

HODNOCENÍ INTEGRITY TNR V PŘÍPADĚ APLIKACE STRATEGIE IVMR V RÁMCI PROJEKTŮ OECD/NEA A IAEA CRP

THE RPV INTEGRITY ASSESSMENT FOR THE IVMR STRATEGY, STATUS OF WORK DURING CONTINUING OECD/NEA AND IAEA/CRP PROJECTS

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

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Hodnocení integrity TNR v případě strategie IVMR je jedním z nejdůležitějších výsledků, zda tlaková nádoba reaktoru vydrží velmi silné zeslabení tloušťky stěny vlivem odtavení v bazénu Coria. S ohledem na závažnost tohoto hodnocení byl schválen projekt OECD/NEA v rámci spolupráce WGIAGE a WGAMA. Paralelně s tímto projektem byl schválen projekt IAEA CRP (Coordination Research Project) určit PIRT (Phenomena Identification Ranking Table), Validační matici a Benchmark s podpořením strategie IVMR (In Vessel Melt Retention). ÚJV se aktivně účastní obou projektů s funkcí koordinátora. Oba projekty budou dokončeny až v roce 2024. Základní cíle obou projektů budou shrnuty, včetně účasti ÚJV.

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 another 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 WGAMA-WGIAGE was approved and started. Also was approved the IAEA CRP (Coordination Research Project) to determine the PIRT (Phenomena Identification Ranking Table), Validation matrix and Benchmark to confirm the IVMR strategy. ÚJV actively participate in both projects. Both projects will be finished in 2024. Principal targets and present status of both projects 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.

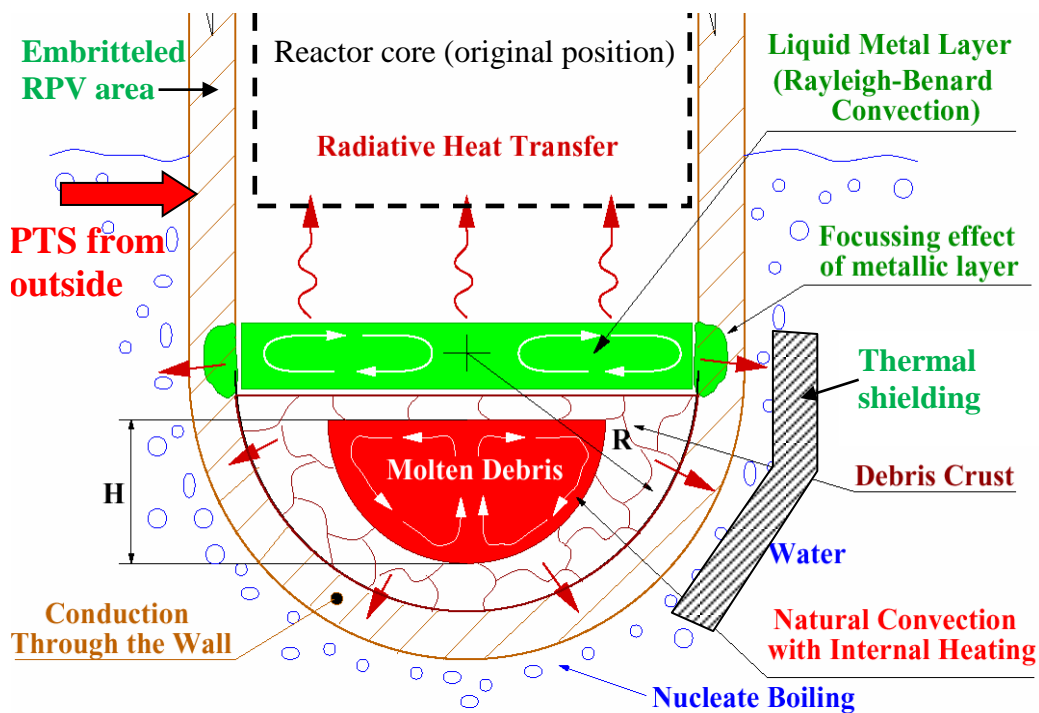
V našem příspěvku na začátku shrnujeme materiálovou problematiku a hodnocení pomocí MKP, včetně určení nejdůležitějších cílů. Všechny uvedené cíle jsou rovněž součástí probíhajícího projektu TAČR. Prakticky se shodnými cíli byl definován projekt OECD/NEA jehož status je uveden v závěru a kde se ÚJV aktivně podílí, včetně spolupráce na projektu IAEA CRP PIRT jehož status je rovněž stručně uveden v závěru.

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 [2] a [3].
- Významný vliv creepu (tečení materiálu) na části dna TNR.
- Malé zatížení vnitřním tlakem.
- Zatížení hmotností taveniny a vlastní vahou TNR.



