámci výpočtu modelována jako makrokomponenta PLATE. Z tohoto důvodu výpočet uvažuje menší propustnost této součásti a dochází k většímu záchytu taveniny či troskek. To je patrné z Obr. B.5 v příloze. V rámci dalších akademických činností dojde k přepracování této části výpočtu, aby byla zajištěna větší netěsnost této komponenty. V obrázku je kromě relokující se taveniny (stále v oblasti AZ) vyobrazena ještě DSK zaplněná vodou.

V čase 5000 s již došlo k bočnímu protavení pláště AZ (což může být způsobeno značnými zádržnými schopnostmi pro trosky/taveninu dolních opěrných mřížek) a k relokaci taveniny a troskek do DSK. To je viditelné na Obr. B.6 v příloze. Masivnější relokace taveniny/troskek z oblasti AZ do DSK pro palivo TVSA-T mod1 je způsobené selháním pláště AZ v mírně nižší výšce, takže se z AZ relokují více materiálu (oproti palivu TVSA-T mod2). Výška protavení pláště AZ je však dosti neurčitý parametr, závisující na konkrétním postupu taveniny a troskek. Pro palivo TVSA-T mod1 také dochází k dřívějšímu zaplnění DSK taveninou a tvorbě horní

metalické vrstvy, která je poměrně tenká a díky výborné tepelné vodivosti rozvádí zbytkové teplo laterálně do stěny TNR. V čase 7891 s od vzniku netěsnosti o ekvivalentním průměru 200 mm na studené větvi 4. cirkulační smyčky tak dochází pro palivo TVSA-T mod1 k protavení stěny TNR (viz Obr. B.9 v příloze). V podobný časový okamžik je pro TVSA-T mod2 patrné roztavení většího množství materiálu AZ v porovnání s výpočty pro palivo TVSA-T mod1. To je způsobené, jak je ze snímku patrné, odtavením většího množství materiálu z pláště AZ a selháním nosné desky AZ. Vícero taveniny znamená předávání tepla do větší části stěny TNR, a tedy i její pomalejší degradaci. Následné selhání stěny TNR pro palivo TVSA-T mod2 nastává v čase 9106 s od PIU a je znázorněno v příloze na Obr. B.10.

Závěr

Cílem této práce bylo porovnání dvou typů PS ruského výrobce TVEL na průběh těžké havárie. Uvažovány byly PS typu TVSA-T mod1 a TVSA-T mod2. Pro pochopení vstupního modelu do výpočetního programu ASTEC a pochopení dějů, které při havarijní sekvenci nastanou, je nutné prvně znát principy fungování JE, a také základní a relevantní fenomenologii TH. Proto byla v rámci první kapitoly detailně popsána ETE včetně popisu I.O., II.O. a KTMT této elektrárny. Vyšší zřetel byl brán na popis jaderného paliva, jehož změna byla porovnávána v těžkohavarijním scénáři.

Pro pochopení jevů, které při TH vznikají, a určení jejich míry příspěvků k průběhu konkrétní havarijní sekvence byla ve druhé kapitole rozebrána fenomenologie některých vybraných zásadních jevů doprovázejících rozvoj TH. Zvláštní zřetel byl brán na popis degradace paliva od nafukování pokrytí uvolňovanými plynnými štěpnými produkty až po jeho tavení a následnou formaci a relokaci taveniny či pevných trosků v rámci TNR.

Dále byl v rámci teoretické části popsán integrální výpočetní kód ASTEC. Došlo k popsání jeho struktury a představení jednotlivých zásadních modulů. Detailně byly popsány moduly CESAR a ICARE, s jejichž pomocí byl výpočet pro obě uvažovaná paliva vypracován.

V rámci poslední kapitoly byly popsány převážně konstrukční rozdíly mezi palivem TVSA-T mod1 a TVSA-T mod2. Mezi ty nejvýraznější patří počet a rozměry DM, rozměry patice a hlavice PS, geometrie palivových tabletek a celková hmotnost UO_2 (daná různými rozměry palivové tabletky). Následně byl popsán systém nodalizace pro každý z výpočtů. Posléze byl porovnán průběh TH pro obě paliva. Konkrétně byla simulována TH iniciovaná roztěsněním I.O. na studené větvi 4. cirkulační smyčky o ekvivalentním průměru 200 mm. Jedním z výsledků je čas selhání TNR, který vyšel dříve pro palivo TVSA-T mod1. V oblasti TH existuje mnoho neurčitostí, zejména co se týče postupu hroucení AZ. Pro palivo TVSA-T mod1 na-

stal případ, kdy plášť AZ selhal v nižším bodě, kvůli čemuž se do DSK dostalo více taveniny a dříve se zformoval 3-vrstvý bazén taveniny s tenkou metalickou vrstvou navrchu. Průběh TH byl pro obě paliva srovnán v grafech hmotnosti vody v TNR, hmotnosti vody v HA, tlaku v I.O. a hmotnosti trosk a taveniny v AZ. Došlo též k porovnání množství vyprodukovaného vodíku a množství uvolněného cesia a jódu do KTMT. Zejména zvýšená produkce vodíku potvrdila očekávání, že vyšší hmotnost zirkonia v oblasti AZ způsobí v průběhu TH vyšší produkci vodíku, s čímž též souvisí vyšší produkce tepla v AZ z oxidačních reakcí a postup degradace AZ je tak uspíšený (oproti variantě s menším počtem DM). To způsobuje vyšší únik těkavých ŠP z I.O. do KTMT.

Pro názornou ilustraci rozvoje TH pro oba uvažované PS byly srovnány v identických časech stavy degradované AZ pomocí 2D snímků. Z tohoto srovnání je patrné, že dřívější selhání dna TNR pro variantu paliva TVSA-T mod1 je způsobené tenčí vrstvou lehkých kovů v rámci bazénu taveniny v DSK, což umocňuje tzv. fokusační efekt – soustředění tepelného výkonu po malé výšce v určité oblasti dna TNR.

