

3/4 22

ročník 3 | 681 | 2022

V tomto čísle věnované dvacátému výročí založení Centra výzkumu Řež vám představíme unikátní výzkumnou infrastrukturu a špičkové laboratoře, které byly v Řeži vybudovány v rámci velkého investičního projektu SUSEN.

V medailonku významných osobností si připomeneme Ing. Jana Mrkose, někdejšího ředitele CVŘ, který zásadním způsobem přispěl k definování technického obsahu projektu a k finalizaci žádosti na jeho financování.

Detailně vás seznámíme s klíčovými aktivitami CVŘ, s oběma režskými reaktory, projektem LEU-FOREVER, nebo systémem velkokapacitní akumulace energie. Na následujících stránkách mimo jiné najdete i třetí část článku o jaderných zdrojích pro vesmír a další díl seriálu o vzniku a historii státního dozoru nad jadernou bezpečností.

jaderná energie

jadrová energia

Jaderná energie

Jadrová energia

Základní úlohou časopisu „Jaderná energie/Jadrová energia“ je přispívat k úrovni kultury jaderné bezpečnosti. Časopis je psaný v českém a slovenském jazyce, vědecké a odborné články, abstrakty a anotace též v anglickém jazyce. Časopis vychází čtyřikrát ročně nákladem 450 výtisků a v elektronické podobě, která je volně dostupná na adrese jadernaenergie.online

OBSAH ČASOPISU JE ZAMĚŘEN NA:

- jadernou bezpečnost a radiační ochranu s důrazem na ochranu životního prostředí, zdraví profesionálních pracovníků a obyvatelstva,
- výzkum, vývoj a nové technologie,
- provoz a výstavbu jaderných elektráren,
- zpracování a ukládání radioaktivních odpadů,
- aplikace radioizotopů a ionizujícího záření,
- aktuální informace z dozorných orgánů,
- vzdělávání a rozvoj know-how.

Vydavatel:

Centrum výzkumu Řež s.r.o.
Hlavní 130, Řež
250 68 Husinec
Česká republika
IČO: 26722445

Úrad jadrového dozoru SR
Bajkalská 27
P.O.Box 24
820 07 Bratislava
Slovenská republika
IČO: 30844185

Redakce:

Michal Šafránek – šéfredaktor
redakce@jadernaenergie.online
+420 775 374 384
Ing. Jiří Kuf, Ing. Jan Procházka,
Jan Trejbal.

Adresa redakce:

Centrum výzkumu Řež s.r.o.
Hlavní 130, Řež
250 68 Husinec
Česká republika

Redakční rada:

Ing. Daneš Burket, Ph.D. – předseda
doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D., Ing. Jiří Duspiva, PhDr. Tomáš Ehler, MBA, Ing. Miroslav Hrehor,
Ing. Jiří Hůlka, Ing. Aleš John, MBA, prof. Ing. Jan John, CSc., Ing. František Pazdera, CSc.,
Ing. Alena Rosáková, prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc., Mgr. Petr Šuleř, Ing. Radek Trtílek,
Ing. Zdeněk Típek, Mgr. Miriam Vachová, Mgr. Ilona Vysoudilová, RNDr. Marek Vyšinka, Ph.D.,
RNDr. Vladimír Wagner, CSc., Ing. Jan Zdebor, CSc.

Grafika, sazba, jazykové korektury a tisk:

TOP Partners, s.r.o.
Classic 7 Business Park
Jankovcova 49
170 00 Praha 7
Česká republika

Registrace MK ČR

Časopis Jaderná energie/Jadrová energia
byl zapsán do evidence periodického tisku
Ministerstva kultury České republiky a bylo
mu přiděleno evidenční číslo MK ČR E 4671.
ISSN 2694-9024

Číslo 3/2022, ročník 3 [68]

Vychází 20. 7. 2022

editorial

Vážení čtenáři,

dostává se Vám do rukou třetí letošní číslo, které je věnované dvacátému výročí založení Centra výzkumu Řež. Za dobu své existence si toto špičkové pracoviště vybudovalo velmi silnou pozici v energetickém výzkumu a vývoji nejen v České republice, ale patří i k vyhledávaným partnerům mezi zahraničními výzkumnými organizacemi, provozovateli a průmyslovými podniky, a věřím, že na následujících stránkách se o tom sami přesvědčíte.

Centrum výzkumu Řež je společně s Úradom jadrového dozoru Slovenskej republiky vydavatelem tohoto časopisu, jehož historie sahá až do roku 1955. Jsem rád, že jsem mohl být u toho, když před třemi lety noví vydavatelé převzali časopis pod svá křídla, a mohu myslím neskromně, ale objektivně uvést, že se podařilo vytvořit z něj moderní odborné technické periodikum, které i nadále, stejně jako po celou dobu své dlouhé historie, oslovuje jaderné profesionály v České republice a na Slovensku a těší se jejich přízni.

O úspěch této obnovené premiéry našeho časopisu se výraznou měrou zasloužil Aleš John, který stál v čele redakční rady, a chopil se tak nesnadného úkolu provést časopis nelehkou cestou transformace. Díky Alešově přirozené autoritě, které se v jaderné komunitě těší, tahu na branku a invenci, která k němu neodmyslitelně patří, se změna podoby časopisu velmi vydařila a jistě se shodneme na tom, že má časopis před sebou jen světlé vyhlídky.

Pro mě osobně je ctí a potěšením od Aleše jeho žezlo převzít a navázat na obrovský kus práce, který pro časopis odvedl. Chtěl bych mu za to za sebe i za všechny kolegyně a kolegy podílející se na přípravě časopisu velmi poděkovat. Těší mě, že s námi bude i nadále v redakční radě spolupracovat, a přispívat tak k úspěchu časopisu.

Aleši, děkujeme!

Daneš Burket

předseda redakční rady

Daneš Burket



obsah

představujeme		
20 let Centra výzkumu Řež Ing. Milan Patřík, MBA		04
medailonek významných osobností		
Ing. Jan Mrkos, CSc. Miroslav Hrehor		08
jaderná bezpečnost a radiační ochrana		
Jaderná bezpečnost a podpora provozu reaktorů Ing. David Harut, Ph.D.		10
výzkum, vývoj a nové technologie		
Materiálový výzkum a vývoj v Centru výzkumu Řež RNDr. Ondřej Srba, Ph.D.		16
Technologický výzkum a vývoj v Centru výzkumu Řež Ing. Jan Prehradný, Ph.D.		26
Výzkumné jaderné reaktory Řež Ing. Ján Milčák		32
Experimentální program v rámci vývoje GFR demonstrátoru ALLEGRO Ing. Tomáš Melichar, Ing. Otakar Frýbort, Ing. Petr Hájek, Jan Šefl, Ing. Jana Kalivodová, Ph.D.		38
Zařízení pro dálkový odběr replik povrchů Jiří Netušil, Jan Matějčíček, Ing. Jana Veselá, Ph.D., Ing. Pavel Mareš, Ing. Jaroslav Brom		42
Vývoj velkokapacitní akumulace energie v CVŘ Ing. Tomáš Melichar, Ing. Otakar Frýbort, Ing. Radomír Filip		46
Experimentální výzkum jaderných havárií v Centru výzkumu Řež Mgr. Bence Mészáros, Mgr. Mykhaylo Paukov, Ing. Jan Hrbek, Ph.D.		50
provoz a výstavba jaderných zařízení		
Velké technologické projekty Centra výzkumu Řež Ing. Petr Březina, MSc.		56
spolupráce, partnerství a participace		
Spolupráce Centra výzkumu Řež s průmyslem Ing. Daneš Burket, Ph.D.		62
Významné vědecko-výzkumné spolupráce se zahraničními partnery Ing. Marek Mikloš, Ph.D.		66
Projekt LEU-FOREVER vývoj alternativního paliva pro reaktor LVR-15 Ing. Michaela Žabčíková, Ing. Vincenzo Romanello, Ph.D., Ing. Miloš Kynčl, Ing. Miroslav Hrehor		70
okno do historie		
Z knihy o historii jaderné energetiky (10. část) Ing. Zdeněk Kříž		78
zajímavosti z domova i ze světa		
Jaderné zdroje energie pro vesmír (3. díl – jaderné reaktory jako pohonný systém) RNDr. Vladimír Wagner, CSc.		82
kalendář akcí		
Kalendář akcí (srpen – říjen 2022)		88

16

Materiálový výzkum a vývoj v Centru výzkumu Řež

Centrum výzkumu Řež je v oblasti materiálového výzkumu a diagnostiky respektovaným pracovištěm. Díky unikátní infrastruktuře jsou jeho pracovníci schopni měřit změny materiálu vlivem koroze v prostředí, únavy, vlivu tečení nebo záření a v mnoha případech i všechny vlivy společně.

RNDr. Ondřej Srba, Ph.D.

32

Výzkumné jaderné reaktory Řež

Jaderné reaktory LVR-15 a LR-0 představují základní části výzkumné infrastruktury společnosti Centrum výzkumu Řež a jsou unikátními zařízeními pro český i mezinárodní jaderný výzkum v oblastech jako je materiálový výzkum, reaktorová fyzika, jaderná bezpečnost nebo dozimetrie ionizujícího záření.

Ing. Ján Milčák

46

Vývoj velkokapacitní akumulace energie v CVŘ

Centrum výzkumu Řež je zapojeno do vývoje systémů velkokapacitní akumulace energie, což je element, jehož potřeba v energetickém mixu se s rostoucím využitím obnovitelných zdrojů neustále zvyšuje. Jedním z principů akumulace je tzv. Thermal Energy Storage (TES), kde je energie ukládána ve formě tepla.

Ing. Tomáš Melichar, Ing. Otakar Frýbort,
Ing. Radomír Filip

56

Velké technologické projekty Centra výzkumu Řež

Centrum výzkumu Řež není jen výzkumná organizace, jedna z jeho sekcí se zaměřuje na realizaci velkých technologických projektů od návrhu, přes strojírenskou výrobu, realizaci, zkoušky až po samotné zprovoznění.

Ing. Petr Březina, MSc.

20 let Centra výzkumu Řež

Ing. Milan Patrik, MBA

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Cílem příspěvku je představení výzkumné organizace Centrum výzkumu Řež (CVŘ) při příležitosti 20. výročí založení. V článku je shrnuto, co se podařilo za dobu existence v CVŘ vybudovat, na jaké oblasti výzkumu se společnost především zaměřuje, do jakých národních a mezinárodních vědecko-výzkumných aktivit je zapojena a se kterými významnými partnery společnost spolupracuje.

The aim of this article is to introduce the research organization Research Centre Řež (CVŘ) on the 20-year anniversary of its establishment. The article summarizes what CVŘ has managed to build during its existence, which areas of research the organization mainly focuses on, which national and international scientific and research activities it is involved in and which important partners CVŘ cooperates with.

9. října tohoto roku to bude právě 20 let, kdy bylo založeno Centrum výzkumu Řež s.r.o. jako 100% dceřiná společnost ÚJV Řež, a. s., a je pro nás velmi příjemné, že tuto událost můžeme oslavit i s Vámi na stránkách časopisu Jaderná energie.

Společnost CVŘ navázala na bohaté zkušenosti své mateřské společnosti, v té době již s více než 50letou tradicí, a ty dokázala ještě výrazně rozšířit. V současné době představuje CVŘ významnou instituci nejen v regionu, ale také v rámci Evropy i zemí OECD.

Hlavním cílem založení nové výzkumné společnosti v roce 2002 a následně i jejím posláním se stal výzkum, vývoj a inovace v energetice, a to s poměrně širokým záběrem působnosti, zejména pak v jaderné oblasti. Aby bylo možné výzkumné aktivity provádět a dosahovat excelentních výsledků i v mezinárodním měřítku, bylo nutné vybudovat odpovídající výzkumnou základnu a vytvořit odpovídající pracovní týmy s potřebným know-how. V současné době disponuje CVŘ jak řadou uznávaných expertů, tak unikátní experimentální infrastrukturou včetně vý-

zkumných reaktorů LVR-15 a LR-0, technologických smyček, horkých komor a řadou velmi dobře vybavených laboratoří.

