

CO PROVĚŘIT U NOVÝCH JE Z HLEDISKA ZVLÁDÁNÍ TĚŽKÉ HAVÁRIE

WHAT TO CHECK AT DEVELOPED NPP FROM THE POINT OF VIEW TO MANAGE SEVERE ACCIDENTS

Jiří Žďárek, Jan Wandrol, Miroslav Kotouč, David Bátěk a Petr Gál

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Velká část nově budovaných nebo projektovaných JE ve světě chce využít, pro zvládnutí hypotetických těžkých havárií, koncepci zadržení roztavené aktivní zóny (tzv. coria) uvnitř tlakové nádoby reaktoru (TNR) odvodem tepla z vnějšího povrchu nádoby přes zaplavenou šachtu reaktoru (tzv. strategie IVMR-ERVC – In-Vessel Melt Retention by External Reactor Vessel Cooling). Tato strategie byla navržena již v 90. letech pro projekt JE AP-600 a byla doposud mimo jiné zpětně implementována na většině jaderných bloků s reaktory VVER-440 (prvním byla finská JE Loviisa). Pro reaktory vyšších výkonů (cca 3000 MWth) je nutné minimalizovat nepřesnosti a potvrdit nové poznatky o chování bazénu coria uvnitř TNR. V roce 2020 budou zahájeny dva významné projekty v rámci IAEA a OECD/NEA s cílem potvrdit realizovatelnost strategie IVMR-ERVC právě pro bloky vyšších výkonů. ÚJV se aktivně zúčastní obou projektů. Jsou shrnuty nejdůležitější poznatky a příspěvky ÚJV do obou projektů, a i zásadní podmínky pro úspěšné zvládnutí těžké havárie (TH) aplikací strategie IVMR-ERVC.

Abstract

Large number of recently developed NPP designs has implemented the In-Vessel Melt Retention (IVMR) strategy to manage hypothetical severe accidents. This strategy, more precisely denoted IVMR-ERVC (i.e. IVMR by External Reactor Vessel Cooling), is based on heat removal from the outer RPV surface into the coolant (water) in a flooded reactor cavity. The strategy was developed in the 90's for the AP-600 reactor design, and recently has been applied (in the frame of a "back-fitting" program) to most of the VVER-440 units worldwide (the first one being the Loviisa NPP in Finland). For units with higher thermal power outputs (around 3000 MWth) it is necessary to minimize uncertainties and to confirm the outcomes of recent studies related to corium (i.e. molten core) pool behavior inside the RPV. In the year of 2020 two important projects will start under the management of IAEA and OECD/NEA, having for target confirmation of the applicability of the IVMR-ERVC strategy to high-powered units. ÚJV will actively participate in both projects. In our presentation, crucial ÚJV's knowledge and expertise are provided, summarizing necessary conditions needed to successfully mitigate severe accidents by application of the IVMR-ERVC strategy. The intended ÚJV contribution to both international projects is to be tackled as well.

Úvod

Jedním z problémů při potvrzení úspěšnosti strategie IVMR-ERVC jsou značné nejistoty fyzikálního modelování coria ve spodní části dna TNR a tranzitních chemických a fyzikálních reakcí s materiálem TNR, které vedou k výrazné ablaci stěny TNR. Od počátečních hodnocení vytvořených v devadesátých letech pro AP-600 a Loviisa VVER-440, znalosti o bazénu coria (termochemie a charakteristiky přenosu tepla) a mechanického chování TNR významně pokročily a je nyní možné zajistit přesnější modelování uvedených jevů. Evropský projekt H2020 IVMR (In-Vessel Melt Retention) umožnil výrazně zlepšit IVMR modely z hlediska hodnocení bezpečnosti. Jako první krok byl vyvinut přehled PIRT (Phenomena Identification and Ranking Table), zahrnující relevantní fyzikální procesy a oceňující jejich významnost vzhledem ke strategii IVMR.