Literatura

- [1] CHAILAN, L., LABORDE, L. *Overview of the integral code ASTEC V2.2*. Manuál IRSN (BDD-ST SAM-2021-073), 2021.
- [2] DIDIER, J. ET AL. *Nuclear power reactor core melt accidents: Current State of Knowledge*. Francie: EDP Sciences, 2015. ISBN: 978-2-7598-1835-8.
- [3] HASTE, T., PAYOT F. *Phébus FPT3 Final Report*. Tech. rep. IRSN, 2015.
- [4] HEŘMANSKÝ, B. *Bezpečnost jaderných elektráren I*. Učební materiál k přednáškám na KJR FJFI ČVUT, 2011.
- [5] HEŘMANSKÝ, B. *Bezpečnost jaderných elektráren II*. Učební materiál k přednáškám na KJR FJFI ČVUT, 2011.
- [6] HEŘMANSKÝ, B. *Bezpečnost jaderných elektráren III*. Učební materiál k přednáškám na KJR FJFI ČVUT, 2011.
- [7] IAEA. *Safety glossary terminology used in nuclear safety and radiation protection*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022. ISBN 978-92-0-104718-2. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/PUB1830_web.pdf.
- [8] IRSN. *ASTEC: CESAR physical and numerical modelling*. Manuál k modulu CESAR programu ASTEC, 2021.
- [9] IRSN. *ASTEC physical validation Report*. Tech. rep. IRSN (n°IRSN/2021-00272), 2021.
- [10] IRSN. *ASTEC V2.2: Physical modelling of the ICARE module*. Manuál k modulu ICARE programu ASTEC, 2021.
- [11] KOTOUČ, M. *Výchozí parametry palivového systému JE Temelín se soubory TVSA-T pro účely analýz těžkých havárií*. Tech. rep., ÚJV (EGP 5014-F-150672), 2010.
- [12] KOTOUČ, M. *Porovnání průběhu těžké havárie na JE Temelín pro AZ s palivem TVEL TVSA-T mod2 resp. Westinghouse RWFA-13*. Tech. rep., ÚJV (Z-6259-T), 2023.

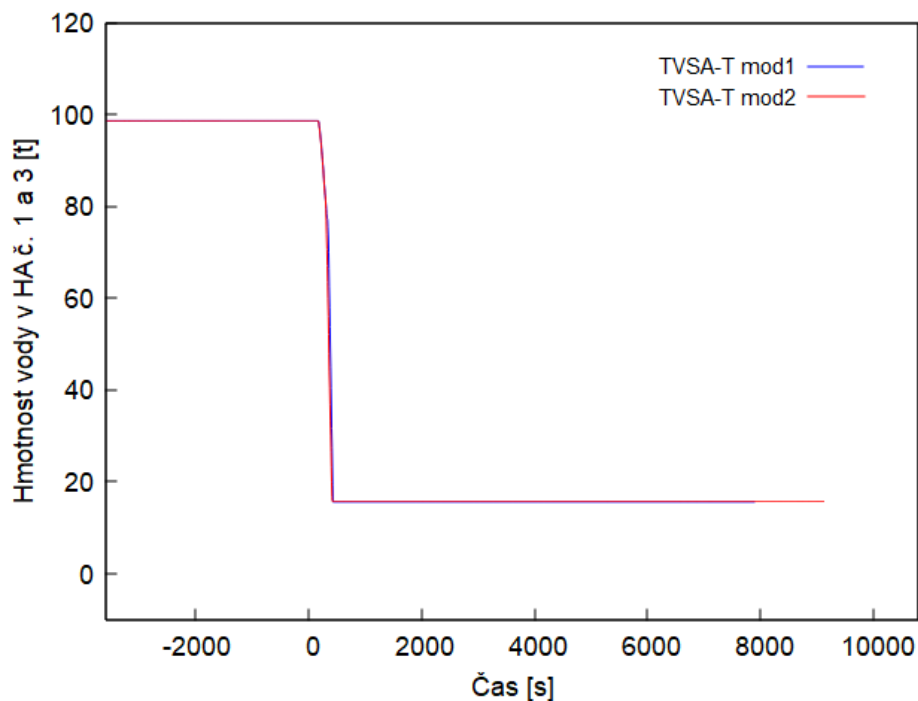
- [13] KYMÄLÄINEN, O. ET AL. Heat flux distribution from a volumetrically heated pool with high Rayleigh number. *Nuclear Engineering and Design* (1994), roč. 149, č.1, s. 401–408. ISSN 0029-5493, Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(94\)90305-0](https://doi.org/10.1016/0029-5493(94)90305-0).
- [14] SEHGAL, B. *Nuclear safety in light water reactors: severe accident phenomenology*, First ed. Academic Press, 2012. ISBN 978-0-12-388446-6.
- [15] SÚJB. INES Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných a radiačních událostí - uživatelská příručka, 2016. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/INES-2008_cz_preklad.pdf.
- [16] SÚJB. Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti: Jaderná bezpečnost BN-JB-2.5 (Rev. 1.0), 2018. Dostupné z : <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/Navod-BN-JB-2-5-Rev1.pdf>.
- [17] SÚJB. Bezpečnostní návod ochrana do hloubky: Jaderná bezpečnost BN-JB-1.5 (Rev. 0.0), 2021. Dostupné na: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/BN-JB-1.5_Rev.0.0_Ochrana_do_hloubky.pdf.
- [18] SÚJB. Deterministické bezpečnostní analýzy postulovaných iniciačních událostí a scénářů DEC B: Jaderná bezpečnost BN-JB-2.3 (Rev.0.0)., 2021. Dostupné na: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/BN-JB-2.3_Rev.0.0_Deterministicke_bezpecnostni_analyzy_postulovanych_iniciacnich_udalosti_a_scenaru_DEC_B.pdf.
- [19] TINKA, I. Vypracování analýz a zpracování dílů 4 a 15 PpBZ pro povolení záměny jaderného paliva v JE Temelín – zavedení paliva TVSA-T.mod 2 v JE Temelín. Tech. rep., ÚJV EGP 5014-F-150672, 2016.
- [20] VEJBORNÝ V. *Těžké havárie jaderných elektráren*. Brno: Učební texty pro přípravu personálu JE, 2015.
- [21] ČERNÝ, V. *Těžké havárie M2 JE VVER 440*. Brno: Učební texty pro přípravu personálu JE, 2019.
- [22] ČESKO. Vyhláška č. 329 ze dne 26. září 2017 o požadavcích na projekt jaderného zařízení. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/329_2017.pdf.
- [23] ČESKO. Zákon č. 263 ze dne 14. července 2016 Atomový zákon. In: Sbíрка zákonů České republiky. Dostupný z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-263>.
- [24] ČEZ. *Palivo a komponenty aktivní zóny reaktoru VVER-1000 JE Temelín*. Brno: Učební texty pro přípravu personálu JE, 2019.