Podstatné rozšíření infrastruktury umožnila především realizace velkého investičního projektu SUSEN (Udržitelná energetika) v letech 2012–2017 v rámci OP Výzkum a vývoj pro inovace Evropského fondu pro regionální rozvoj. Projektem SUSEN získala Česká republika a její výzkumná komunita zcela ojedinělou příležitost k významnému rozšíření svých výzkumných kapacit a experimentálních možností pro energetický výzkum a vývoj a CVŘ se realizací výzkumných aktivit v rámci projektu SUSEN posunulo mezi světovou špičku ve svém oboru.

Díky podstatnému rozšíření na sebe navazujících výzkumných infrastruktur je dnes CVŘ schopné pokrýt komplexní potřeby výzkumu a vývoje v jaderné energetice. Není na světě mnoho takových společností, které by dokázaly ozářit testovaný materiál v jaderném reaktoru, případně ho exponovat ve smyčce v požadovaném prostředí, následně provést široké spektrum mechanických





| Režské údolí (zdroj: Lukáš Slavík, ÚJV Řež) | ■

zkoušek v horkých komorách a poté na špičkově vybaveném pracovišti elektronových mikroskopů analyzovat vliv radiace a médií na mikrostrukturu materiálů.

Velkou výhodou je také skutečnost, že CVŘ dnes disponuje projekčními a konstruktérskými kapacitami a moderně vybavenými dílnami, takže je schopno si potřebná experimentální nebo testovací zařízení samo vyrábět a upravovat.

Základem výjimečných výsledků společnosti jsou především její zaměstnanci – v současné době pracuje v CVŘ 420 pracovníků. Mezi hlavní oblasti aktivit patří zejména výzkumná podpora provozu jaderných i klasických elektráren, výzkum a vývoj v oblasti pokročilých jaderných technologií, jako jsou např. reaktory generace IV, SMR a fúze, dále

výzkumná podpora zpracování a ukládání radioaktivních a nebezpečných odpadů a výzkum a vývoj v oblasti bezemisní energetiky a moderních energetických technologií, kde speciální pozornost je věnována v současné době např. akumulaci energie a termodynamickým okruhům. Speciální roli v portfoliu aktivit představuje pokročilý materiálový výzkum, který je průřezovým a klíčovým tématem pro všechny výzkumné oblasti. Pracovníci CVŘ jsou významně zapojeni do aktivit řady mezinárodních asociací a agentur, jako např. OECD/NEA, MAAE, SNETP a EERA, kde úspěšně reprezentují Českou republiku. Příkladem takovýchto aktivit může být spolupráce v projektu FIDES/INCA, který CVŘ v rámci aktivit OECD/NEA koordinuje a k realizaci využívá své infrastruktury. Zástupci CVŘ jsou také členy poradních orgánů EK v oblasti jaderného výzkumu a přípravy programů EURATOM.

Na národní úrovni se CVŘ stalo spoluzakladatelem Technologické platformy „Udržitelná energetika“, a je koordinátorem aktivit sekce Pokročilé jaderné systémy a Pokročilé termodynamické okruhy.

CVŘ je zapojeno se svými infrastrukturami do řady národních a mezinárodních výzkumných projektů, kde je již mnoho let vyhledávaným partnerem. Příkladem mohou být projekty TA ČR THÉTA a NCK, bezpečnostní výzkum (MV), projekty OP PIK (MPO) apod. Na mezinárodní úrovni se jedná především o řadu projektů z pilíře EURATOM v rámci programů Research and Innovation, kde v současné době CVŘ spolupracuje na řešení 20 projektů, z kterých dva také koordinuje.

Mezi významné zahraniční aktivity společnosti patří i zapojení do mezinárodního projektu evropského výzkumného reaktoru Julese Horowitz (JHR) ve Francii. Návrhem, konstrukcí a dodávkou horkých komor pro tento reaktor se CVŘ zařadilo mezi několik společností ve světě, které jsou schopny vyrobit a dodat takovéto náročné technologie. V současné době se CVŘ podílí také na přípravě experimentálních programů a nástrojů pro JHR ve spolupráci s ostatními členy konsorcia JHR, a pomáhá tak připravit podmínky k využití kapacit tohoto reaktoru Českou republikou s ohledem na poskytnuté technologie formou in-kind dodávky. Podobně se společnost podílí na přípravě spalačního zdroje ESS ve švédském Lundu ve spolupráci s AV ČR.

Nedílnou součástí dnešních aktivit společnosti je také intenzivní spolupráce s průmyslem v České republice i v zahraničí a odpovídající transfer technologií a znalostí. Důležitou součástí výzkumné spolupráce je možnost poskytování experimentálních infrastruktur CVŘ partnerům formou „open access“ v rámci projektu Velkých výzkumných infrastruktur.

Velmi důležitá je pro CVŘ i spolupráce s vysokými školami, která je v současné době poměrně rozsáhlá jak v oblasti vzdělávání, tak v projektech výzkumu a vývoje. Studenti spolupracují s našimi experty v rámci svých bakalářských, diplomových i dizertačních prací, mnozí naši pracovníci na vysokých školách

přednáší. Na výzkumných projektech spolupracujeme například s ČVUT, VŠCHT Praha, ZČU v Plzni, VUT v Brně či VŠB v Ostravě. V rámci mezinárodních projektů rozvíjí CVŘ spolupráci například s americkými univerzitami (MIT, Georgia Institute of Technology, University of California Berkeley a další), japonskými univerzitami (Nagoya University, Tokyo Institute of Technology) i řadou evropských.

Vážení čtenáři, využívám této příležitosti, abych poděkoval všem našim současným i bývalým kolegům za to, kam se Centrum výzkumu od roku 2002 dostalo a co vše se podařilo vybudovat. Dosahovat řady zajímavých a významných výsledků by však nebylo možné bez intenzivní spolupráce. Velké poděkování za příjemnou a motivující spolupráci patří tedy i Vám, našim partnerům.

A co popřát Centru výzkumu Řež do dalších 20 let? Tak především úspěšné pokračování dynamického rozvoje společnosti a udržení si vysoké úrovně výzkumných aktivit a také hodně inovativních nápadů a zajímavých projektů, které nám pomohou společně posunout energetiku zase o generaci dál...

Ing. Milan Patrik, MBA



milan.patrik@cvrez.cz

Po absolvování Fakulty strojní ČVUT v Praze v oboru Tepelných a jaderných zařízení v roce 1985 pracoval postupně na různých pozicích v Ústavu jaderného výzkumu v Řeži (ÚJV Řež). Řadu let zastupoval Českou republiku v OECD/NEA (Nuclear Energy Agency) v oblasti hodnocení rizik (WGRISK) a ve výběrech NEA pro hodnocení bezpečnosti a vývoj jaderných technologií (CSNI, NDC). Od roku 2014 je členem poradního orgánu Euratomu v oblasti jaderného výzkumu. V letech 2010 až 2018 vedl v ÚJV Řež Divizi jaderné bezpečnosti a spolehlivosti. Od roku 2018 je ředitelem společnosti Centrum výzkumu Řež.

8th International Conference

www.vver2022.com

VVER 2022

Operation and Maintenance of VVER Reactors in the EU

10-11 October 2022
Řež, Czech Republic



The eighth triennial international meeting of experts from nuclear power plants with VVER reactors, representatives of regulatory bodies, designers, fuel suppliers, maintenance, and other services providers.

The conference is a forum for exchanging information on the safety, reliability, and economic competitiveness of nuclear power plants with VVER reactors and for exchanging knowledge on the latest trends in this field, as well as a forum for discussion not only service providers for power plants with VVER reactors, but also representatives of research and development, regulatory authorities together with representatives of the Czech government and parliament.

Conference topics

- safe and reliable operation
- long term operation and maintenance
- nuclear fuel
- fuel cycle back-end and decommissioning
- R&D, training and education

Ing. Jan Mrkos, CSc.

Ing. Jan Mrkos, CSc. se aktivně podílel na rozvoji československého a později českého jaderného programu, zejména na vybudování výzkumné jaderné infrastruktury v Ústavu jaderného výzkumu Řež a později v Centru výzkumu Řež. Během své úctyhodné profesní dráhy se významně zapsal do paměti svých kolegů a vysokoškolských studentů.

Jan Mrkos se narodil 6. července 1937 v Roudnici nad Labem. Po absolvování roudnické jedenáctileté střední školy vystudoval Fakultu technické a jaderné fyziky Českého vysokého učení technického v Praze se zaměřením na jaderné inženýrství, reaktorovou techniku a energetiku. Na ČVUT promoval v roce 1961.

Získané technické vzdělání ovlivnilo jeho rozhodnutí o další profesionální orientaci. Po ukončení studií nastoupil jako projektant do Škody JS v Plzni. Od roku 1967 působil v Sigmě Olomouc ve funkci náměstka ředitele. V tomto roce také obhájil na Strojní fakultě ČVUT v Praze svou kandidátskou disertační práci na téma „Ekonomika podniků“.


Od roku 1984 do roku 1988 pracoval jako ředitel odboru na Státní komisi pro vědecko-investiční rozvoj. V roce 1988 byl jmenován ředitelem Ústavu jaderného výzkumu v Řeži u Prahy. Ústav pod jeho vedením prošel bez

vážnějších otřesů bouřlivými léty 1989–1990 a uchoval si charakter významné vědecko-výzkumné instituce pro jadernou energetiku. V roce 1992 přešel Ing. Mrkos do Fondu národního majetku, kde ve funkci vedoucího oddělení řešil mimo jiné privatizaci státních organizací a podniků působících v jaderné energetice. V tomto a v následujícím období se rovněž významně zasadil o řešení starých ekologických zátěží v Ústavu jaderného výzkumu Řež.

Od roku 2007 do roku 2010 byl ředitelem Centra výzkumu Řež, zde zásadním způsobem přispěl k definování technického obsahu projektu Udržitelná energetika SUSEN (Sustainably Energy) a k finalizaci žádosti na jeho financování Evropskou komisí. V rámci projektu SUSEN byly z Evropských strukturálních získány investiční prostředky ve výši cca 2,5 miliardy Kč, za něž byla v Centru výzkumu Řež vybudována zcela unikátní výzkumná infrastruktura.

Osobní vzpomínka Ing. Jiřího Žďárka na Ing. Jana Mrkose

S Ing. Mrkosem jsem se blíže poprvé pracovním setkal v období, kdy pracoval ve VÚ Sigma v Modřanech. Pod jeho vedením tento ústav vchoval celou řadu klíčových odborníků, kteří později pracovali nejen ve VÚ Sigma Modřany, ale i v dalších organizacích, jako



například VÚ Sigma Olomouc, Sigma Olomouc, Sigma Dolní Benešov a dalších. Při transformaci Ústavu jaderného výzkumu Řež na akciovou společnost řada těchto klíčových odborníků přešla do Divize Integrity ÚJV Řež a vytvořila základ spolupráce s průmyslem při budování jaderných elektráren na Slovensku i u nás. Expertní tým ze Sigmy realizoval v ÚJV Řež výpočty potrubí, armatur, čerpadel, a prováděl i nedestruktivní kontroly. Chci tímto vyslovit Ing. Mrkosovi opravdu velký dík za jeho manažerské, odborné i lidské schopnosti a vlastnosti, které napomohly ÚJV Řež k rychlému zapojení se do výstavby a provozu jaderných elektráren.

Ještě jednou Honzo, moc děkujeme a jsme stále vděční!

Přes všechny výše uvedené důležité manažerské pozice, které zastával a přes dosažené úspěchy, kterými přispěl k rozvoji naší jaderné energetiky, zůstal Ing. Jan Mrkos skromným, upřímným a ve svém pracovním kolektivu vždy oblíbeným kolegou.

Miroslav Hrehor a Jiří Žďárek

Jaderná bezpečnost a podpora provozu reaktorů

Ing. David Harut, Ph.D.

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Článek pojednává především o využití reaktorů LVR-15 a LR-0, na které je pozornost sekce Jaderná bezpečnost a podpora provozu reaktorů především obrácena. Dále se zaměřuje na výzkum za pomoci neutronového generátoru, urychlovače či izotopického zdroje neutronů ^{252}Cf . Rozebírá nejen jejich přednosti a unikátní možnosti, které skýtají, ale uvádí i konkrétní oblasti a úspěchy, kterých bylo s pomocí těchto zařízení dosaženo. Text uzavírá výčet nejvýznamnějších projektů, kterých se účastníme a které nahlíží do budoucnosti jaderné energetiky.