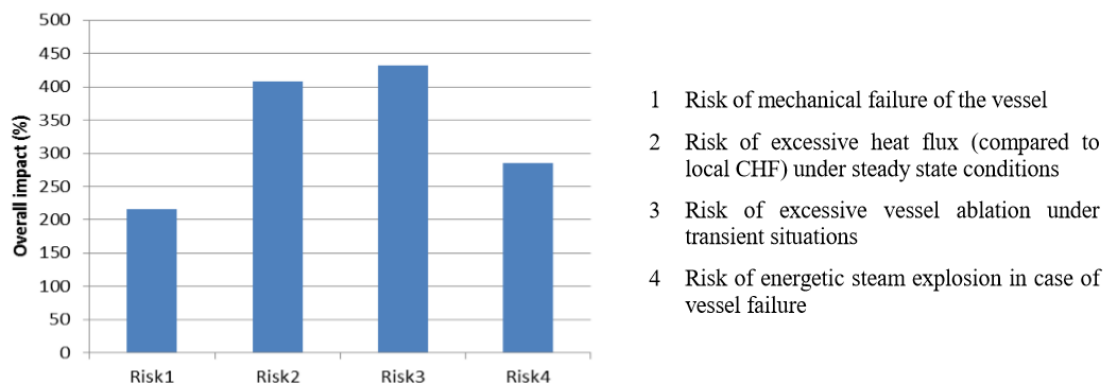
Metodologie použitá při tvorbě PIRT je založena na využití několika následujících principů:

- Určení a separace rizik s ohledem na důležitost fyzikálního procesu, který je hodnocen.
- Definice fyzikálních procesů nebo parametrů, které mohou být uvažovány jako nezávislé na ostatních.
- Nepoužití expertních hodnocení, pokud je možné, a naopak použití výsledků z minulých citlivostních studií k odhadu vlivu každého fyzikálního procesu nebo parametru.

Mezi jevy s nejvyšší důležitostí byly identifikovány tepelné přechody (zejména výrazné hustoty tepelných toků do stěny nádoby) v horní kovové vrstvě a chemicko-tepelné interakce mezi lehkou kovovou a těžší oxidickou vrstvou. Dalšími důležitými jevy jsou přechodové stratifikace jednotlivých vrstev coria, které může vykazovat buď 3vrstvou strukturu (odspodu směrem vzhůru: 1. U+Zr+Fe, 2. UO₂+ZrO₂, 3. Fe) či 2vrstvou strukturu (odspodu směrem vzhůru: 1. UO₂+ZrO₂, 2. Zr+Fe+U+ZrO₂). První konfigurace nastává při nedostatku oxidantu při degradaci AZ (rychlý scénář TH, např. LB LOCA), druhá konfigurace nastává při dostatečné oxidaci zirkoniového pokrytí při degradaci AZ (pomalý scénář TH, např. SBO). Další nejistoty existují v odhadu termo-fyzikálních vlastností směsi U+Zr+Fe+O. Vysokou důležitost má též popis mechanického chování částečně odtavené stěny TNR, kde elasticita, plasticita a creep hrají významnou roli.

Je doporučeno, že výpočtové kódy musí zahrnovat modely postihující výše zmíněné jevy, aby bylo možné poskytnout kvalifikované zhodnocení úspěšnosti aplikované strategie IVMR.

Na obr. 1 jsou uvedeny souhrnné dopady čtyř rizik, které by měly být analyzovány při prokazování úspěšnosti strategie IVMR. Rizika č. 2 a 3 se týkají zvýšených tepelných toků z bazénu taveniny do stěny TNR, a to buď ve stabilizovaném stavu, nebo v přechodových tranzitních stavech. Parametry, které jsou uvažovány v hodnocení těchto dvou nejvýznamnějších rizik, budou detailně rozebrány dále.



Obr. 1: Souhrnný vliv každého uvedeného rizika vzhledem k úspěšnosti strategie IVMR

Čtyři hlavní oblasti jevů, ovlivňující možnost překročení kritického tepelného toku, byly identifikovány a detailně publikovány v následujících odkazech literatury: Esmaili and Khatib-Rahbar (2004) [1] and Theofanous et al. (1995) [2] for general IVR analysis, Fichot et al. (2018) [3], Filippov et al. (2014) [4] and Le Tellier et al. (2015) [5], as references of sensitivity studies; Lopukh et al. (2000) [6], Park et al. (1999) [7] for the evaluation of the parameters dealing with heat transfers; Bechta et al. (2009) [8], Seiler et al. (2007) [9], Strizhov and Filippov (2016) [10], Fischer et al. (2011) [11] for thermochemical phenomena.