-
- [25] ČEZ. *Primární část JE VVER-1000: Modul 1*. Brno: Učební texty pro přípravu personálu JE, 2021.
- [26] ČEZ. *Primární část JE VVER-1000: Základní zařízení primárního okruhu*. Brno: Učební texty pro přípravu personálu JE, 2017.
- [27] ČEZ. *Sekundární část JE VVER 1000 III.část*. Brno: Učební texty pro přípravu personálu JE, 2021.
- [28] ČEZ. *Sekundární část JE VVER 1000 II.část*. Brno: Učební texty pro přípravu personálu JE, 2021.
- [29] ČEZ. *Sekundární část JE VVER 1000 I.část*. Brno: Učební texty pro přípravu personálu JE, 2021.
- [30] ČEZ. *Těžké havárie M2 JE VVER 1000*. Brno: Učební texty pro přípravu personálu JE, 2021.

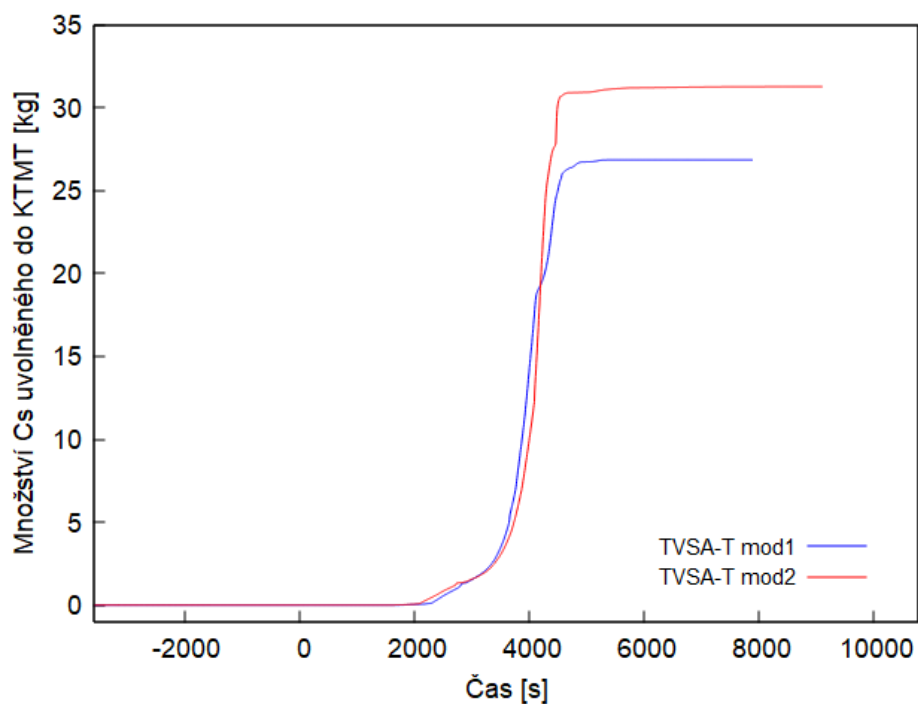
Přílohy

Příloha A

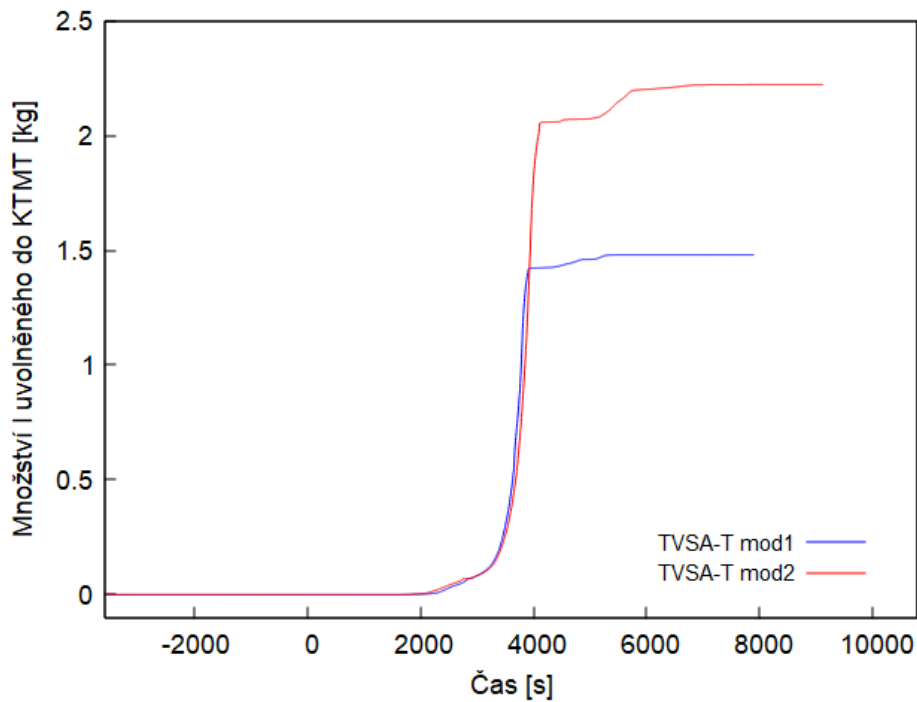
Grafy dalších významných veličin



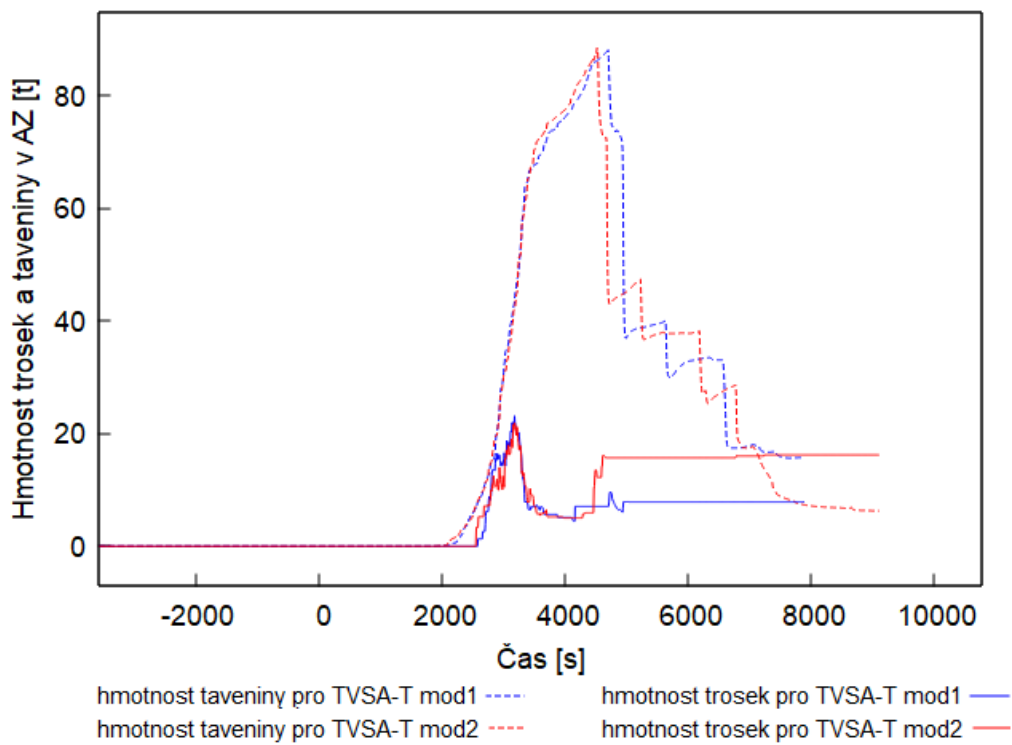
Obr. A.1: Množství vody ve dvou HA vstřikujících nad AZ