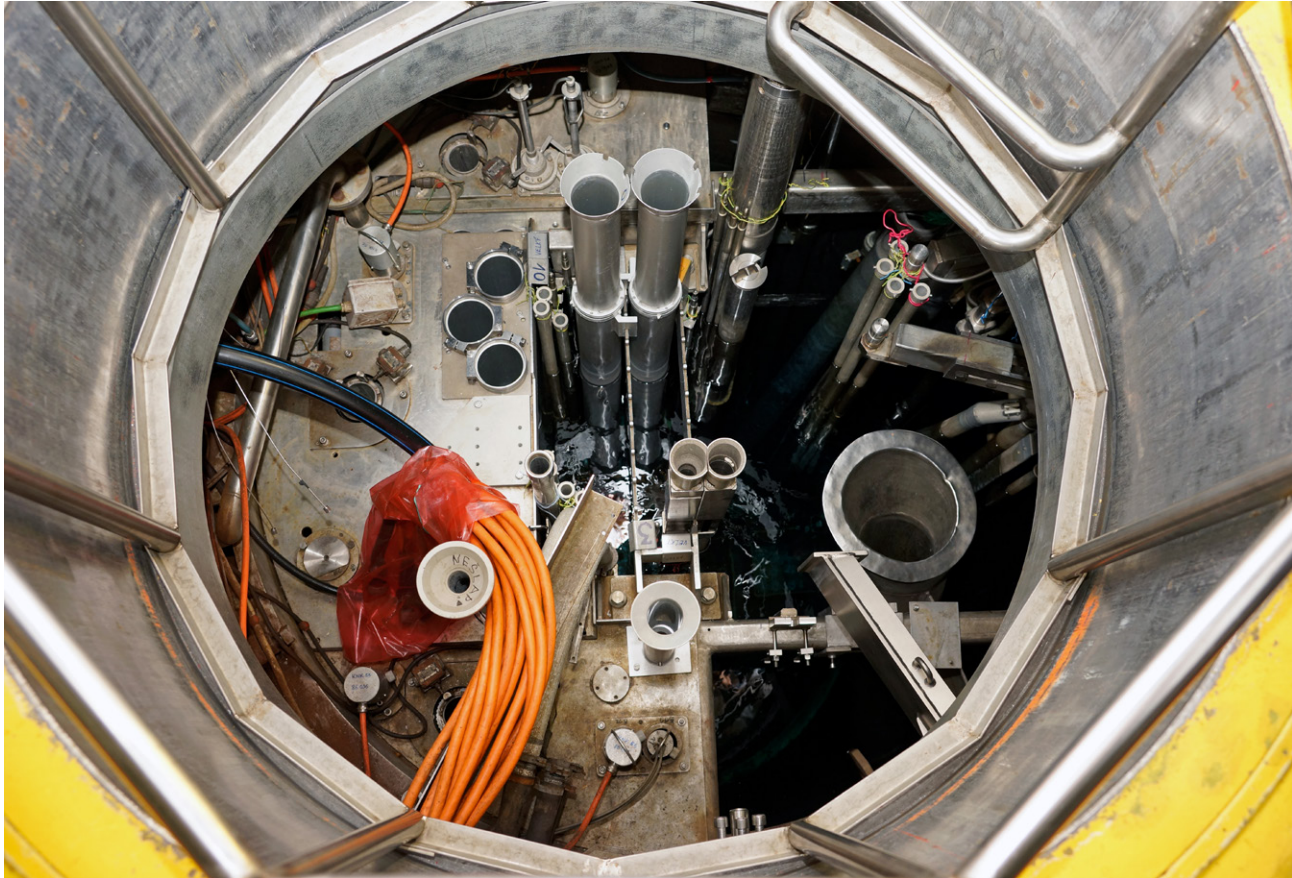
The article deals mainly with the use of LVR-15 and LR-0 reactors, which are the focus of the section Nuclear safety and reactors operation support. It also focuses on research using the neutron generator, accelerator, or the ^{252}Cf isotopic neutron source. It discusses not only their advantages and the unique possibilities they offer, but also lists specific areas and achievements that have been accomplished in the section using these devices. The text concludes with an outline of the most important projects of which the section is a part, which look into the future of nuclear energy.

V rámci Centra výzkumu Řež věnujeme pozornost i aktivitám v oblastech zaměřených na neutronovou fyziku, termohydrauliku a jadernou bezpečnost. Jednotlivé aktivity se v těchto oblastech týkají jak základního a aplikovaného výzkumu tak, i hodnocení bezpečnosti obou provozovaných výzkumných jaderných reaktorů LVR-15 a LR-0. S tím souvisí i provoz dvou gama spektroskopických laboratoří, neutronového generátoru a izotopového zdroje ^{252}Cf . Je využívána i celá řada výpočetních kódů, přičemž řada z nich byla vyvíjena na půdě CVŘ, např. subkanálový výpočetní kód SUBSALS nebo neutronově-fyzikální kód NODER pro modelování kampaní reaktoru LVR-15.

V rámci podpory provozu řežských reaktorů je zajišťována aktualizace bezpečnostní dokumentace ve stanovených termínech plnění všech podmínek definovaných v platných povoleních SÚJB a současně hodnocení veškerých změn týkajících se provozu reaktorů, která provádí experti CVŘ napříč všemi odbornostmi.

VYUŽITÍ REAKTORU LVR-15

V článku Reaktory Řež jsou popsány jednotlivé aktivity zaměřené především na materiálový výzkum, pro který je tento reaktor primárně určen. Nezanedbatelnou aktivitou je i výzkum a vývoj zaměřený na produkci radioizotopů pro medicínské účely a průmyslo-



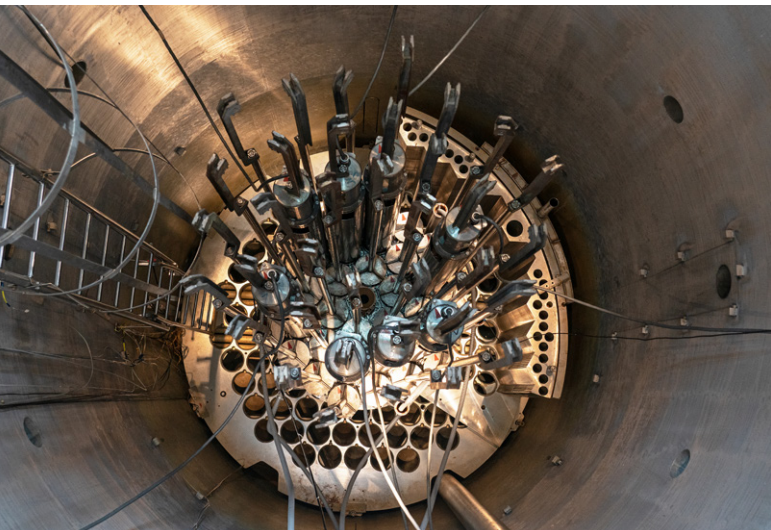
■ | Obr. 1: Pohled do výzkumného reaktoru LVR-15 |

vé využití. Medicínské radioizotopy vyzařují při své radioaktivní přeměně záření o specifické energii, to je využíváno v nukleární medicíně pro diagnostiku nebo terapii nádorových onemocnění. Pro průmyslovou aplikaci jsou radioizotopy využívány pro defektoskopické účely, stopování trhlin, šíření látek v geologických strukturách a jiné.

Reaktor také disponuje deseti horizontálními svazky neutronů, z nichž CVŘ provozuje dva, jeden termální a jeden epitermální. Neutrony ze svazků jsou úspěšně aplikovány v experimentálním výzkumu v oblastech neutronové radiografie, experimentální borové a gadolinové neutronové záchytové terapie, gelové dozimetrie, testování elektroniky pro výzkumnou infrastrukturu v CERNu, radiační stability komponent vesmírných sond pro družice ESA, pro kvalifikaci detektorů rychlých ne-

utronů se spektrometrickými vlastnostmi a integrální experimenty validace jaderných dat. Jeden z horizontálních kanálů je využíván k neutronové radiografii. Tato metodika umožňuje identifikaci míry hydridace, která se objevuje na zirkoniovém povrchu palivových proutků jaderných reaktorů, umožňuje identifikaci míst i s nízkými koncentracemi hydridů v úrovních desítek ppm, jelikož pravděpodobnost interakce dopadajících tepelných neutronů je na vodíkových jádrech podstatně vyšší než na jádrech zirkonia nebo niobu.

Od roku 2015 je na horizontálním svazku HK1 reaktoru LVR-15 vybudováno experimentální pracoviště umožňující realizaci neutronové radiografie. Pracoviště disponuje intenzivním kolimovaným svazkem tepelných neutronů o intenzitě $5 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ s průměrem 10 cm.



Obr. 2: Interiér reaktoru LR-0 před zahájením experimentu

Neutronová radiografie je prováděna metodou nepřímé digitalizace. Vzorek je umístěn do neutronového svazku ve stínícím boxu, za vzorek je umístěna detekční deska zaznamenávající intenzitu dopadajícího neutronového záření, která je po ukončení ozařování naskenovaná digitálním čtecím zařízením, čímž je získán digitální radiogram tvořený 2D maticí detekovaných intenzit svazku v jednotlivých pixelech detekční desky. Rozlišení detekční desky je $30 \times 30 \mu\text{m}^2$. Digitální radiogramy slouží k následné kvantitativní a kvalitativní analýze vzorků. V roce 2022 se předpokládá přechod na metodu přímé digitalizace s využitím neutronografické online kamery vyvinuté v CVŘ.

VYUŽITÍ REAKTORU LR-0

Dalším významným zdrojem neutronů pro výzkum je reaktor LR-0. Reaktor nulového výkonu umožňuje velmi flexibilní provoz prostřednictvím vložných zón. Mezi významné experimenty se řadí sestavení referenčního neutronového pole. Jedná se o zcela unikátní nástroj využitelný k přesnému měření dozimetrických účinných průřezů, které jsou zcela zásadní pro korektní odhady fluencí v radiačně exponovaných místech, např. pro odhad fluence v tlakové nádobě reaktoru, odhady dávek na kosmických lodích, v chráněných bunkrech medicínských urychlovačů

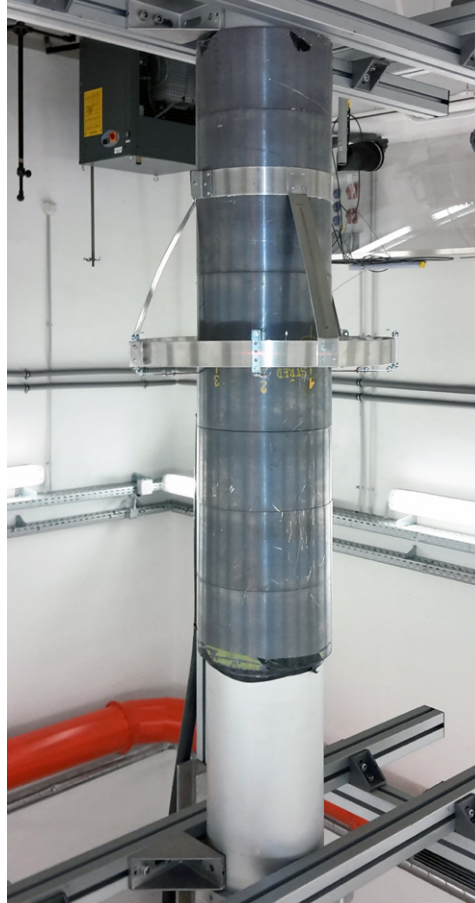
či při ozařování materiálů. Díky přesným metodám používaným v CVŘ bylo prokázáno, že spektrum neutronů s energií nad 6 MeV je identické se štěpným spektrem ^{235}U ; to je velmi důležité zjištění, neboť v případě reakcí s prahem nad 6 MeV lze jejich účinné průřezy vyhodnotit jako účinné průřezy středované štěpným spektrem ^{235}U , což jsou fundamentální veličiny použitelné přímo v hodnocení účinných průřezů v knihovnách dat.