V následujícím textu jsou tyto 4 identifikované oblasti detailně popsány.

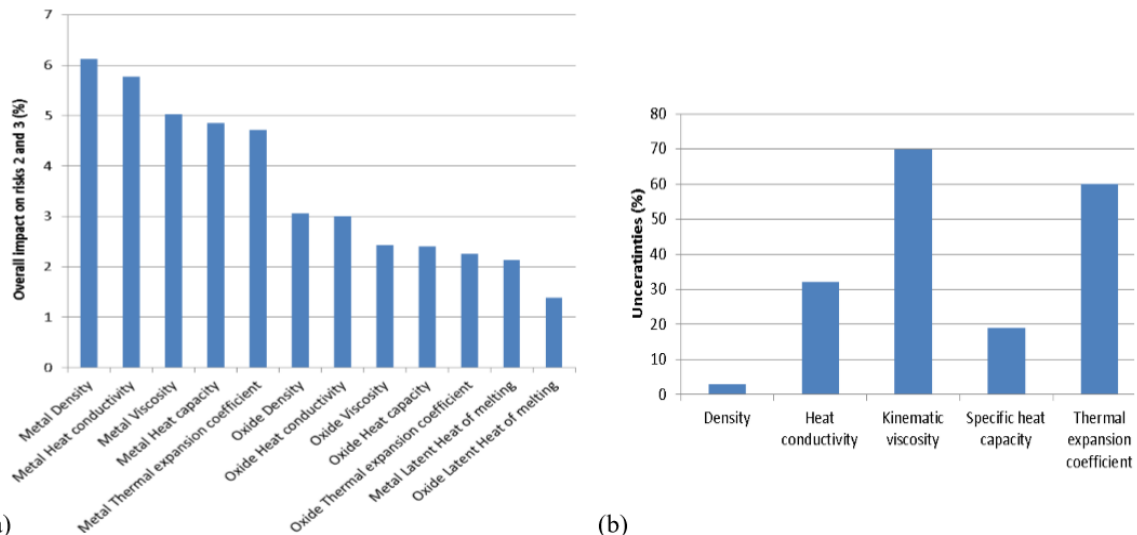
První oblast se týká mechanického selhání TNR, a to creepem, překročením meze kluzu (plasticita) či případně vlivem chemického napadání. Důležitou roli zde hraje tvar odtavené nádoby reaktoru, tj. zbývající tloušťka materiálu dna TNR. Pro přesný popis tohoto tvaru je

nezbytné správně modelovat již postup degradace paliva, dále jeho hroucení – společně s dalšími komponentami AZ – do dolní směšovací komory reaktoru až po tvorbu lože trosků a taveniny (coria). Mezi kódy, které tyto procesy umí řešit, patří tzv. integrální kódy MELCOR, MAAP a ASTEC. Všechny jsou typu „sružené parametry“ (lumped parameter). Důležitými procesy, které musí být exaktně kódy popsány, jsou oxidace Zr materiálů a zahrnutí odtavené oceli do kovové vrstvy coria. V současnosti panuje konsenzus, že maximální tepelný tok na stěnu TNR a riziko porušení je nejvyšší v případě tranzitní situace, kdy stratifikace bazénu coria je stále ve vývoji a kdy hmotnost oceli je nižší (tudíž i tloušťka kovové vrstvy je menší) než v konečném stavu. Na základě těchto úvah je proto nezbytné exaktně simulovat způsob degradace aktivní zóny a kinetiku tvorby trosků a roztavených materiálů ve dnu reaktorové nádoby.