Obr. A.2: Množství Cs uvolněného do KTMT



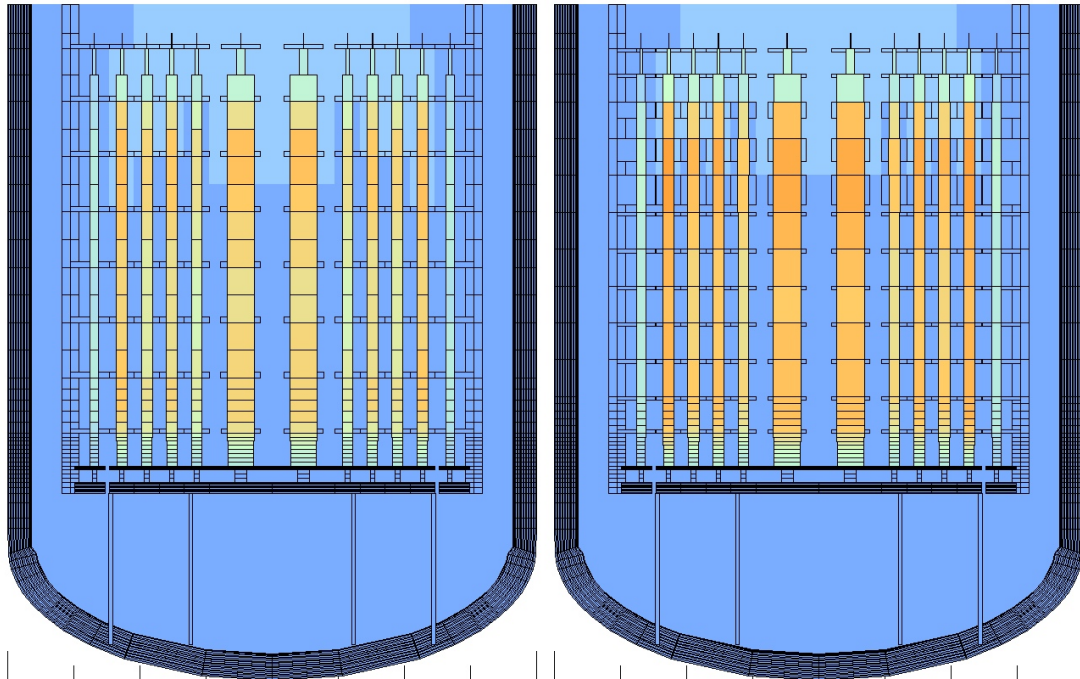
Obr. A.3: Množství I uvolněného do KTMT



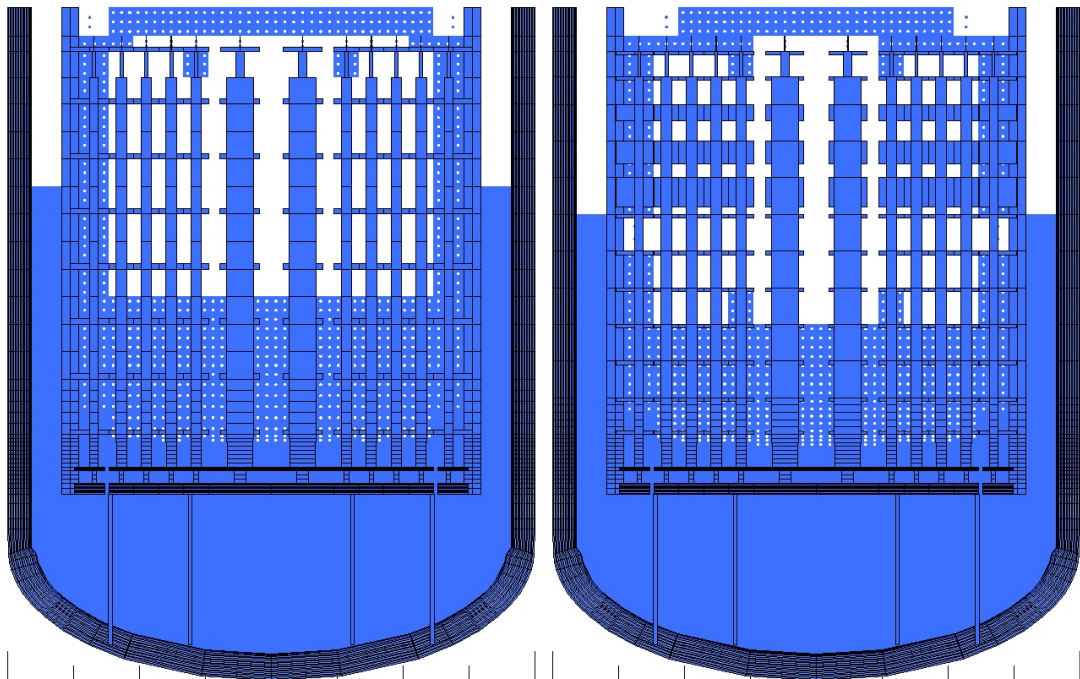
Obr. A.4: Množství pevných trosek a taveniny v oblasti AZ