Zároveň je aktivní zóna v tomto referenčním poli velmi dobře popsána, a je tudíž použitelná i pro studium transportních průřezů materiálů do ní vložených či vedle umístěných. V poslední době proběhl experiment s vlivem oceli na kritičnost a ukazuje se, že popis stále neodpovídá potřebám přesného popisu pro potřeby výpočtů kritičnosti.

Metodika vyvinutá na LR-0 byla aplikována i na školním reaktoru VR-1. Řežští experti provedli vůbec první měření spektrem vážených dozimetrických účinných průřezů. Dozimetrické účinné průřezy, změřené na LR-0, které posloužily jako základ nové dozimetrické knihovny IRDFF-II, byly takto nezávisle ověřeny. Zároveň se podařilo dostat experimentální výsledky z reaktoru VR-1 do databáze EXFOR, jež slouží jako databáze experimentálních dat používaných při hodnocení účinných průřezů.

V rámci dlouhodobé spolupráce podpořené mezivládními dohodami mezi US-DOE a MPO ČR v oblasti technologií MSR a FHR byly na reaktoru LR-0 provedeny experimenty s vložnými zónami v rámci studia neutronických vlastností fluoridů a v budoucnu se plánují i experimenty s chloridovými solemi.

Obr. 3: Neutronový generátor
NSD-350-24-C-W-S typu IEC



NEUTRONOVÝ GENERÁTOR

CVŘ provozuje neutronový generátor (NG) produkující neutrony s energií 14 MeV, které lze používat pro validaci účinných průřezů (knihoven jaderných dat). NG lze použít i pro oblast fúze, kde je s ohledem na komplikovanější technologii NG oproti izotopickému zdroji mnohem větší nedostatek jaderných dat.

Validace pomocí integrálních experimentů probíhá měřením neutronových únikových spekter na sestavách typu benchmark nebo mock-up, které jsou ovšem výhradně ve tvaru bloků z čistého materiálu nebo vrstev kombinovaných z různých konstrukčních materiálů určených pro fúzi nebo fúzní zařízení. NG je umístěn před sestavou a detektory za sestavou, popř. uvnitř sestavy. Výsledkem validace je stanovení koeficientu C/E, který určuje míru shody výpočtu (C) s experimentem (E).

V posledních letech probíhala v laboratoři NG řada experimentů v rámci projektu EUROfusion, kdy byla měřena úniková spektra pomocí scintilačního detektoru typu stilben na modelech WCLL (Water-Cooled Lithium Lead) a DCLL (Dual-Coolant Lead-Lithium) pro breeding blanket fúzní demo elektrárny.

^{252}Cf

Izotopický zdroj neutronů ^{252}Cf je jediným mezinárodně uznávaným standardem neutronového spektra, tj. nejistota energetického rozložení neutronů v jeho štěpném spektru je poměrně nízká, a proto je vhodný pro validaci neutronových transportních knihoven a knihoven účinných průřezů.

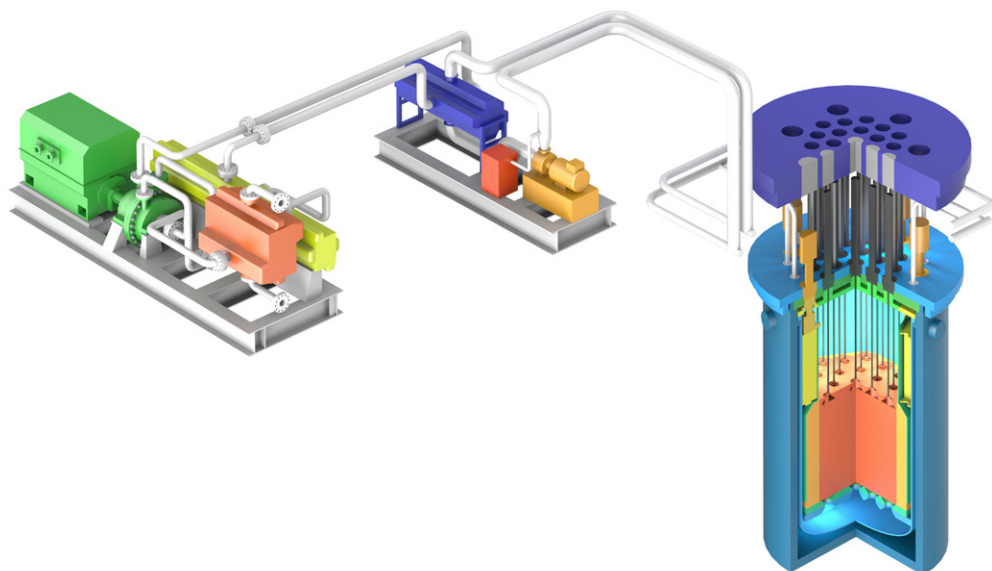
Experimenty i výpočty transportních knihoven probíhají na benchmarkových sestavách (tzn. v jednoduchých geometriích) z čistých reaktorových konstrukčních materiálů, jako

jsou železné, niklové, lehkododní a těžkododní koule s různými průměry nebo bloky (krychle) z grafitu, mědi nebo nerezů, popř. wolframu. Zdroj ^{252}Cf se umístí do středu sestavy a vhodným detektorem se měří únikové neutronové spektrum.

Zmínit lze zejména dva typy experimentů:

- validace účinných průřezů prahových reakcí v různých knihovných prostřednictvím měření gama záření aktivovaných materiálů pomocí polovodičového HPCGe detektoru
- validace transportu neutronů různými konstrukčními materiály důležitými pro jaderný průmysl měřením únikových neutronových spekter s využitím plynových nebo scintilačních detektorů.

V uplynulých letech proběhla validace několika desítek dozimetrických účinných průřezů knihovny IRDFF (knihovny jaderných dat), kterou zaštiťuje IAEA. Účinné průřezy z této knihovny se používají k hodnocení míry poškození tlakových nádob reaktoru, proto je správnost účinného průřezu zvláště významná. Nejnovější verze knihovny IRDFF-II byla aktualizována právě na základě měření v laboratoři s ^{252}Cf . V laboratoři také proběhly úspěšné validace účinných průřezů i na exotických materiálech, jako je iridium, germanium a lutecium.



Obr. 4. Schéma malého modulárního reaktoru Energy Well

V návaznosti na to bylo referenční pole sestavené v LR-0 zahrnuto mezi 12 benchmarkových neutronových referenčních polí na světě. V současnosti probíhají práce na změření účinných průřezů nových reakcí, použitelných v budoucnosti, např. dozimetrické reakce $^{117}\text{Sn}(n,n')$ a $^{58}\text{Ni}(n,x)^{57}\text{Co}$.

Dobře popsané směsné pole neutronů a gama záření ^{252}Cf umožňuje v neposlední řadě provádět i ozařovací experimenty, při kterých je potřeba stanovit absorbovanou dávku ozařovaného materiálu či přístroje, jako jsou polovodičové diody, fotovoltaické články, světlovodiče nebo dozimetry.

URYCHLOVAČ

Díky rozsáhlým zkušenostem v rámci scintilační spektrometrie a gama spektrometrie se experti z CVŘ zapojili do charakterizace unikového spektra neutronů při výrobě běžných radiofarmak (^{18}F). Tato problematika je zcela zásadní s ohledem na popis radiační situace v okolí produkčního terče. To je důležité pro výpočty aktivace bunkru či přímo komponent cyklotronu. Jedná se o zcela unikátní práci, díky které IAEA vypsal Coordinated Research Project, na němž se experti CVŘ budou také podílet.

TRANSMUTAČNÍ DETEKTORY

Pojem transmutační detektor (TMD) byl zaveden v roce 2009 v rámci projektu podpořeného z programu MPO ČR. Jedná se o zcela nový způsob monitorování fluence neutronů vyvinutý v rámci spolupráce CVŘ a ÚJV Řež. Transmutační detektory, podobně jako detektory aktivační, jsou založeny na interakcích neutronů s terčovým jádrem. TMD však využívají stabilní transmutované izotopy, zatímco aktivační detektory radioaktivní izotopy. Fluence neutronů se po ozaření detektoru stanoví z koncentrace transmutovaného izotopu měřené pomocí analytické metody místo měření aktivity radioizotopu v případě aktivačních detektorů.

Hlavní výhodou TMD je nezávislost na historii ozařování, což může pomoci zpřesnění dlouhodobého měření fluence neutronů, v důsledku čehož lze v budoucnu například prodloužit provoz jaderných elektráren při zachování bezpečnosti provozu.

V projektu CORD TA ČR (2017–2019) byly vyvinuty sady nehomogenních transmutačních detektorů, jež lze využít například ve svědečném programu v jaderných elektrárnách. Byla navržena sada o celkem osmi TMD. Část

z nich je ve formě homogenní fólie, další část se skládá z křemíkové matrice, ve které je implantována tenká vrstva terčového izotopu nebo nanese tenká vrstva na povrch krystalu křemíku. Při ověřovacích experimentech se ozařování provádělo na výzkumném reaktoru LVR-15 a měření koncentrací pomocí hmotnostního spektrometru sekundárních iontů (SIMS) v Centru vysoce citlivých analytických přístrojů CVŘ.

V současnosti probíhá projekt zabývající se ověřením knihoven jaderných dat využívaných ke stanovení fluence pomocí aktivačních a transmutačních detektorů. Byla připravena sada šesti aktivačních a sedmi transmutačních detektorů citlivých na rychlé neutrony. Obě sady se momentálně ozařují v neutronovém poli reaktoru LVR-15. Následně budou měřeny v laboratořích za pomoci HPGe detektoru a spektrometru SIMS. Z výsledků bude určena fluence a provedeno srovnání mezi sadami.

Velká část výše uvedených aktivit, byť se může zdát, že slouží především k základnímu výzkumu, přispívá k budování robustního know-how, které je využíváno i pro výzkumnou podporu svědečných programů jaderných elektráren. CVŘ je garantem a autorem metodik v oblasti stanovení radiační zátěže tlakových nádob jaderných reaktorů a jejich vnitřních částí. V rámci těchto aktivit kombinací měření a výpočtů je stanovována radiační zátěž na jednotlivé komponenty. Radiační zátěž na jednotlivé komponenty vstupuje do hodnocení jejich zbytkové životnosti. Svědečný program je nedílnou součástí těchto aktivit, jejichž cílem je určení současného stavu a predikce degradace materiálu. Zároveň pomocí ozařování na reaktoru LVR-15 jsou získávána chybějící data, jejichž měření na energetickém reaktoru není uskutečnitelné.

ENERGY WELL

Dlouhodobě budované know-how, unikátní výzkumná infrastruktura a zkušené týmy umožnily CVŘ iniciovat projekt vývoje malého modulárního reaktoru známého pod názvem Energy Well. Ambicí tohoto projektu je vyvinout moderní, inherentně bezpečný, vysokoteplotní modulární reaktor, který využívá nej-

novější unikátní poznatky v oblasti výzkumu technologií tekutých solí. Česká republika je kromě USA a Číny jedinou zemí, která si investicemi do těchto technologií zajistila celosvětový náskok.

Jedná se o reaktor o výkonu 20 MW se sedmiletým palivovým cyklem, nízkou hustotou výkonu a vysokým zaměřením na pasivní bezpečnost a jednoduchost. Skládá se ze dvou okruhů pracujících s fluoridovou solí a jednoho okruhu pracujícího se superkritickým CO₂ (tato technologie je podrobněji popsána v tomto čísle v článku Technologický výzkum a vývoj v CVŘ).

Systém je navržen pro dodávku elektřiny nebo tepla v závislosti na regionální poptávce. Díky svým robustním bezpečnostním prvkům bude možné nasadit Energy Well do obydlených oblastí, což umožní široké spektrum využití, a zároveň i do odlehklých oblastí jako dlouhodobý zdroj elektrické energie a tepla.