Druhou oblastí je excesivní tepelný tok (tj. lokálně vyšší, než je kritický tepelný tok) při přechodových stavech. Výpočtové práce s kódy typu CFD, provedené v rámci projektu IVMR [12], významně přispěly k pochopení této problematiky, a to především díky novým korelacím pro přestup tepla z tenkých vrstev kovu do stěny TNR. Bylo by vhodné mít i nová experimentální data o přenosu tepelného toku v typické vrstvě roztavené oceli, aby bylo možné lépe simulovat tepelný tok podél stěny TNR.

Třetí důležitou oblastí je zvýšená ablace (tj. odtavování) stěny tlakové nádoby reaktoru, která přímo souvisí s kinetikou stratifikace coria v dolní části dna TNR a s chemickou interakcí mezi kovovou a oxidickou vrstvou. Kinetika stratifikace byla zkoumána v rámci programu CORDEB v Alexandrov Research Institute of Technology (NITI) v RF (Almjashev et al., 2018). Tyto studie pokračovaly v projektu CORDEB 2 s cílem dále ocenit kinetické charakteristiky separace obou vrstev coria [5], [13]. Je důležité upozornit, že i v současné době některé integrální kódy pro analýzy těžkých havárií nezahrnují modely termochemie v bazénu taveniny a uvažují pouze 2-vrstvou konfiguraci, tj. bez možnosti existence vrstvy těžkých kovů (U+Zr+Fe). Požadavek na přesné modelování vrstev taveniny je rovněž jasně identifikován v PIRT („Složení oxidické a kovové fáze“ je třetím parametrem s nejvyšším celkovým vlivem). Toto vše potvrzuje nutnost citlivostních studií tak, aby bylo možné identifikovat hlavní parametry a konsolidovat výsledky získané v rámci PIRT.

Poslední oblast souvisí s vlastnostmi kovové vrstvy, která v rovnováze obsahuje kovový uran v roztavené oceli a zirkonium. Emisivita této vrstvy je identifikována jako důležitý faktor. Ostatní vlastnosti s oceněním jejich významu na základě přehledu PIRT jsou uvedeny na obr. 2 (a). Hustota kovu a jeho tepelná vodivost jsou parametry s největším dopadem na riziko č. 2 resp. 3 (překročení CHF resp. excesivní ablace). Provedená zhodnocení důležitosti ostatních vlastností indikují, že i tyto mají vliv na zmíněná rizika – zejména se jedná o viskozitu, tepelnou kapacitu a součinitel teplotní roztažnosti. Jednoznačné určení významnosti jednotlivých vlastností by vyžadovalo provedení většího počtu citlivostních studií výpočtovými kódy, což bylo provedeno v rámci benchmarku na problematiku IVMR s kódy ASTEC, ATHLET-CD, HEFEST-SOCRAT, HEFEST-URAN, MAAP EDF (tzv. „in-house“ verze) a PROCOR (Carénini et al. 2019). Bylo potvrzeno, že vlastnosti kovové vrstvy mají daleko větší vliv na identifikovaná rizika než vlastnosti oxidické části taveniny. Provedená citlivostní studie pak umožnila provést jasnější určení vlivů mezi jednotlivými vlastnostmi – obr. 2 (b). Na rozdíl od výsledků PIRT, viskozita se zdá být nejdůležitější vlastností, následuje koeficient tepelné roztažnosti a tepelná vodivost. Toto opět potvrzuje nutnost dalších citlivostních studií, aby bylo možné lépe identifikovat hlavní parametry a konsolidovat výsledky získané v rámci tvorby PIRT.



