

HODNOCENÍ INTEGRITY TNR V RÁMCI APLIKACE STRATEGIE UDRŽENÍ CORIA PŘI TĚŽKÉ HAVÁRII. NÁVRH PROJEKTU OECD/NEA CAPS A VAZBA NA EXPERIMENT IVMR.

THE RPV INTEGRITY ASSESSMENT WITH RESPECT TO THE CORIUM RETENTION DURING SA. THE OECD/NEA CAPS PROJECT PROPOSAL AND RELATION TO THE IVMR EXPERIMENT.

Jiří Žďárek, Jan Wandrol, Vladislav Pištora, Petr Gál, Vladimír Krhounek a David Bátěk

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Nezbytným požadavkem na úspěšnost strategie udržení Coria uvnitř TNR při těžké havárii (severe accident, SA) je průkaz integrity tlakové nádoby reaktoru. Roztavené Corium uvnitř tlakové nádoby způsobuje tzv. efekt ablace, neboli výrazné zeslabení tloušťky stěny v závislosti na typu vrstev roztaveného Coria a tepelného toku. Vzhledem k zásadní důležitosti průkazu integrity TNR byl vypracován návrh projektu OECD/NEA. Zároveň pokračuje projekt EU HORIZON 2020 „IVMR“ s vazbou i na tento projekt. V prezentaci shrneme návrh postupu a nejdůležitější výsledky.

Abstract

Necessary requirement for success of the Corium retention strategy inside the RPV during the severe accident is the justification of the RPV integrity. Melted Corium inside the RPV leads to the “ablation” effect, in other words it is initiating significant RPV wall thinning with dependence on the Corium pool layers and heat flux profiles. With respect to this principal importance to justify the RPV wall integrity, the OECD/NEA project was prepared. At the same time the EU HORIZON 2020 “IVMR” project continues with strong relation on this project. In our presentation proposed procedure and most important results will be provided.

Úvod

V případě těžké havárie dochází uvnitř reaktoru k roztavení paliva a vnitřních částí reaktoru. Tím dojde ke vzniku tzv. bazénu roztaveného Coria na dnu tlakové nádoby reaktoru (TNR). Nutným předpokladem pro úspěšnost strategie IVMR (In Vessel Molten Corium Retention), tedy udržení taveniny Coria uvnitř reaktoru, je integrita TNR. V tomto případě na nádobu působí několik zátěžných stavů, které nebyly brány v úvahu při jejím projektu, jako např. vysoká teplota uvnitř, chladicí médium na vnější straně nádoby, ablace stěny TNR další. Pro správné posouzení integrity TNR je klíčové znát materiálové parametry i za vysokých teplot – až do teploty tavení materiálu nádoby. TNR je vyrobena z feriticko-perlitického materiálu 15CH2NMFA.