Ing. David Harut, Ph.D.

david.harut@cvrez.cz



Absolvoval Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze v oboru Jaderné inženýrství, kde se v rámci své bakalářské a inženýrské práce věnoval problematice malých modulárních reaktorů. V roce 2019 na stejné fakultě obhájil disertační práci zabývající se stanovením radiační zátěže na komponenty jaderných reaktorů. V Centru výzkumu Řež pracuje od roku 2014, postupně zde zastával vedoucí pozice v odděleních Neutronových výpočtů, Neutronové fyziky a Termohydrauliky. Následně se stal ředitelem sekce Jaderná bezpečnost a podpora provozu reaktorů, kterou vede dodnes. V rámci své specializace pracoval i ve skupině TSO SÚRO či ve společnosti Škoda JS. Je jedním ze spoluautorů reaktorů EnergyWell a CR-100. Od roku 2018 je také členem komise NTD A.S.I.

Materiálový výzkum a vývoj v Centru výzkumu Řež

RNDr. Ondřej Srba, Ph.D.

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Jaderné elektrárny hrají důležitou roli nejen v českém energetickém mixu. Jejich dlouhodobý spolehlivý provoz a dobrý technický stav závisí zejména na materiálech, ze kterých jsou vyrobeny. Centrum výzkumu Řež je v oblasti materiálového výzkumu a diagnostiky respektovaným pracovištěm. Díky unikátní infrastruktuře jsou jeho pracovníci schopni měřit změny materiálu vlivem koroze v prostředí, únavy, vlivu tečení nebo záření a v mnoha případech i všech vlivů společně. Tyto podmínky věrně simulující realitu jsou vhodné nejen při ověřování a měření stavu komponent ve stávajících elektrárnách, ale i pro testování nových materiálových kandidátů pro budoucí jaderné a fúzní elektrárny.

Nuclear power plants play an important role not only in the Czech energy mix. Their long-term reliable operation and good technical condition depend mainly on the materials from which they are made. The Research Centre Řež is a respected workplace in the field of materials research and diagnostics. Thanks to the unique infrastructure, its workers are able to measure material changes due to corrosion in the environment, fatigue, the effect of teaching or radiation, and in many cases all the effects together. These conditions faithfully simulating reality are suitable not only for verifying and measuring the condition of components in existing power plants, but also for testing new material candidates for future nuclear and fusion power plants.

Jednou z klíčových podmínek pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu nejen jaderných elektráren jsou odolné a kvalitní materiály. Materiálový výzkum a vývoj má v Řeži dlouhou historii. Již na přelomu padesátých a šedesátých let byly společně s výzkumným reaktorem (tehdy VVR-S) provozovány experimentální smyčky pro expozici materiálů v nejrůznějších podmínkách. V rámci projektu SUSEN byly vybudovány další experimentální smyčky pro expozice materiálů například v prostředí vysokoteplotního helia, roztavených solí, olova nebo superkritického CO_2 , čímž se výrazně rozšířily možnosti materiálového výzkumu, který se zaměřuje nejen na materiály v současnosti provozovaných jaderných reaktorů, ale i na pokročilé koncepty IV. generace.

Nově vyvíjené nebo stávající optimalizované materiály musí být osvědčené a vyzkoušené v podmínkách provozu i v nadprojektových situacích. Každý materiál, který je určen do nejextrémnějších podmínek provozu, musí být otestován, tato fáze pak končí udělením licence nebo akreditací dané soustavy či komponenty. Materiálový výzkum v naší společnosti je zaměřen právě na získávání takovýchto znalostí a poznatků pro materiály nebo systémy. K tomuto účelu využíváme výzkumný jaderný reaktor pro sledování změn v závislosti na stupni ozáření, dále horké komory, to je komplexní systém laboratoří, které nám dovolují bezpečně testovat ozářené materiály. Řada specializovaných mikroskopů a přístrojů nám umožňuje provádět analýzy mikrostruktury materiálu a degračních mechanismů.

kteří v těchto materiálech probíhají. V poslední řadě vyvíjíme pokročilé inspekční techniky a manipulátory (roboty), které provádí inspekce elektráren v pro člověka nepřístupných místech. K tomu využíváme řadu ne-destruktivních technik a 3D skenování.

JADERNÉ PALIVO A JEHO SLOŽKY

Jaderné palivo je jednou z nejdůležitějších složek jaderné elektrárny a je také jednou z hlavních složek ovlivňujících bezpečnost jaderné elektrárny. Jaderné palivo se skládá z palivové složky, často ve tvaru pelety, pokrytí paliva, většinou trubičky s průměrem 1 cm, ve které jsou naskládány palivové pelety. Palivový soubor pak drží vše pohromadě. V současnosti se výzkum zaměřuje převážně na pokrytí paliva a jeho chování při nadprojektových situacích. V rámci tohoto výzkumu byly identifikovány nové degradační mechanismy nebo provozní problémy, které je možné eliminovat novými postupy výroby nebo novými materiály pro pokrytí paliva.

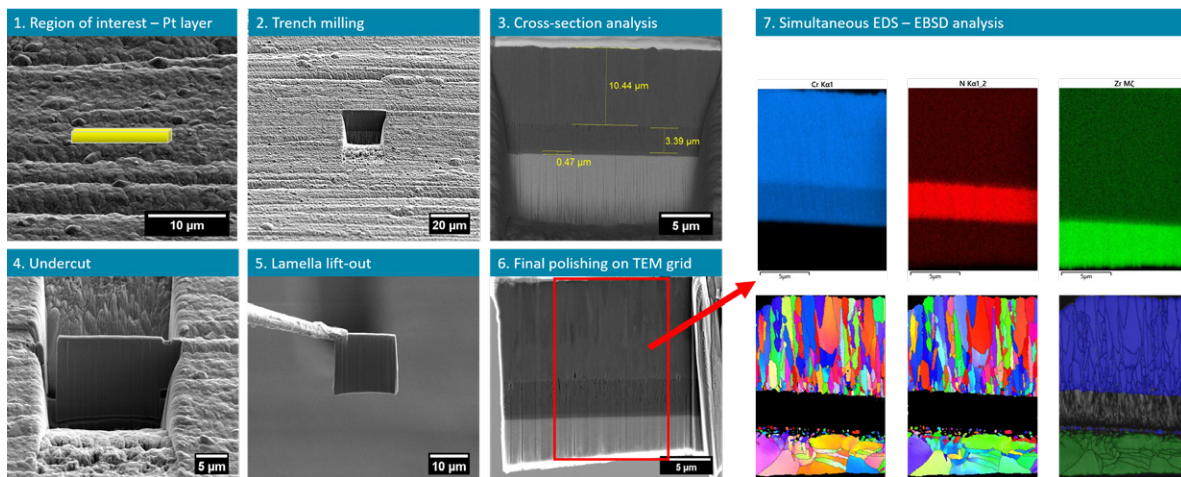
V současné době je výzkum a vývoj zaměřen především na testování materiálů pokrytí paliva, tj. jak konvenčních zirkoniových (Zr) slitin, tak nových materiálů typu Accident Tolerant. Tento název se v poslední době spíše zmiňuje jako Advanced Technology Fuel. Za ATF považujeme tenké vrstvy a multivrstvy na bázi Cr/CrN na Zr slitinách a dále též povlakové trubky ze slitin FeCrAl či kompozitní povlakové trubky SiC/SiC, které jako jedny z alternativních materiálů splňují kritérium Accident Tolerant. CVŘ v oblasti testování palivového pokrytí provádí mechanické testování (tahové a creepové zkoušky, fretting testy), mikrostrukturní analýzy v horkých a polohorkých komorách a kombinaci mikroskopie s možností nanoindentace a nanoscratch testu na ozářených vzorcích (Obr. 1), korozní zkoušky v autoklávech v PWR (prostředí tlakovodních reaktorů) či SCW (prostředí superkritické vody). Mikrostrukturní a chemické analýzy probíhají na elektronových mikroskopech a slouží k charakterizaci radiačně-indukovaných defektů (RID) v mikrostrukturu vlivem neutronových částic (Obr. 2 a 3). Studium radiačního stárnutí odlišných typů Zr slitin ozařovaných ve formě materiálových vzorků Material Cluster Assembly (MCA)

je jedním z dlouhodobých projektů, na kterých se CVŘ podílí. Pro provedení výpočetních analýz nutných pro palivo v reaktoru i pro jeho skladování je nutnou podmínkou získání informací o mechanických vlastnostech a s tím spojených mikrostrukturních změnách v důsledku ozáření, které se vyhodnocují v našich laboratořích. Další alternativou z dlouhodobého hlediska, zejména pro malé modulární reaktory (SMR) a pro reaktory IV. generace, je matrice paliva se zvýšenou hustotou a zlepšenou teplotní vodivostí (UN, U-Mo, U_3Si_2 , či UO_2 silně dopované kovovou složkou, aj.).

Obr. 1: Operátorovna polohorké komory se světelným mikroskopem, skenovacím elektronovým mikroskopem a nanoindentorem

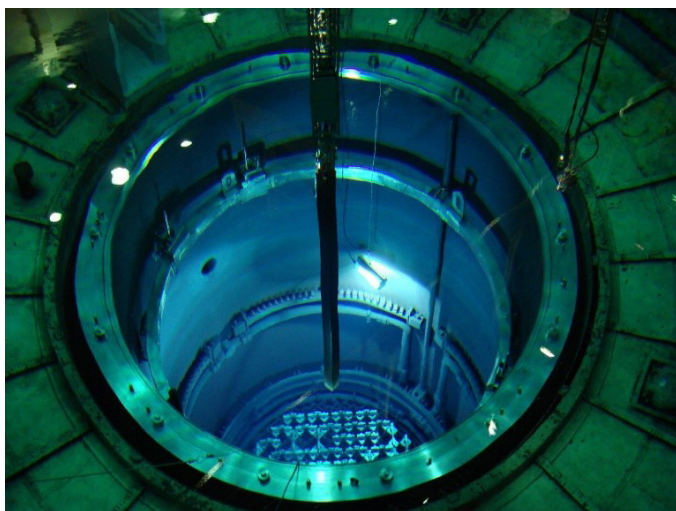


Obr. 2: Transmisní elektronový mikroskop pro charakterizaci radiačně-indukovaných defektů



Obr. 3: sekvence snímků odběru vzorku z ATF pokrytí pomocí fokusovaného iontového svazku na skenovacím elektronovém mikroskopu a chemická a krystalografická analýza rozhraní

Obr. 4: Inspekce paliva na jaderné elektrárně



V CVŘ se rovněž provádí izotopová analýza mikro/submikroskopických částic obsahujících štěpné izotopy uranu (či plutonia). Zde se využívá metody jaderného štěpení fission track, která byla v CVŘ zavedena s využitím klíčových infrastruktur skenovací elektronové mikroskopie (FIB-SEM) a hmotnostní spektrometrie sekundárních iontů (SIMS). Celá tato oblast se zaměřuje na detekci a určení stopového množství jaderného materiálu pro forenzní analýzy a je široce využívána mezinárodní komunitou a organizacemi (Obr. 5).

Pro rozšíření kompetencí v oblasti pokrytí typu ATF a alternativních paliv s vysokým obsahem uranu se CVŘ zapojilo v rámci projektu navrženého do programu TA ČR Národního centra kompetence II do aktivit zaměřených na perspektivní jaderná paliva pro současné i budoucí jaderné zdroje včetně SMR, které budou vycházet nejen z dosavadních výsledků získaných v rámci projektu TA ČR Metodiky pro ozářené ATF.

Významnou součástí výzkumu a vývoje pokrytí paliva jsou rovněž inspekce paliva, které provádí palivová skupina CVŘ na jaderné elektrárně pomocí nedestruktivních metod (Obr. 4) již řadu let.