Příloha B

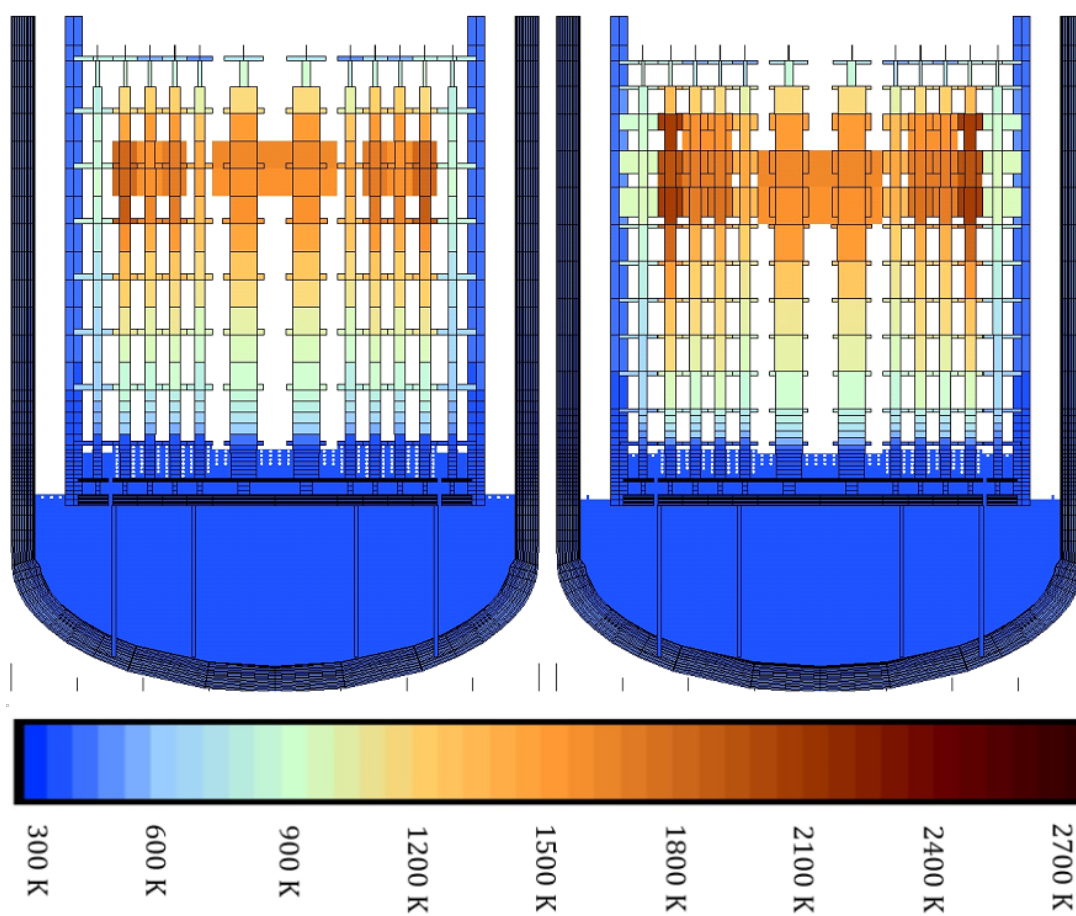
2D snímky postupu degradace AZ



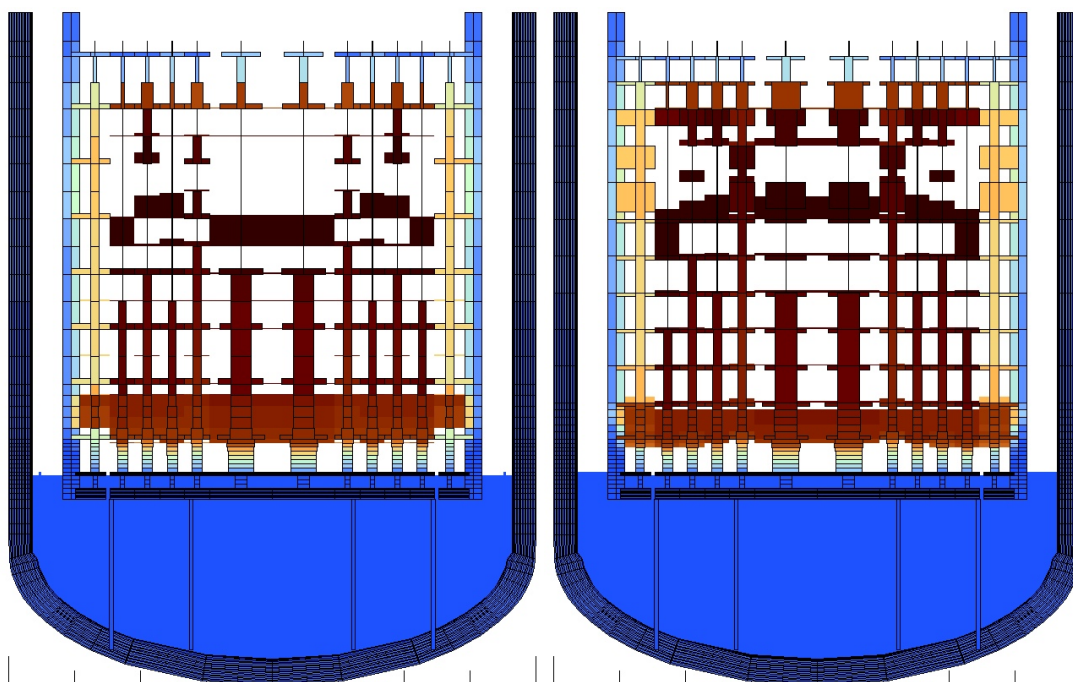
Obr. B.1: Simulace LOCA: stav AZ v čase 0 s pro palivo TVSA-T