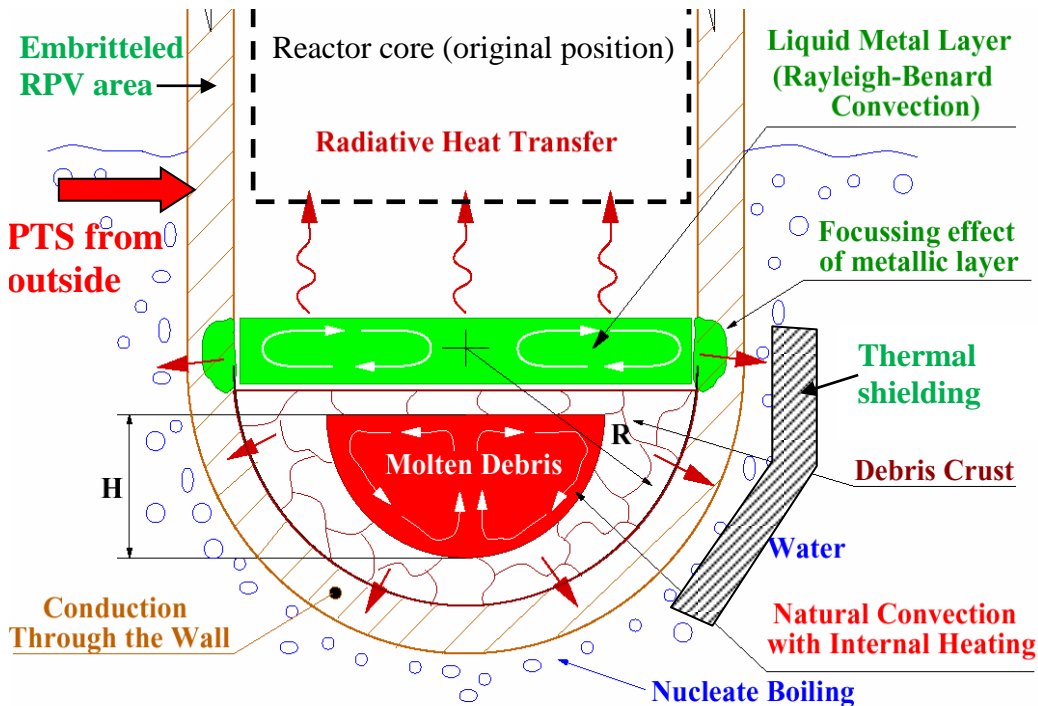
Posouzení TNR během SA

Zátěžné účinky během IVMR na tlakovou nádobu reaktoru

Tlaková nádoba je v případě události SA výrazně zatížena mimo projektové hodnocení. Mezi významné zátěžné účinky, které by měly být brány v úvahu, patří:

- Nadměrný tepelný tok od „bazénu“ Coria na stěnu dna TNR s uvážením efektu „fokusace“ na horní vrstvě Coria (v přechodu mezi dnem a válcovou částí TNR).
- Významný tepelný gradient po tloušťce stěny TNR s rozsahem teploty od cca 150 °C do teploty tavení materiálu. Významný gradient je vyvolán působením chladicí vody na vnějším povrchu a teplotou Coria na vnitřním povrchu TNR.

- Ve vztahu k vysoké teplotě Coria, nastává tzv. „ablation effect“ z vnitřní strany TNR a tím dochází k výraznému snížení tloušťky stěny. Tento jev je závislý na typu bazénu Coria (dvouvrstvá nebo třívrstvá konfigurace), což má za následek jeho různé umístění vzhledem ke dnu TNR. Více je k této problematice uvedeno v [1] a [2].
- Významný vliv creepu (tečení materiálu) na části dna TNR.
- Malé zatížení vnitřním tlakem.
- Zatížení hmotností taveniny a vlastní vahou TNR.



Obr. 14: Dno TNR během SA a ukázka nedůležitějších efektů

V případě IVMR by TNR měla být posouzena z následujících hledisek:

V případě ablace stěny TNR by měla zbylá tenká vrstva stěny TNR vydržet zatížení hmotností Coria a vlastní vahou, plus malé zatížení vnitřním tlakem.

Odolnost k náhlému lomu v případě teplotního šoku z vnější strany TNR v místě dna nádoby vyvolaného vnějším chlazením (teplota nádoby je při začátku chlazení vysoká, a naopak teplota chladiva je velmi nízká).

Zajištění dostatečné mezery mezi TNR a teplotním stíněním, nebo deflektorem – toto souvisí s teplotní deformací (roztažností) TNR.

Posouzení TNR během SA pomocí MKP – statické hodnocení

Pro vyhodnocení TNR během SA je dostačující 2D rotačně symetrický konečně-prvkový model (MKP). Na MKP modelu bude řešena teplotně mechanická úloha. V případě teplotní úlohy jde o řešení nestacionárního rozložení teplotního pole ve stěně TNR. Do výpočtu vstupují okrajové podmínky přestupu tepla od bazénu s Coriem – vnitřní povrch. Dále teplota chladiva a koeficient přestupu tepla na vnějším chlazeném povrchu.

Do řešení je nutné zahrnout elasto-plastické a také creepové chování materiálu a zohlednit efekt ablace stěny TNR. Pro řešení takové úlohy je důležité znát materiálové parametry až do bodu tání materiálu (nestandardní požadavek). Většina materiálových parametrů je dostupná do teploty 350 °C, například [3]. To umožní zohlednit efekt ablace stěny TNR ve výpočtu.