DEGRADACE MATERIÁLŮ V PROSTŘEDÍ

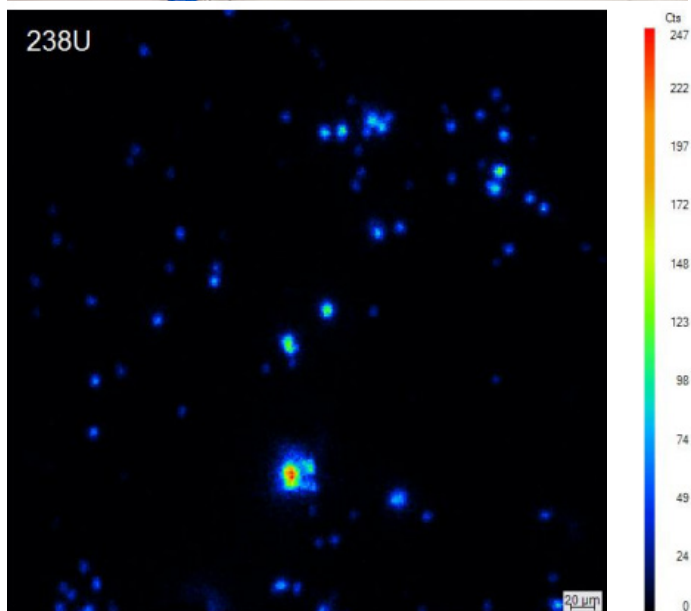
Další výzkumnou oblastí je studium degradace materiálů v prostředí médií pro stávající a budoucí jaderné reaktory. Zde se výzkum zaměřuje na míru korozního poškození, jeho příčiny a popis mechanismů, které korozi ovlivňují. Na základě těchto zjištění dochází k úpravám materiálů a komponent pro eliminaci vlivů korozních procesů. Často se jedná o povrchovou úpravu materiálu, vytvoření korozivzdorného povlaku, změnu tvaru komponenty nebo změnu chemického složení materiálu. Následným krokem je analýza současného vlivu koroze a mechanického namáhání, a nakonec i radiačního poškození.

Mezi zkoumaná chladiva v rámci této aktivity patří He provozované při teplotě 750–900 °C (Obr. 6), roztavené těžké kovy typu Pb, Pb-Li či Pb-Li a roztavené soli na bázi fluoru a chlóru. Dále pak superkritická voda s teplotou nad 374 °C a tlaku více než 22 MPa.

Korozivita prostředí a teplota chladiva kladou velké požadavky na použité konstrukční materiály, a proto je nezbytné věnovat pozornost degradačním mechanismům, které na konstrukční materiály působí. Pro hodnocení degradačních procesů konstrukčních materiálů či vrstev jsou využívány korozní smyčky a autoklávy simulující tato prostředí a v pozdější fázi výzkumu se přidává také vliv mechanického namáhání a napětí, které interaguje s korozními procesy a ve většině případů korozi lokalizuje či urychluje (Obr. 7). Po vytvoření korozního napadení jsou vzorky pozorovány pomocí řady mikroskopů. Ty dovolují zjistit hloubku poškození, kde dochází ke koroznímu napadení a jak koroze probíhá (Obr. 8). Důležité je také složení korozních produktů a jejich formy. Některé materiály jsou schopny vytvořit kompaktní korozní vrstvu, která pak brání dalšímu rozvoji koroze, a tím dojde k pasivaci materiálu a dramatickému zvýšení rezistivity vůči korozi. Toto je žádoucí výsledek a většina výzkumného zkoumání směřuje k dosažení právě tohoto výsledku.

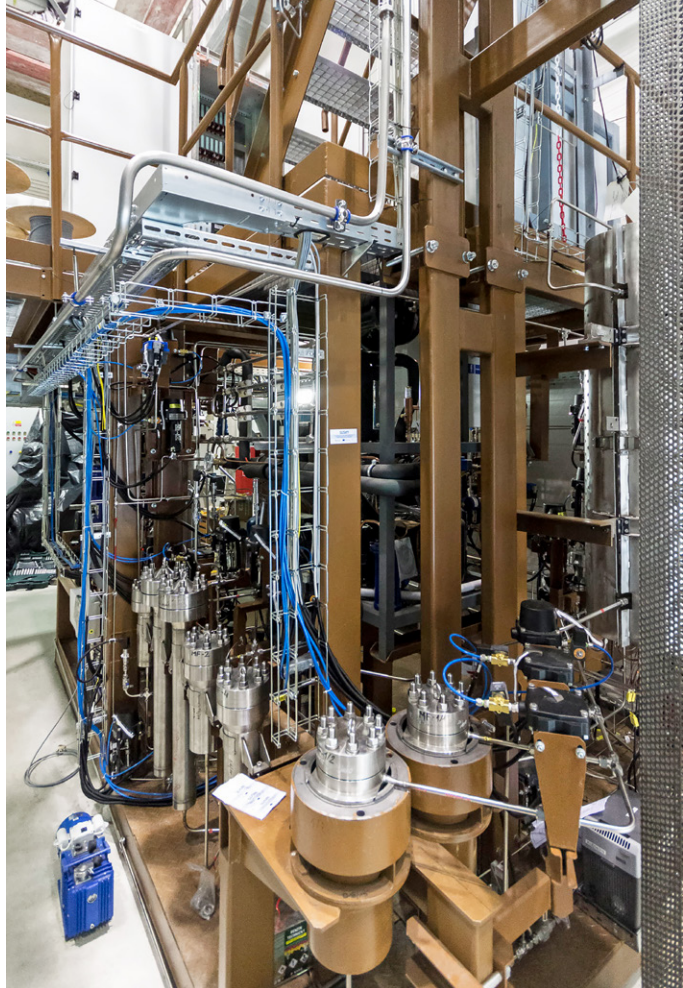
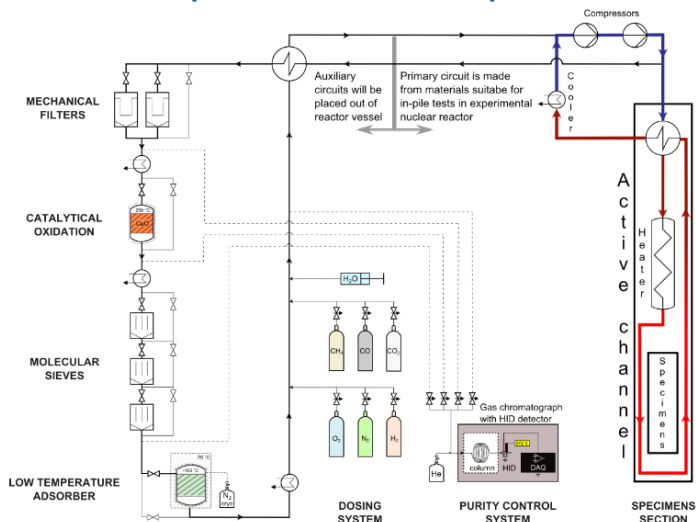
ZKOUMÁNÍ BETONŮ A JEHO SLOŽEK

Prodlužování životnosti jaderných zařízení klade nové požadavky na zajištění integrity a bezpečnosti systémů, konstrukcí a komponent. Jedním z nich je stav betonových konstrukcí. Běžně se posuzují pouze materiály a komponenty, které jsou v přímém kontaktu se zářením. Komponenty, které jsou ve větší vzdálenosti, se neposuzují, protože vliv záření je malý kvůli klesající intenzitě záření se vzdáleností od zdroje. Bohužel s prodlužující se životností dochází ke kumulaci efektů z ozáření a nyní se výzkum v této oblasti také zaměřuje na popis radiačního poškození. Dalším důvodem je plánovaná výstavba hlubinného uložště pro použité palivo, kde se plánují také konstrukce z betonu, a je tedy nutné vědět, jak se bude beton chovat při dlouhodobém vystavení zbytkovému záření, které použité palivo produkuje.



Obr. 5: Zařízení FIB-SEM (nahoře), SIMS (uprostřed) a izotopový obraz částic obsahující ^{238}U (dole)

Experimental helium loop HTHL

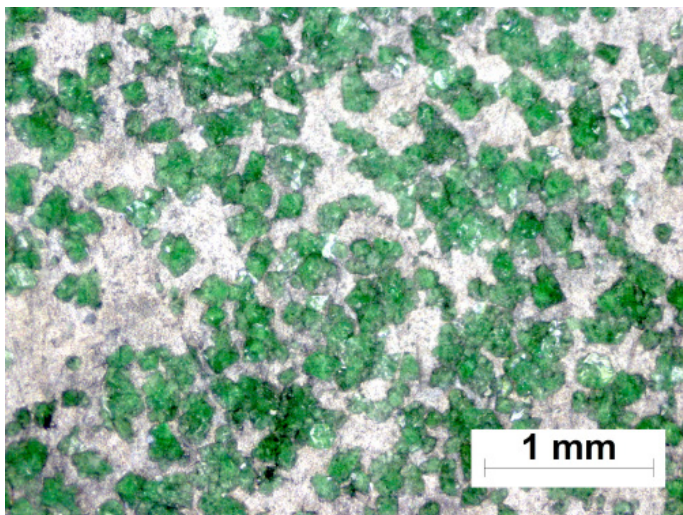


Obr. 6: Vysokoteplotní heliová smyčka HTHL, vlevo schéma, vpravo realizace smyčky |

Obr. 7: Autokláv pro mechanické zkoušky v eutektiku Pb-Li |



Obr. 8: Povrch zkušebního tělesa s krystaly soli na bázi chromu po 600h expozici v prostředí fluoridové soli NaBF₄ + NaF při teplotě 725 °C



| Obr. 9: Stíněné rukavicové boxy | >

| Obr. 10: Anaerobní boxy | v

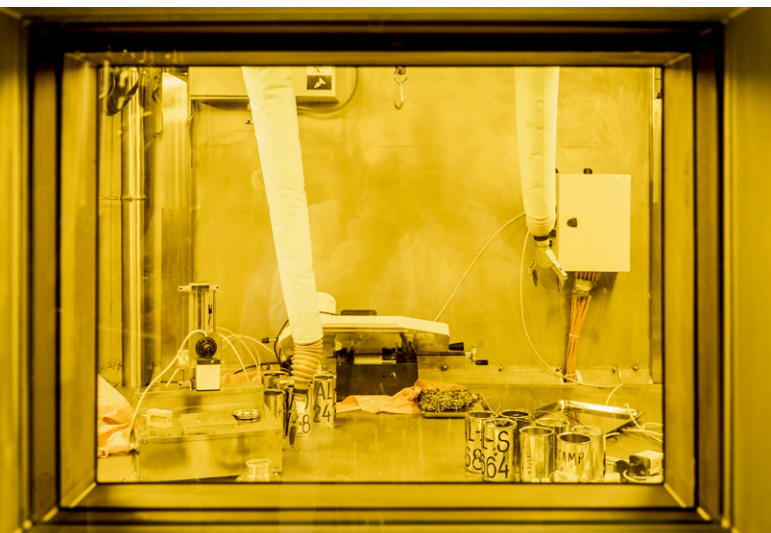
| Obr. 11: Rentgenový difraktometr pro měření ozářených práškových vzorků | v

Při zkoumání ozářených betonů a jejich součástí je nutné brát na zřetel složitosti, které přináší práce s ozářeným materiálem, který snadno během testování produkuje prášnou aktivitu a kontaminaci. Za tímto účelem má CVŘ vybudovanou infrastrukturu horkých komor, hermetických stíněných rukavicových boxů (Obr. 9) a Centrum vysoce citlivých analytických přístrojů, kde se vzorky připravují v anaerobních boxech (Obr. 10). Projekty se zaměřují převážně na popis radiačního růstu a jeho vliv na mechanické vlastnosti betonu a následně na popis mikrostruktury a pozvolný rozpad krystalické struktury na amorfní. Jako nejtěžší v rámci projektů pro analýzy radiačního stárnutí agregátů byla příprava tenkých výbrusů pro světelnou a skenovací elektronovou mikroskopii a práškových vzorků pro rentgenovou difrakční analýzu (XRD, Obr. 11).

V oblasti ukládání nebezpečných odpadů se věnujeme především výzkumu, který je zaměřen na hlubinné úložiště, za účelem zajištění jeho dlouhodobé životnosti a bezpečnosti. Hlubinné úložiště představuje multibariérový systém skládající se z inženýrské bariérové ochrany (zahrnující úložný obalový soubor a geotechnickou ochranu bentonitem) a z přírodní bariérové ochrany, kterou tvoří geologické prostředí. Hlavním cílem těchto bariér je zabezpečit dlouhodobou izolaci radionuklidů od okolního prostředí. V této oblasti se aktivity CVŘ zaměřují především na laboratorní výzkum (např. studium dlouhodobého chování úložného obalového souboru, bentonitu a cementových materiálů jako bariér hlubinného úložiště), a to s využitím anaerobních rukavicových boxů, vyznačujících se nízkou koncentrací kyslíku, čímž



| Obr. 12: Práce v horké komoře |



je simulováno prostředí hlubinného úložiště. To umožňuje studovat chování multibariérového systému za anaerobních podmínek simulujících nejdlejší a konečnou fázi vývoje prostředí hlubinného úložiště. Součástí výzkumných aktivit je rovněž oblast využití materiálů na bázi anorganických matic pro jaderný průmysl, které přispívají k dlouhodobému a bezpečnému provozu jaderných elektráren a dále řeší problematiku výzkumu a vývoje v oblastech energetiky a pokročilých materiálů. Zde jsou využívány metody, jako jsou síťová analýza velikosti částic, měření specifického povrchu, porozity a distribuce šířek pórů a jejich objemu pomocí metody sorpce plynu a dále mechanických zkoušek nebo nedestruktivní zkoušky ultrazvukem (Obr. 12).