mod1 (vlevo) a TVSA-T mod2 (vpravo)



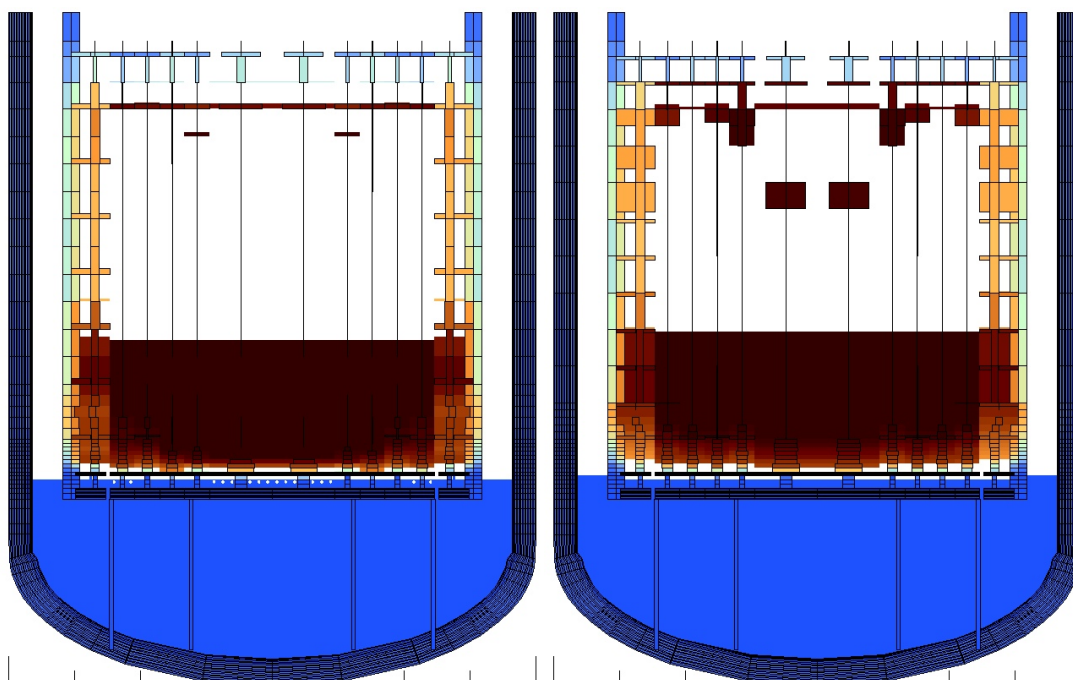
Obr. B.2: Simulace LOCA: stav AZ v čase 1000 s pro palivo TVSA-T mod1 (vlevo) a TVSA-T mod2 (vpravo)