Nutné materiálové vlastnosti, v rozsahu až do bodu tání, pro výpočtové posouzení:

Termo-fyzikální vlastnosti:

- hustota ρ , koeficient teplotní roztažnosti materiálu α , tepelná vodivost λ , měrné teplo c ,
- pro řešení efektu ablace latentní teplo tání a teplota tavení materiálu.

Mechanické vlastnosti získané pomocí tahových zkoušek:

- Youngův modul pružnosti E , mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m , rovnoměrná tažnost A_m a celkové prodloužení při roztržení vzorku A .

Creepové vlastnosti:

- Vstupní údaje pro creepový materiálový model v závislosti na teplotě a dostupné materiálové vlastnosti i z tlakových experimentálních testů.

Cíle výpočtového hodnocení pomocí MKP

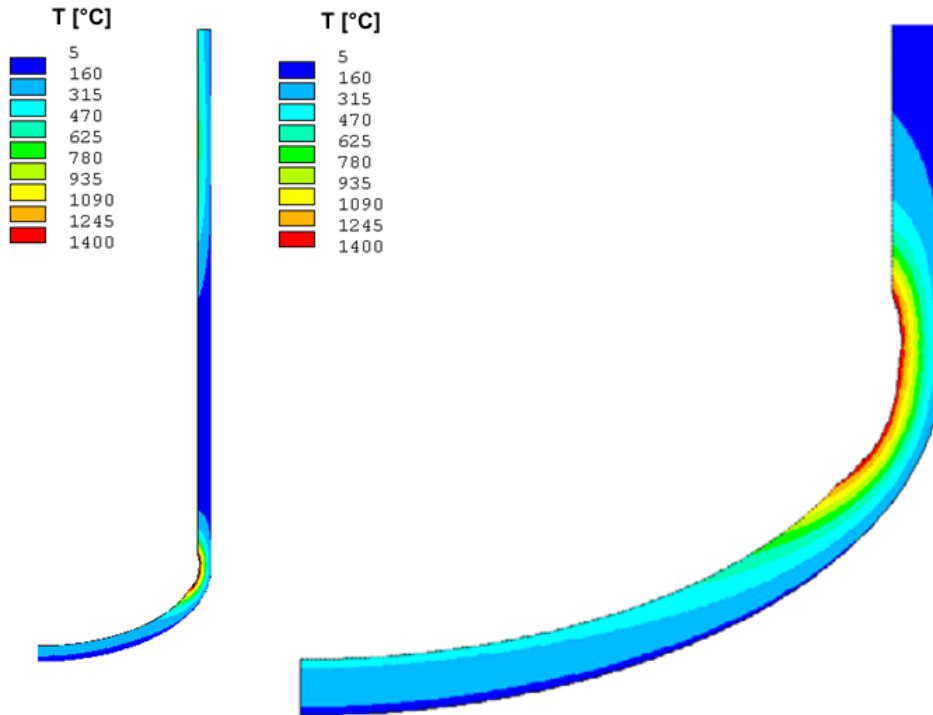
Z řešení je potřeba stanovit rozložení teplot a napětí ve stěně TNR. Vystává otázka, jakým způsobem hodnotit napjatost a stanovit dovolené napětí. Z důvodu velkého teplotního gradientu ve stěně TNR je velký rozptyl materiálových vlastností.

Vyhodnocení posunutí dna TNR ve vztahu k teplotnímu stínění (Thermal shielding, deflektor). V případě velkých posunutí by došlo ke zmenšení mezery mezi TNR a teplotním stíněním, nebo deflektorem. Při výrazném zmenšení mezery, by došlo ke ztrátě chlazení TNR z vnější strany.