INSPEKCE ZAŘÍZENÍ POMOCÍ NEDESTRUKTIVNÍCH TECHNIK (NDT)

Naše NDT laboratoře jsou zaměřeny zejména na řešení vývojových projektů a aplikovaný výzkum v oblasti nedestruktivního zkoušení v energetice. Náš tým expertů je certifikován ve všech metodách, které se používají na elektrárnách. Konkrétně se jedná o UT, PAUT, ET, VT, PT, MT, MMM a AE. Zabýváme se zejména vývojem nových metod nedestruktiv-

ního zkoušení, jejich testováním a následnou aplikací v praxi. Pro tyto činnosti jsou k dispozici nejmodernější přístroje a vybavení, mezi které patří například výkonné zařízení pro ultrazvukové zkoušení technikou phased array, vířivé proudy s využitím pole cívek, 3D skenování pomocí skenovacího ramene nebo endoskop k provádění vizuální kontroly v těžko přístupných prostorech a další. Mezi významné aktivity této laboratoře patří v současné době také výzkumná podpora sledování kritických komponent na jaderných i klasických elektrárnách. Jedná se např. o dělicí roviny reaktoru (Obr. 13), vady měřících tras uvnitř parogenerátoru a další podpůrné diagnostické činnosti na jaderné elektrárně. V oblasti klasických elektráren jsou činnosti nejvíce zaměřeny na sledování degradace parovodů creepovým poškozením, a to zejména v ohybech, kde se pomocí 3D skenování sleduje deformace materiálu a pomocí ultrazvukové techniky phased array i detekce creepových trhlin ve svarových spojích.

S rostoucími požadavky na bezpečnost, zkracování doby odstávek, prodloužování životnosti a snižování nákladů provoz a údržbu vzniká potřeba zefektivnění diagnostiky a oprav částí jednotlivých technologií. Jednou z možností je použití manipulátorů. Jako manipulátory označujeme zařízení vykonávající pohyb zpravidla diagnostického prvku nebo nástroje.



| Obr. 13: 3D měření drážky těsnění dělicí roviny reaktoru |

Jednotlivé prvky mohou být diagnostické (vybavené kamerou, NDT sondou nebo snímačem) nebo pracovní (osazené kleštěmi, vysavačem, bruskou nebo jiným nástrojem), případně kombinací obojího. V CVŘ se zabýváme vývojem manipulátorů pro použití v místech nepřístupných pro lidskou obsluhu, jako jsou stísněné prostory, výšky, vysoké teploty, radiace, voda, toxické prostředí atd. Manipulátory dále najdou využití při potřebě opakování stejného pohybu, řešené jako kolejnicové vedení a často také zkombinování funkce více nástrojů, typicky NDT sonda + enkodér. Většina námi vyvinutých manipulátorů najde uplatnění v elektrárnách, jejich použití ale může být mnohem širší v mnoha průmyslových odvětvích.

Příklady manipulátorů vyvinutých a vyvíjených v CVŘ:

Manipulátor ILJA

- „crawler“ osazený dvěma kamerami a motorickou paží, pro inspekce a odstraňování cizích předmětů
- možnost nasazení v těžko dostupných místech (potrubí apod.), stupeň krytí IP 67

Manipulátor HRK

- pro UT nepřístupných nátrubků regulačních tyčí - víko reaktoru
- umožní dopravit UT sondu na zkoušený povrch nátrubku, motoricky otestovat 360° povrchu a spojit signál ze sondy s její polohou pomocí signálu z enkodéru

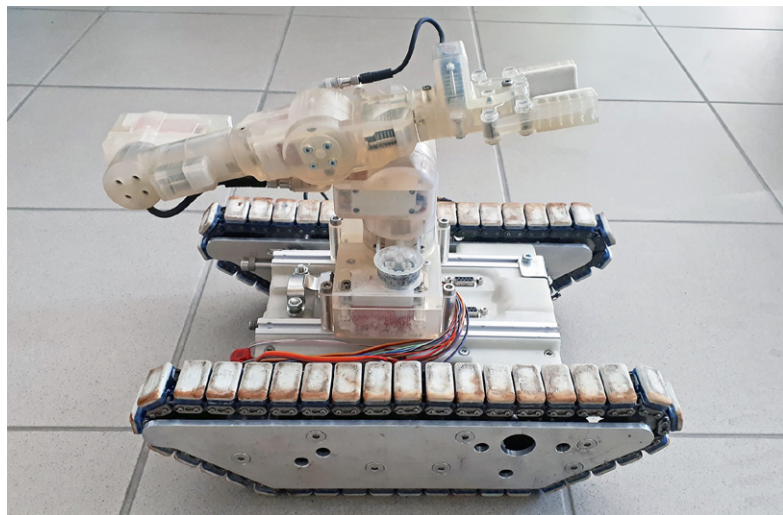
Rameno SPEK - ve vývoji

- doplnění dálkově ovládané ruky na stávající NON-OEM manipulátor
- zařízení FOSAR (Foreign Objects Search and Retrieval) - hledání a odstraňování cizích předmětů

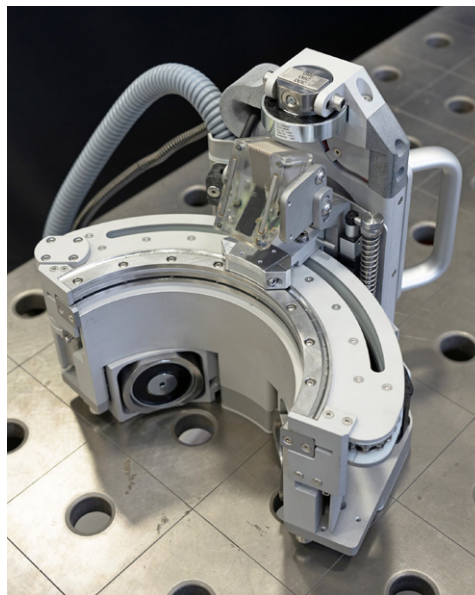
Manipulátor WOL - ve vývoji

- pro UT svaru opraveného metodou weld overlay na nátrubcích super havarijního napájení parogenerátoru
- cíl: automatizace a zrychlení dosud ručně prováděných kontrol

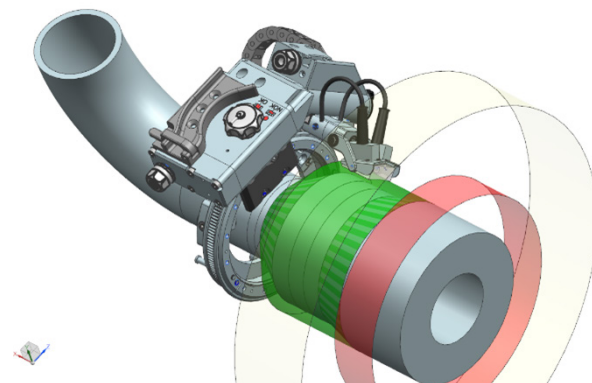
Obr. 14: Manipulátor ILJA



Obr. 15: Manipulátor HRK



Obr. 16: Schéma vyvíjeného manipulátoru WOL





Obr. 17: Mezinárodní jaderně-forenzní cvičení CMX-7 |

ŘEŠENÉ PROJEKTY

V minulosti byly úspěšně ukončeny projekty zaměřené na testování tlakové nádoby reaktoru (TNR) a vnitřních částí reaktoru (VČR), např. projekt Soteria či Samara II., kde se CVŘ podílelo zejména na vyhodnocení strukturních charakteristik materiálů po ozáření a zčásti také mechanickými zkouškami. V současné době se v mezinárodní komunitě připravují pilotní projekty zaměřené na specifické in-situ TEM experimenty pro pozorování vyžhání radiačních vad v mikrostruktuře. CVŘ má k dispozici speciální držák vyvinutý pro tepelné či mechanické zatěžování vzorků při současné analýze chování RID (tzv. in-situ experimenty).

V rámci projektu Moderní kovové materiály se testují nové typy slitin s vysokou entropií (HEA) jako perspektivní materiály pro konstrukci vnitřní vestavby jaderných reaktorů. V dnešní době se na tyto slitiny upírají zraky většiny výzkumných organizací díky velmi slibným výsledkům, kterých bylo zatím dosaženo. Tyto slitiny vykazují vysokou pevnost, korozní odolnost i v nejtěžších korozních podmínkách a radiační odolnost. V rámci tohoto projektu byly vůbec poprvé ozářeny tyto slitiny v reaktoru za účelem ověření radiační odolnosti. Tyto informace by měly být v roce 2022 publikovány.

Jsme zapojeni v řadě mezinárodních evropských projektů (dřívější Horizon 2020 a nyní Horizon Europe). Mezi nejvýznamnější řešené projekty patří: ECC-SMART Joint European Canadian Chinese development of Small Modular Reactor Technology, který řeší otázky spojené s budoucí realizací malých modulárních reaktorů SCW-SMR, které vyu-

žívají jako chladivo právě SCW. Jednou z klíčových otázek je výběr vhodného materiálu pro pokrytí paliva. Pro tento účel byl v rámci aktivit CVŘ navržen a zahájen unikátní experiment zaměřený na zhodnocení vlivu neutronového záření na korozní chování těchto materiálů v prostředí SCW.

Jako velký úspěch chápeme skutečnost, že v roce 2022 jsme po šestiletém úsilí splnili všechny požadavky na členství v síti analytických laboratoří (NWL) IAEA. V roce 2022 proběhlo první mezinárodní jaderně-forenzní cvičení CMX-7 (Obr. 22). Jednalo se o velké odborné úsilí a o logisticky náročnou operaci, neboť jsme koordinovali účast skupiny osmi českých pracovišť. Zároveň jsme byli požádáni o uspořádání technického semináře ITFC na evaluaci výsledků forenzního cvičení v Praze, kde se sejde světová elita jaderné i klasické forenziky. Stáváme se tak v krátké době od chvíle, kdy jsme do tohoto oboru vstoupili, světově významnou laboratoří.

V dnešní době nabývají projekty zabývající se ozářeným betonem a jeho součástí na důležitosti. V rámci řešení problematiky hlubinného úložiště se CVŘ podílelo na národních projektech (např. Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště) a mezinárodních výzkumných projektech (Evropský projekt JOPRAD, SITEX-II a MIND v rámci výzkumné podpory Horizon 2020). V této oblasti je třeba vyzdvihnout spolupráci s japonskými partnery Kajima, Mitsubishi Heavy Industries a Nagoya University v rámci projektu JCAMP – Concrete studies a společný projekt s americkými kolegy z Oak Ridge National Laboratory. V obou těchto projektech provádíme testy a měření, která jsou svou povahou a provedením unikátní, a CVŘ je jediným pracovištěm na světě, které tyto metody vyvinulo a rutinně používá. Také proto se na nás zahraniční pracoviště v této oblasti obrací.

RNDr. Ondřej Srba, Ph.D.

ondrej.srba@cvrez.cz



Absolvoval Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy v Praze v oboru fyziky pevných látek, v tomto oboru získal i doktorský titul. V letech 2007–2012 pracoval na Fakultě pevných látek jako vědecký zaměstnanec. Od roku 2012 pracuje ve společnosti Centrum výzkumu Řež, kde nastoupil jako operátor transmisního mikroskopu. Od roku 2014 se věnuje oblasti chování ozářených materiálů. V roce 2013 dostal na starost výstavbu a následné spuštění horkých komor, obě fáze se podařilo realizovat do roku 2018. Od roku 2017 vykonává funkci vedoucího oddělení horkých komor. Od roku 2021 zastává funkci ředitele sekce Materiálového výzkumu a diagnostiky.