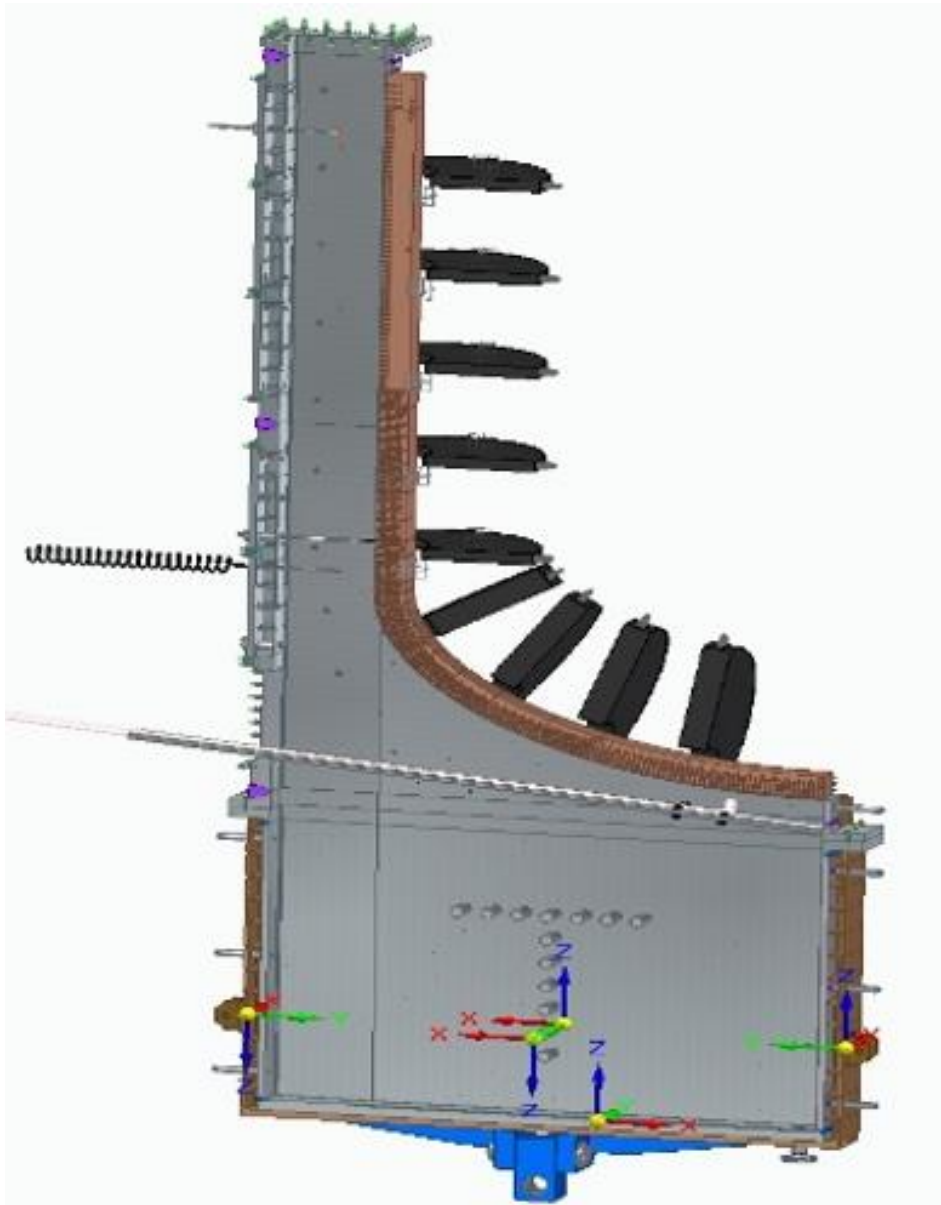
Obr. 2: Zhodnocení významu materiálových vlastností kovové, resp. oxidické vrstvy (na základě výsledků PIRT (a) a význam nejistot souvisejících s vlastnostmi kovu (Carénini et al., 2019) (b))

Příspěvek ÚJV do CRP IAEA PIRT projektu „Experiments na THS-15 s cílem zvýšit rezervu do kritického tepelného toku (CHF)“