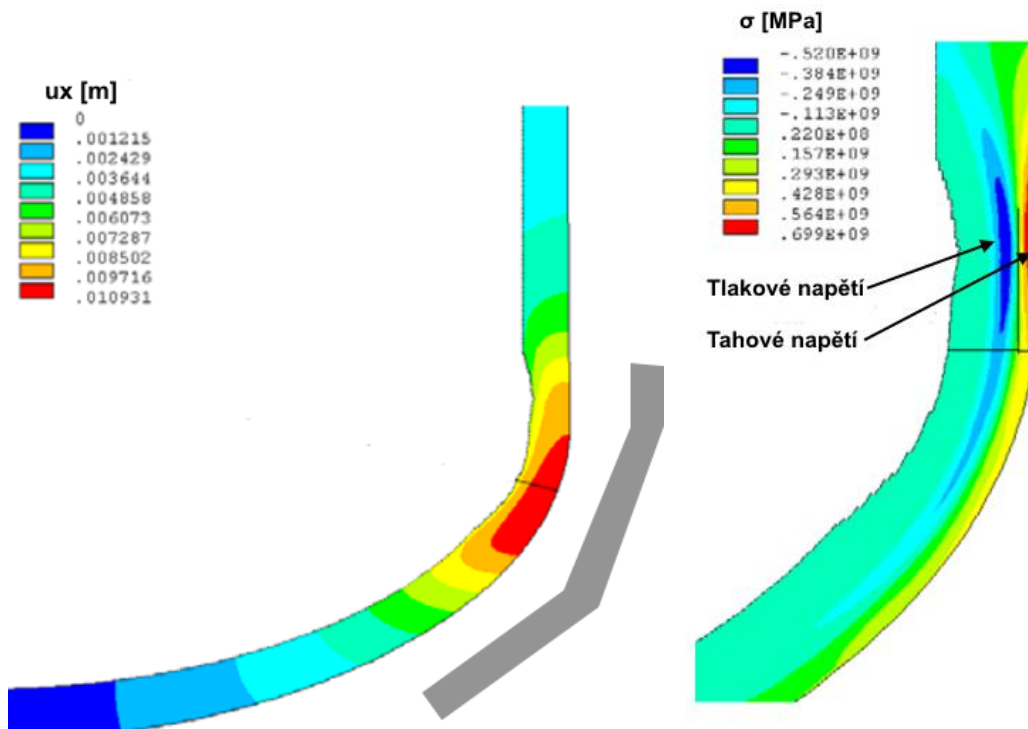
Dalším bodem výpočtového hodnocení je stanovení minimální tloušťky stěny TNR (ablation effect) a vyhodnocení její únosnosti.

Níže jsou uvedeny ukázkové výsledky z výpočtového hodnocení v místě dna TNR při SA z benchmarku *OLHF-1* [4]. Z rozložení pole teplot (viz obr. 2) je patrné, že teplotní gradient je značně vysoký. Teplota se pohybuje od cca 150 °C do teploty tavení materiálu, cca 1300 °C. Z rozložení pole posunutí je patrné, že hodnota radiálního posunu dosahuje téměř 11 mm (viz obr. 3) a to v místě přechodu mezi dnem a válcovou částí TNR. Napjatost je v tomto místě ovlivněna snižující se tloušťkou stěny (ablation effect) a také creepovým chováním materiálu. Na vnějším povrchu je napjatost tahová, zatímco uprostřed stěny TNR je napjatost opačné orientace, tedy tlaková.

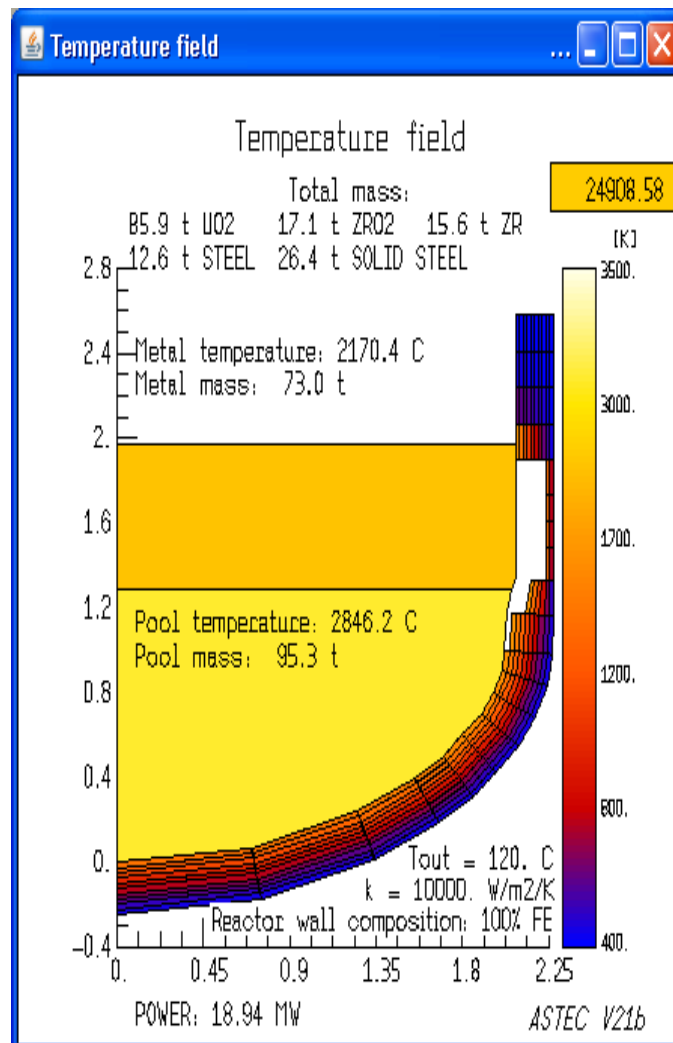
Na obr. 4 je uvedeno rozložení teplot ve dnu nádoby při SA v reaktoru *VVER 1000*. Jde o rozložení při dvouvrstvé konfiguraci bazénu. Hmotnost bazénu Coria je 95 tun a jeho teplota je cca 2250 °C po 7 hodinách. Je patrné, že v místě horní vrstvy došlo k odtavení stěny nádoby a zůstala pouze tenká vrstva materiálu, viz [5].