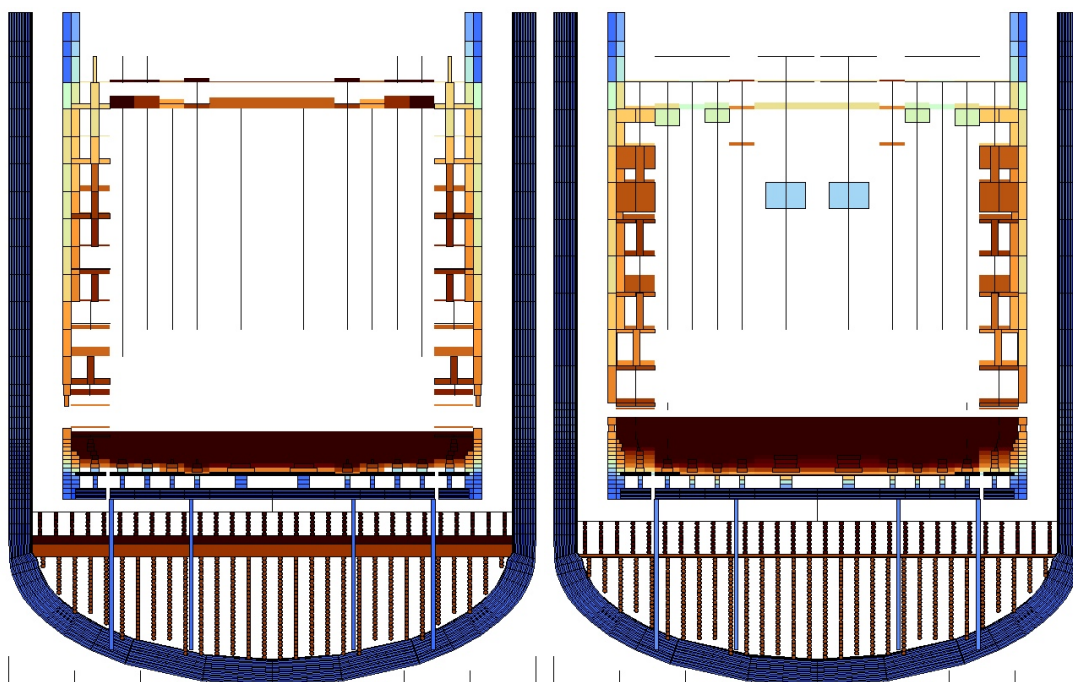
Obr. B.3: Simulace LOCA: stav AZ v čase 2000 s pro palivo TVSA-T mod1 (vlevo) a TVSA-T mod2 (vpravo) s vyznačenou teplotní stupnicí



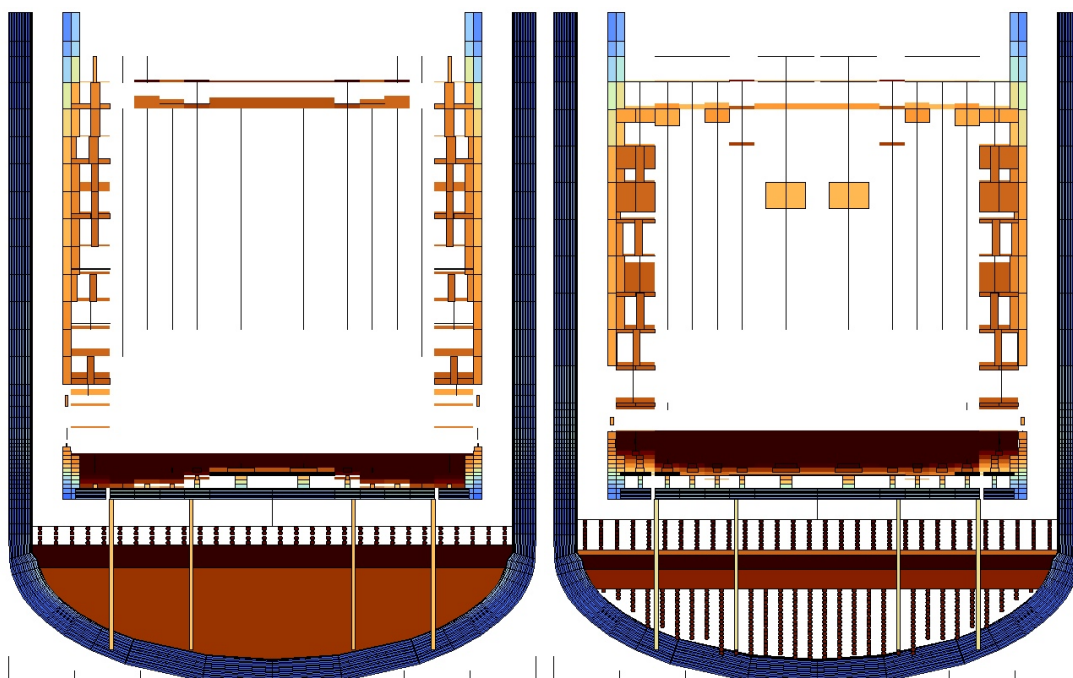
Obr. B.4: Simulace LOCA: stav AZ v čase 3000 s pro palivo TVSA-T mod1 (vlevo) a TVSA-T mod2 (vpravo)



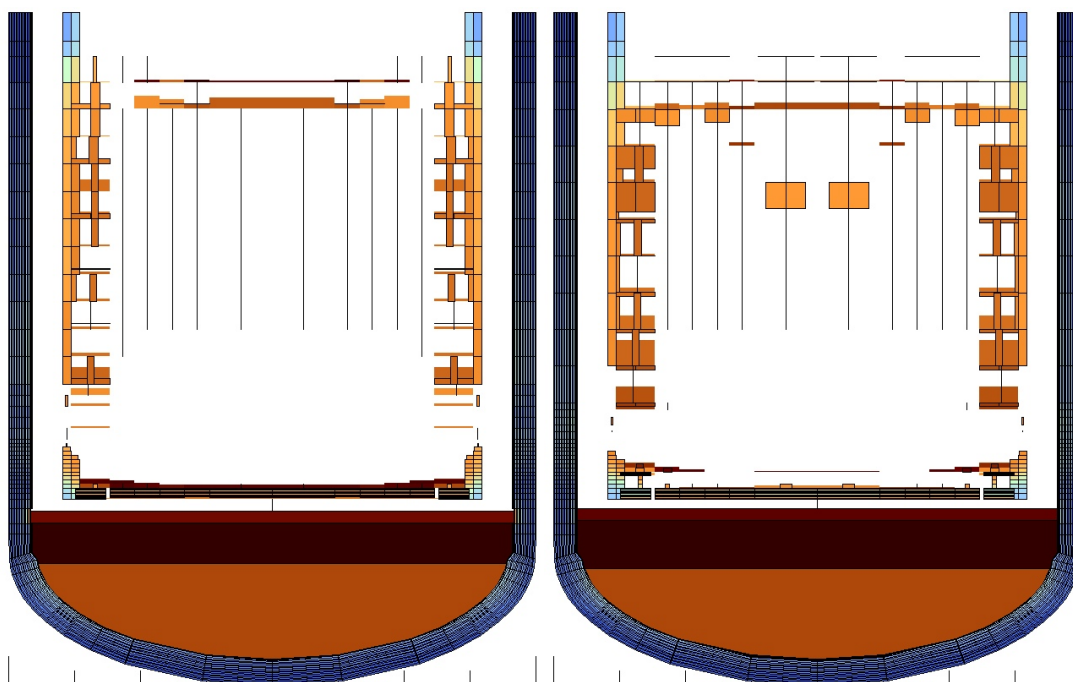
Obr. B.5: Simulace LOCA: stav AZ v čase 4000 s pro palivo TVSA-T mod1 (vlevo) a TVSA-T mod2 (vpravo)