Obr. 1: Dno TNR během SA a ukázka nedůležitějších efektů

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

1. V případě ablace stěny TNR by měla zbylá tenká vrstva stěny TNR vydržet zatížení hmotností Coria a vlastní vahou, plus malé zatížení vnitřním tlakem.
2. 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).
3. Zajištění dostatečné mezery mezi TNR a teplotním stíněním, nebo deflektorem – toto souvisí s teplotní deformací (roztlačností) 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 chladiwa 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 [1]. 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

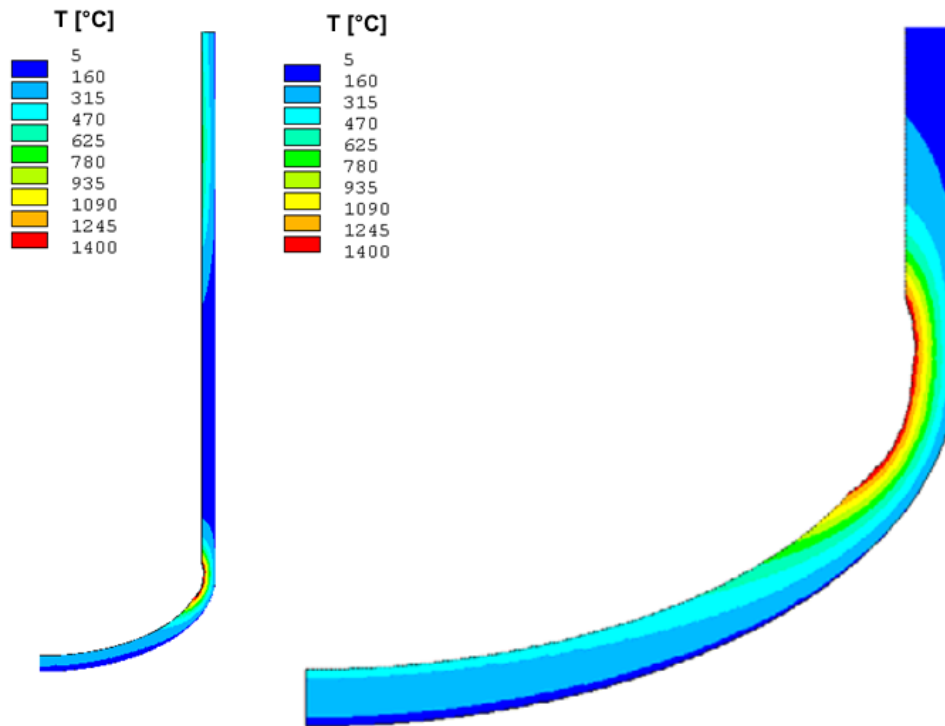
Z řešení je potřeba stanovit rozložení teplot a napětí ve stěně TNR. Vystává otázka, jakým způsobem hodnotit napjatost a stanovit dovolené napětí. Z důvodu velkého teplotního gradientu ve stěně TNR je velký rozptyl materiálových vlastností.

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.

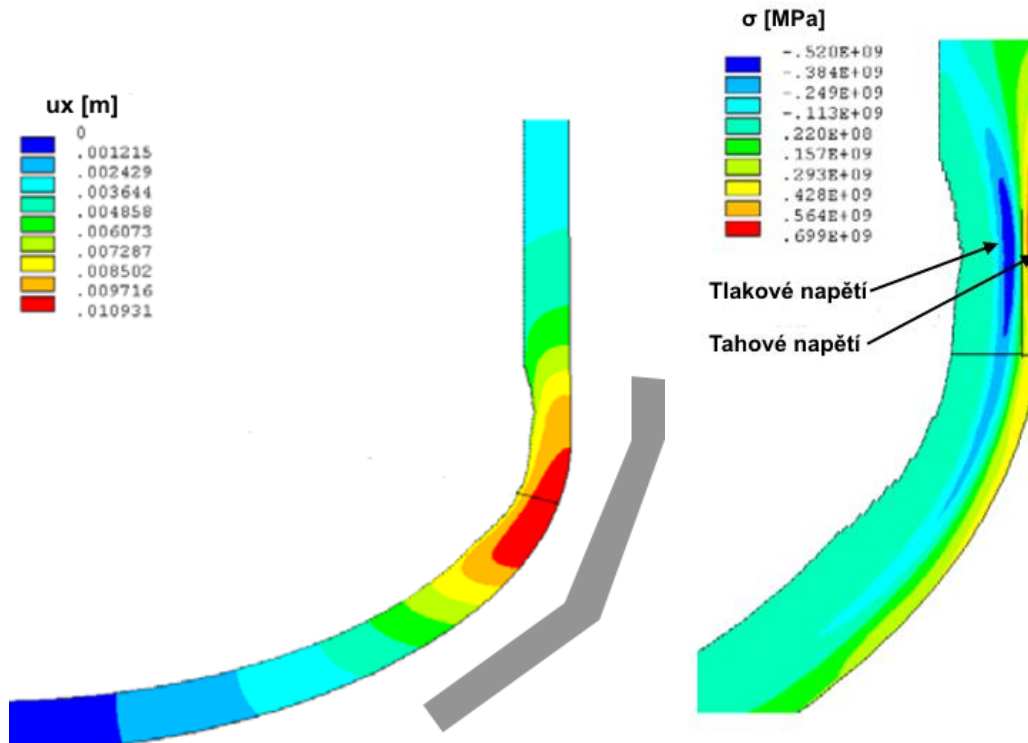
Dalším bodem výpočtového hodnocení je stanovení minimální tloušťky stěny TNR (ablation effect) a vyhodnocení její únosnosti.