Obr. 2: Rozložení teplotního pole při SA ve stěně TNR, detail na dno TNR [4]



Obr. 3: Vykreslení pole posunutí ve dnu TNR a rozložení pole napjatosti v místě ablace vnitřního povrchu TNR [4]



Obr. 4: Rozložení teplotního pole v bazénu Coria (dvouvrstého) a ve dnu nádoby TNR se zohledněním ablace stěny [5]

Závěr

Byl popsán postup zhodnocení TNR při SA s cílem udržení taveniny Coria uvnitř nádoby TNR. Při SA je TNR značně nestandardně zatížena, a proto je důležité správně vyhodnotit její integritu. K tomu jsou potřebné materiálové vlastnosti z tahových zkoušek až do bodu tání materiálu a creepové zkoušky i při tlakovém zatížení. Z ukázkových výsledků je zřejmé, že efekt ablace stěny v místě přechodu dna a válcové části TNR bude mít významný vliv na chování nádoby. Mohlo by také dojít k významné redukci mezery mezi TNR a teplotním stíněním, deflektorem což by negativně ovlivnilo vnější chlazení TNR.

Protože integrita TNR při SA hraje zásadní roli, byl vypracován a podán návrh projektu OECD/NEA s názvem *CAPS – RPV Integrity Assessment during IVMR ERVC SA*. Dle prvotních předpokladů **bude projekt podpořen pracovními skupinami WGIAGE i WGAMA.**

Literatura

- [1] Loktionov, V., Mukhtarov, E., Lyubashevskaya, I. (2018): *Features of heat and deformation behavior of a VVER-600 reactor pressure vessel under conditions of inverse stratification of corium pool and worsened external vessel cooling during the severe accident. Part 1. The effect of the inverse melt stratification and in-vessel top cooling of corium pool on the thermal loads acting on VVER-600's reactor pressure vessel during a severe accident.* Nuclear Engineering and Design, Vol. 326, pp. 320-332. ISSN 0029-5493
- [2] Loktionov, V., Mukhtarov, E., Lyubashevskaya, I. (2018): *Features of heat and deformation behavior of a VVER-600 reactor pressure vessel under conditions of inverse stratification of corium pool and worsened external vessel cooling during the severe accident. Part 2. Creep deformation and failure of the reactor pressure vessel.* Nuclear Engineering and Design, Vol. 327, pp. 161-171. ISSN 0029-5493
- [3] http://steelcast.ru/steel_for_atomic_reactors
- [4] Nicolas, L., Durin, M., Koundy, V., et al. (2003): *Results of benchmark calculations based on OLHF-1 test.* Nuclear Engineering and Design, Vol. 223, pp. 263-277. ISSN 0029-5493
- [5] Grah, A., Sangiorgi, M., et al. (2016): *In-Vessel Melt Retention (IVMR), Analysis of a VVER-1000 NP – Study.* JRC TECHNICAL REPORTS, Joint Research Centre.