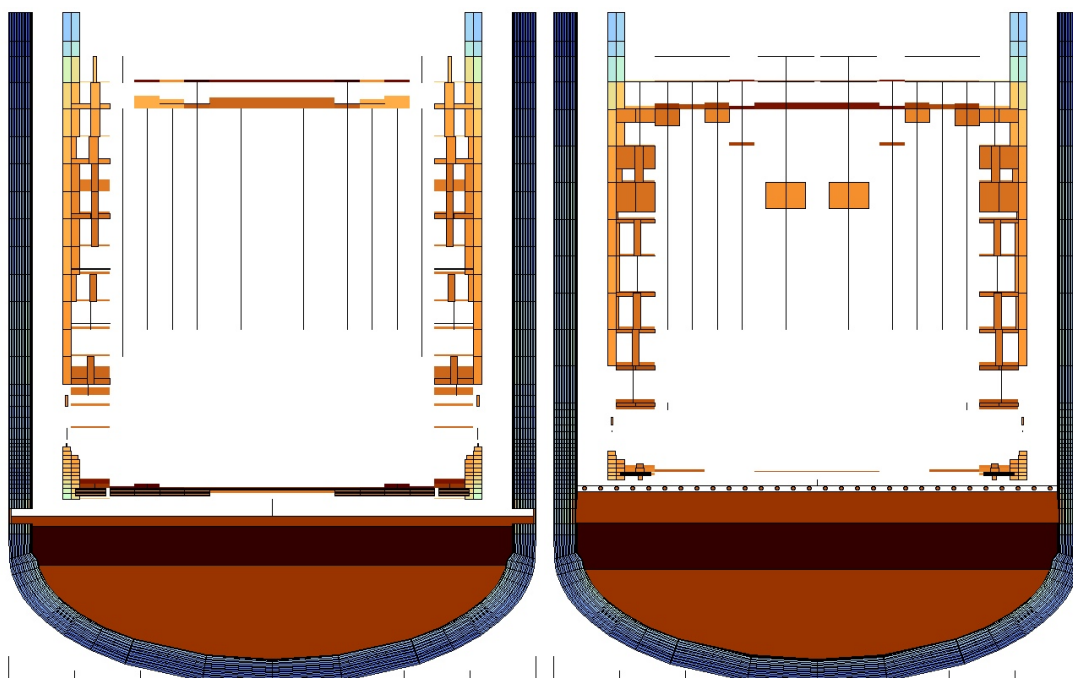
Obr. B.6: Simulace LOCA: stav AZ v čase 5000 s pro palivo TVSA-T mod1 (vlevo) a TVSA-T mod2 (vpravo)



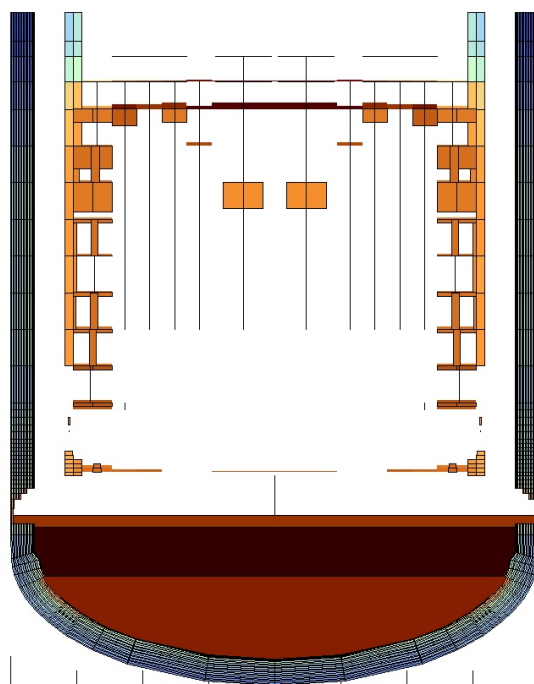
Obr. B.7: Simulace LOCA: stav AZ v čase 6000 s pro palivo TVSA-T mod1 (vlevo) a TVSA-T mod2 (vpravo)



Obr. B.8: Simulace LOCA: stav AZ v čase 7000 s pro palivo TVSA-T mod1 (vlevo) a TVSA-T mod2 (vpravo)



Obr. B.9: Simulace LOCA: stav AZ v čase selhání TNR (7891 s) s použitým palivem TVSA-T mod1 (vlevo) a ve stejném časovém okamžiku s palivem TVSA-T mod2 (vpravo)



Obr. B.10: Simulace LOCA: stav AZ v čase selhání TNR (9106 s) pro palivo TVSA-T mod2