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.

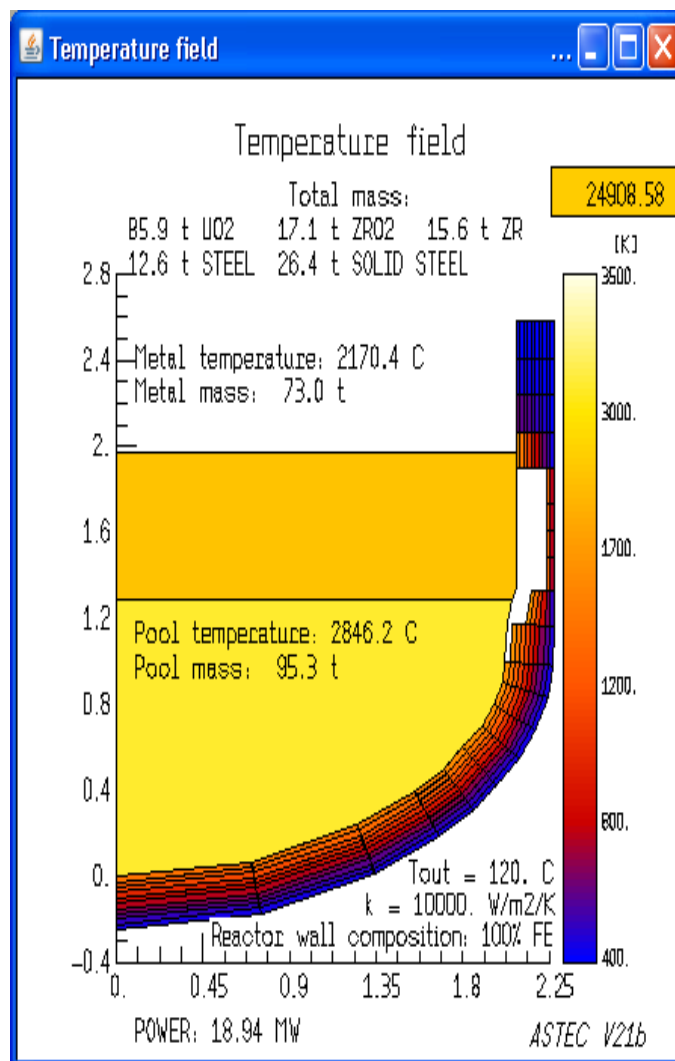
Na obr. 4 je uvedeno rozložení teplot ve dnu nádoby při SA v reaktoru *VVER 1000*. Jde o rozložení při dvouvrstvé konfiguraci bazénu. Hmotnost bazénu Coria je 95 t a jeho teplota je cca 2250 °C po 7 hodinách. Je patrné, že v místě horní vrstvy došlo k odtavení stěny nádoby a zůstala pouze tenká vrstva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

Současný stav projektu OECD/NEA a IAEA CRP

Oba projekty byly zahájeny na začátku roku 2021. Projekt OECD/NEA „Status Report on RPV Integrity“ byl rozdělen na tři sekce. Sekce č. 1 „Materiálová databáze“, Sekce č. 2 „Hodnocení Integrity“ a Sekce č. 3 „Kritéria a Metodologie hodnocení“. Každá sekce má dva klíčové vedoucí. Pro rok 2021 je stanoven cíl vypracovat „Draft Status Report“ k problematice každé sekce. V roce 2022 budou provedeny Review dílčích Status Reportů a následně v roce 2023 bude zpracován Final Status Report. Pro efektivní přípravu dokumentace byly již uskutečněny dvě video konference vedoucích projektů a jedna video konference se všemi účastníky zainteresovaných zemí. První drafty Status Reportů ze všech sekcí budou projednány na video konferenci se všemi účastníky projektu na konci září 2021.

Projekt IAEA CRP PIRT měl zatím jednu společnou videokonferenci všech účastníků zainteresovaných zemí. Další videokonference všech účastníků je plánována na konci října 2021.

Vedení obou projektů OECD a IAEA mělo jednu společnou videokonferenci v polovině roku a další videokonference je plánována na konec 2021. Je velmi důležité, že oba projekty budou navzájem spolupracovat a sdílet získané výsledky.

Literatura

- [1] Markov, S.I., Durinin, V.A., Mokhov, V.A. (2013): *Steel grades 15Kh2NMFA, 15Kh2NMFA, 15Kh2NMFA-A Class 1 for reactor VVER-TOI*, [online]. Available at: http://steelcast.ru/steel_for_atomic_reactors
- [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 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
- [3] 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
- [4] Nicolas, L., Durin, M., Koundy, V., Mathet, E., Bucalossi, A., Eisert, P., Humphries, L., Smith, J., Sievers, J., Smith, J., Pistora, V., Ikonen, K. (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.