V úvodních odstavcích této prezentace je uvedena velká řada nejistot a neurčitostí. Zcela určitě velká část bude vysvětlena a eliminována v průběhu projektu CRP IAEA PIRT. Přesto je nutné počítat i s tím, že ne všechno bude vyřešeno na 100 %. Na přípravném zasedání CRP projektu jsme navrhli využít i výsledky uvedeného projektu „Zvýšení rezervy do CHF“. Uvedený projekt je financován od 1. 5. 2020 na základě výběrového řízení TAČR Beta s podporou SÚJB. Požádali jsme SÚJB o souhlas s využitím potenciálně získaných výsledků v projektu CRP IAEA, navíc IAEA požádá dopisem na SÚJB o uvolnění získaných výsledků. Je důležité zdůraznit, že v rámci CRP IAEA PIRT projektu jsme jediní, kteří provedou velkorozměrné experimenty s významnou analytickou podporou Divize 2200 ÚJV. Důležitá je i simulace dna TNR, v našem případě VVER-1000, tj. semi-eliptického tvaru, které je jednou z nejvíce namáhaných oblastí vnějšího povrchu TNR i při zabezpečeném vnějším chlazení. Díky již provedeným experimentům na malých vzorcích na experimentálním zařízení BESTH máme potvrzeno, že je možné provést speciální úpravu povrchu pomocí technologie Sponge Jet (SJ), která výrazně zvýší rezervu do CHF. Provedení testů na velkorozměrném experimentálním zařízení THS-15 vyžaduje provést úpravu povrchu technologií SJ, a to v několika etapách. Nejdříve provést očištění povrchu od stávajících korozních usazenin a pak následně provést úpravu pomocí SJ. Navíc je nutné po každé úpravě povrchu provést NDE a potvrdit stav povrchu po každé úpravě. Vlastní úprava povrchu bude provedena robotickým zařízením (viz obr. 3), protože celková demontáž horní části THS-15 kanálu by znamenala demontáž 1200 přívodů topných patron a jeřábové zvednutí kanálu. To by znamenalo velké finanční náklady a časové zdržení.

Velmi zásadním přínosem pro vlastní provedení experimentů s cílem zvýšit rezervu do CHF je analytická podpora Divize 2200 ÚJV. Na základě jejich dlouholetých zkušeností budou specifikovány teplotní profily kódem ASTEC, který je schopen simulovat 2 či 3vrstvou konfiguraci bazénu taveniny – coria – ve dnu TNR a odtavenou ocel z vnitřního povrchu reaktorové nádoby přidávat do kovové složky coria. Důležitým výstupem modelování kódem ASTEC je tvar odtavené části TNR. Je velmi důležité konstatovat, že od samého začátku, kdy jsme navrhli realizaci tohoto experimentu, máme trvalou podporu k provedení všech experimentů i s uvedenými analýzami z IRSN a klíčových organizací RF (KI Moskva, IBRAE, OKB Gidropress, MEI

Moskva). Pevně věříme, že i přes stáří zařízení THS-15 všechny plánované úpravy a experimenty provedeme a plánovaný cíl zvýšení rezervy do CHF potvrdíme.



Obr. 3: Návrh robotické úpravy povrchu semieliptického dna pomocí technologie SJ

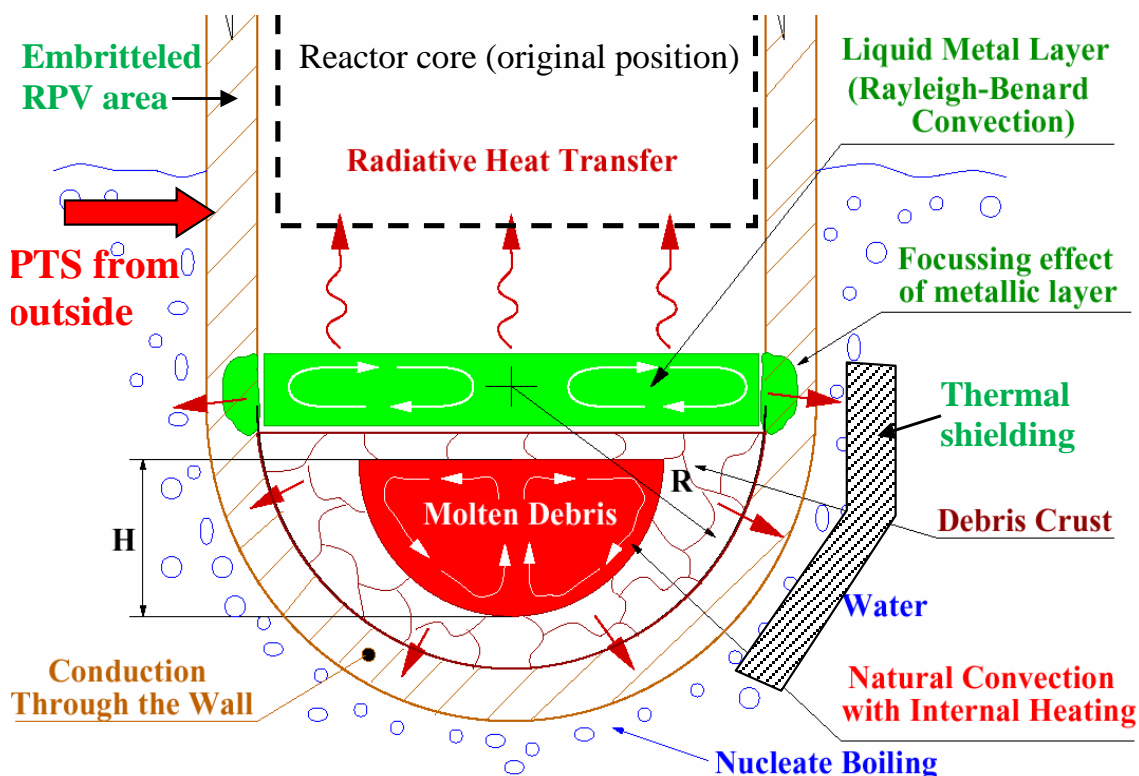
Příspěvek ÚJV: Hodnocení integrity TNR s „ablation efektem“ v rámci OECD/NEA projektu

Náš záměr na vytvoření OECD/NEA projektu jsme ve stručnosti komentovali již na 14. ročníku konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách v roce 2019. Prosazení každého nového projektu v rámci OECD/NEA vyžaduje čas a podporu významných členských organizací OECD/NEA. Projekt je nyní schválen a bude veden ÚJV a IRSN. První Kick Off Meeting byl naplánován již na duben 2020, bohužel v důsledku koronaviru se jednání neuskutečnilo a pravděpodobné zahájení bude v listopadu 2020. Již na plánovaný Kick Off Meeting byl rozeslán zvací dopis na víc jak 40 účastníků z celého světa. Určení integrity TNR i s „ablation efektem“ (tj. s uvažováním realistického odtavování části vnitřního

povrchu TNR) znamená jednu z klíčových aktivit. V následujícím odstavci jsou shrnuty základní informace k příspěvku ÚJV na hodnocení integrity TNR. Práce v ÚJV budou prováděny s podporou projektu TAČR Beta, který je v průběhu konečného vyhlášení.

Tlaková nádoba je v případě vzniku těžké havárie 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 uvažováním 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 efekt“ 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.
- Významný vliv creepu (tečení materiálu) na části dna TNR.
- Malé zatížení vnitřním tlakem.
- Zatížení hmotností taveniny a vlastní tíhou TNR.



Obr. 4: Dno TNR během těžké havárie a ukázka nejdůležitějších 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 tíhou, 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.

Závěr

Na závěrečném jednání projektu HORIZON 2020 IVMR nebyla žádná indikace o dalším možném financování nebo vypsání nového projektu IVMR v rámci EC. Je velmi potěšitelné, že pokračování projektu IVMR je zajištěno, a to v rámci projektu CRP IAEA PIRT a projektu OECD/NEA. Na vytvoření obou projektů se aktivně podílí ÚJV a projekt OECD/NEA vede společně s IRSN. O projekt OECD/NEA je velký zájem ze všech klíčových zemí světa, největší počet zúčastněných organizací má RF (OKB Hidropress, KI Moskva, IBRAE a MEI Moskva).

Stejný zájem je i o projekt CRP IAEA PIRT. Vedoucí tým expertů IAEA tohoto projektu intenzivně žádá o účast v projektu OECD/NEA. To je velmi důležitá situace potvrzující zájem o oba projekty.

ÚJV velmi silně oceňuje otevření dvou projektů TAČR Beta s podporou SÚJB, které přesně zapadají do cílů obou projektů. Věříme, že na následujícím 16. ročníku konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách plánované na rok 2021 budeme mít možnost Vás seznámit s dílčími výsledky projektů TAČR Beta, ale i projektů IAEA a OECD/NEA.

Literatura

- [1] Esmaili, H., Khatib-Rahbar, M. (2004): *Analysis of In-Vessel Retention and Ex-Vessel Fuel Coolant Interaction for AP1000*. Technical Report, NUREG/CR-6849 ERI/NRC 04-201, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research.
- [2] Theofanous, T. G., Liu, C., Addition, S., Angelini, S., Kymäläinen, O., Salmassi, T. (1995): *In-Vessel Coolability and Retention of a Core Melt*. DOE/ID-10460, Vol. 1&2, University of Carolina, Santa Barbara (CA).
- [3] Fichot, F., Carénini, L., Villanueva, W., Bechta, S. (2018): A revised methodology to assess In-Vessel retention strategy for high power reactor. *26th International Conference on Nuclear Engineering ICONE26*, ASME, London (UK).
- [4] Filippov, A.S., Drobyshvsky, N.I., Kamensky, D.D., Kisselev, A.E., Moiseenko, E.V. (2014): End-to-end technology of modeling a melt-structure interaction during IVMR in VVER with HEFEST-URAN toolkit. *22nd International Conference on Nuclear Engineering ICONE 22*, ASME, Prague.
- [5] Le Tellier, R., Saas, L., Bajard, S. (2015): Transient stratification modelling of a corium pool in a LWR vessel lower head. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 287, pp. 68-77. ISSN 0029-5493
- [6] Lopukh, D.B., Loginov, I.A., Granovsky, V.S., Bechta, S.V. (2000): Experimental investigation of processes of water supply to molten steel // Safety issues of NPP with VVER. *Proceedings of the science-practical seminar*, Saint-Petersburg, pp. 285-296. (in Russian)
- [7] Park, R.-J., Kim, S.-B., Kim, H.-D., Choi, S.-M. (1999): *Natural Convection Heat Transfer with Crust Formation in the Molten Metal Pool*. Nuclear Technology, Vol. 127, pp. 66-80. ISSN 1943-7471
- [8] Bechta, S.V., Granovsky, V.S., Khabensky, V.B., Krushinov, E.V., Vitol, S.A., Sulatsky, A.A., Gusarov, V.V., Almiyashev, V., Lopukh, D.B., Bottomley, D., Fischer, M., Piluso, P., Miassoedov, A., Tromm, W., Altstadt, E., Fichot, F., Kymäläinen, O. (2009): *VVER vessel steel corrosion at interaction with molten corium in oxidizing atmosphere*. Nuclear Engineering and Design, Vol. 239, pp. 1103–1112. ISSN 0029-5493
- [9] Seiler, J.M., Tourniaire, B., Defoort, F., Froment, K. (2007): *Consequences of material effects on in-vessel retention*. Nuclear Engineering and Design, Vol. 237, pp. 1752-1758. ISSN 0029-5493

- [10] Strizhov, V.F., Filippov, A.S. (2016): Progress in IVMR modeling since RASPLAV and MASCA: lessons and challenges. *International Workshop on In-vessel Retention*, Aix-en-Provence (France).
- [11] Fischer, M., Levi, P., Langrock, G., Sulatsky, A.A., Krushinov, E.V. (2011): The Impact of Thermal Chemical Phenomena on the Heat Fluxes into the RPV during In-Vessel Melt Retention. *International Congress in Advances in NPPs ICAPP 2011*, SFEN, Nice (France).
- [12] Le Guennic, C., Skrzypek, E., Vyskocil, L., Skrzypek, M., Shams, A., Saas, L. (2017): Analysis of in-vessel corium pool behaviour using CFD tools. *8th European Review Meeting on Severe Accident Research ERMSAR 2017 Conference*, National Centre for Nuclear Research, Warsaw (Poland).
- [13] Fichot, F., Carénini, L. (2015): Some consequences of material interactions for in-vessel melt retention, *International Congress in Advances in Nuclear Power Plants ICAPP*, SFEN, Nice (France).