Technologický výzkum a vývoj v Centru výzkumu Řež

Ing. Jan Prehradný, Ph.D.

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Centrum výzkumu Řež se zabývá mimo jiné výzkumem a vývojem složitých technologií, technologických celků i samotných technologických řešení, a to v několika oblastech, kterými jsou optimalizace a zpracování RaO, výzkum bezpečnostních aspektů provozu jaderných elektráren, testování komponent vysokými tepelnými toky, akumulace energie a také výzkum různých chladicích médií pro současné i budoucí aplikace. Uvedené technologie představují ukázkou z širokého portfolia, kterým se Centrum výzkumu Řež zabývá.

Research Centre Řež deals with research and development of technologies complex, technological units and also technological solutions, in several areas such as radioactive waste optimization and treatment, research of safety aspects of the nuclear power plants operation, high heat flux components testing, energy accumulation and also different cooling media research for current and future application. The mentioned technologies represent a sample of the wide portfolio that Research Centre Řež deals with.

Jednou ze stěžejních aktivit Centra výzkumu Řež je vývoj a aplikace technologií v oblasti energetiky s důrazem na energetiku jadernou. Orientace na jadernou energetiku je ze strategického hlediska směřování střední Evropy výhodná a v zásadě se ukazuje, že je toto řešení v dohledné době jediné spolehlivé s potenciálem zajištění energetické bezpečnosti. Jaderná energetika je také specifická tím, že jsou na ni kladeny prakticky největší bezpečnostní a spolehlivostní nároky. Lze bez nadsázky uvést, že ani letecký průmysl nemá tak propracovaný systém kontroly jakosti, bezpečnosti a spolehlivosti jako právě jaderná energetika. Centrum výzkumu Řež spojuje ve svých aktivitách dlouholetou tradici a zkušenosti z jaderného výzkumu v řežském údolí

s nově získanými znalostmi z nejnovějších vědecko-výzkumných projektů, a to díky účasti nejenom v řadě českých konsorcií, ale zejména v mezinárodních. A právě díky spolupráci s výzkumnými institucemi i průmyslovými partnery si v CVŘ postupně osvojujeme složité technologie a technologické celky, které jsou v řadě případů nejenom výsledkem spolupráce s partnery, ale často výsledkem našich vlastních návrhů.

Vývoj technologií lze v zásadě rozdělit do několika základních oblastí, které však nejsou uzavřené a navzájem se prolínají. CVŘ tak vyvíjí vlastní technologická řešení v oblasti optimalizace a zpracování radioaktivních a toxických odpadů, výzkumu bezpečnostních aspektů

Obr.1: Zařízení MSO umožňuje unikátní vývoj technologií oxidace pod hladinou roztavené soli

technologií jaderných elektráren, testování komponent vysokými tepelnými toky, akumulace energie a výzkumu různých chladicích médií pro současné i budoucí pokročilé a náročné aplikace.

Mezi nejzajímavější technologické celky z oblasti zpracování radioaktivních, toxických a jiných nebezpečných odpadů patří například technologie MSO a ETL. MSO je zkratkou pro tzv. Molten Salt Oxidation, tedy oxidaci v roztavené soli. Odpad je v tomto případě dávován přímo pod hladinu roztavené alkalické soli, která může dosahovat teplot až 1 000 °C. Systém vyvíjený v CVŘ je v navrženo dvoustupňově, a modelové odpady tak prochází postupně dvěma za sebou uspořádanými stupni oxidace, které zaručují úplnou mineralizaci nebezpečných látek. Přestože tato technologie může být použita přímo k likvidaci kapalných, semi kapalných i pevných organických odpadů, například kontaminovaných a silně znečištěných olejů, radioaktivních a současně toxických odpadů, zabýváme se především optimalizací oxidačního procesu a návrhu obdobných zařízení (Obr. 1).

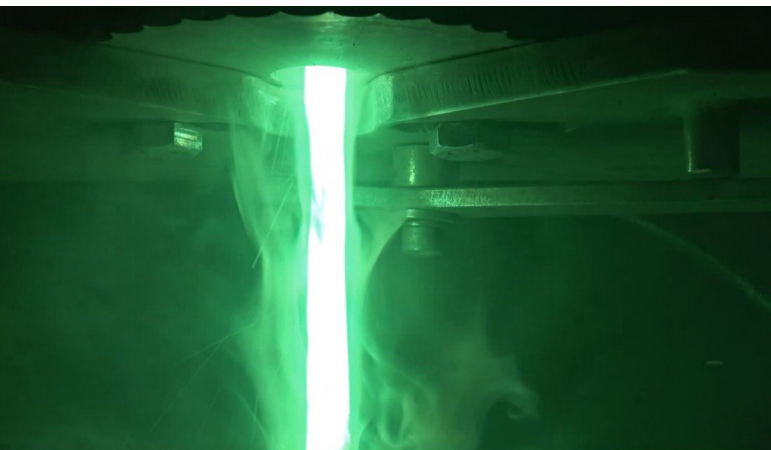
Druhým zmíněným zařízením je Experimentální technologická linka ETL, která umožňuje vývoj vakuového zahušťování kapalných RaO, optimalizaci procesů s nízkoteplotní krystalizací, optimalizaci separačních procesů a v neposlední řadě vývoj matic pro solidifikaci RaO. Tato technologická linka se ve svém poloprovozním měřítku skládá jako většina solidifikačních linek z odparky, krystalizátoru, odstředivky a vakuové sušičky. Unikátnost naší linky spočívá ve velkém množství různých proplachových okruhů mezi jednotlivými komponentami, které umožňují optimalizaci solidifikačního procesu v rámci jednotlivých etap. Není tedy nutné všechny procesy znovu opakovat.



Oblast odpadového hospodářství je mimo jiné doplněna řadou sorpčních a filtračních kolon, které slouží k výzkumu technologií pro současné i budoucí aplikace.

Velká pozornost je v technologickém výzkumu CVŘ věnována bezpečnostním aspektům provozu jaderných elektráren. Do komplexu technologických celků patří laboratoř Studeného kelímku, laboratoř simulující podmínky těžké havárie s únikem chladiva primárního okruhu (tzv. LOCA), Vysokonapěťová zkušebna a v neposlední řadě Gama ozařovna.

Laboratoř Studeného kelímku se specializuje na výzkum průběhu těžkých havárií jaderných reaktorů, při nichž by teoreticky mohlo dojít k roztavení paliva. Takové scénáře jsou velmi často modelovány s využitím výpočetních kódů, pro které však v řadě případů chybí přesné vstupní údaje o fyzikálních vlastnostech roztaveného paliva, které se nazývá korium. Pro výzkum a upřesňování fyzikálních vlastností oxidů, jako je například UO_2 v kapalně fázi, jsme v CVŘ vybudovali laboratoř, která využívá výhody indukčního tavení ve studeném kelímku, při němž lze dosahovat vysokých teplot koría až do 3 200 °C. Tato technologie je vhodná právě pro výzkum dějů



Obr. 2: Experiment interakce tekutého koria s různými konstrukčními materiály

během těžké jaderné havárie, jako jsou například chemické interakce paliva s konstrukčními prvky. Kromě těchto aktivit studujeme experimentálně další fyzikální vlastnosti, jako například teplotu solidu, likvidu, hustotu, viskozitu, měrnou tepelnou kapacitu nebo povrchové napětí. Kombinací experimentálních dat a numerických výpočtů jsme schopni určit také rezistivitu nebo součinitel tepelné vodivosti pomocí řešení inverzního problému. Díky využití právě metody indukčního tavení a umístění laboratoře v kontrolovaném pásmu jsme jedni z mála na světě, kteří mohou korium takto detailně zkoumat včetně chemických interakcí (Obr. 2).

Zásadní vliv na bezpečnost jaderných elektráren má také simulace havárií s únikem chladiva primárního okruhu, tzv. LOCA (Loss Of Coolant Accident). V kontejnmentu jaderných elektráren je umístěna řada různých zařízení, která musí zajistit funkčnost nejen za normálních provozních podmínek, ale také v průběhu nehod, či dokonce havárií. Jen takový stav může garantovat, že je jaderný reaktor vždy pod kontrolou. Nejběžnějšími zařízeními jsou napájecí a komunikační kabely, senzory, pohony, motory atd. Všechny tyto komponenty pak musí zvládnout všechny fáze hypotetické havárie, tedy vysoké teplotní i tlakové rázy, sprchování různými roztoky vody a kyseliny borité,

či dokonce provoz při úplném a dlouhodobém zaplavení. K simulaci těchto podmínek byla v CVŘ vybudována laboratoř LOCA, která je schopna takové podmínky zajistit. Komponenty jsou v této laboratoři vystavovány termodynamickým šokům spojeným s chemickými účinky. V nádobách zařízení LOCA jsme navíc schopni použít různá testovací média, například sytou páru, přehřátou páru, směs páry se vzduchem, inertní plyn, zaplavovací roztok pro tzv. post-LOCA test atp. V testovacích nádržích dosahujeme tlaku až 20 barů a teploty přehřáté páry až 300 °C, čímž jsme schopni testovat podmínky těžkých havárií nejenom pro současné typy jaderných reaktorů, ale také pro budoucí generace reaktorů (Obr. 3).

Součástí komplexu laboratoří zaměřených na studium bezpečnostních aspektů jaderných elektráren jsou také Gama ozařovna a Vysokonapěťová zkušebna. Gama ozařovna je zařízení určené na ozařování vzorků a komponent z různých materiálů. Díky modernizaci laboratoře, která zahrnovala instalaci experimentálního boxu, je navíc možné provádět experimenty při teplotách od -196 do 400 °C a tlacích blížících se hlubokému vakuu. Takové podmínky umožňují provádět různé experimenty, jako je například simulace vesmírného prostoru (například pro testování komponent



Obr. 3: Zařízení LOCA určené ke kvalifikaci komponent v podmínkách těžkých havárií

Obr. 4: Upevňování testovaných komponent do zařízení HELCZA

družic) nebo prostředí jaderného reaktoru. Synergie ozáření, teploty a tlaku vyvolává výrazné strukturální změny, které vedou k degradaci materiálu. To umožňuje nasimulování radiačního stárnutí a následné vyhodnocení zbytkové životnosti součástí, případně frekvence poruch daných zařízení v budoucnu.

A konečně Vysokonapěťová (VN) zkušební laboratoř umožňuje testování elektrických součástí a kabelů za různých předem specifikovaných podmínek nebo po expozici v podmínkách LOCA. Jsme schopni měřit odpor a izolační odpor součástí a kabelů přivedením vysokého napětí. Unikátní částí laboratoře je testovací bazén, kam lze kabely ponořit do různých kapalin a zahřát až na 90 °C.

Jedním z nejsložitějších zařízení, které bylo v minulých letech vybudováno, je zařízení HELCZA (High Energy Load Czech Assembly). Jedná se o experimentální zařízení sloužící k testování komponent pro vývoj budoucích generací fúzních zařízení, ale také k testování komponent vystavených vysokému tepelnému toku (např. návratové moduly kosmických lodí). Jádrem celého zařízení HELCZA je vakuová nádoba spojená s elektronovým dělem, které je hlavním zdrojem elektronového paprsku sloužícího k tepelnému namáhání. Elektronové dělo je schopné dosahovat maximálních parametrů 800 kW v elektronech při urychlovacím napětí 55 kV. Testovací zařízení HELCZA umožňuje testování tepelné odolnosti a chladicích schopností komponent, stejně jako výzkum materiálů a studium fyzikálních jevů v podmínkách vysokého tepelného toku generovaného svazkem elektronů. Testovací komplex se skládá ze samotného testovacího zařízení HELCZA obklopeného systémem vzájemně propojených laboratoří určených pro práci s nebezpečnými látkami a zabraňujících nežádoucímu rozptylu prachových částic po okolí.



Testovaná komponenta je připevněna uvnitř vakuové nádoby na polohovací systém umožňující náklon a rotaci vzorku pro jeho vhodné polohování vůči dopadajícímu elektronovému paprsku. Skrze stěny vakuové nádoby je přivedena chladicí voda pro odvod tepla z testované komponenty a následné kalorimetrické měření tepla předaného chladicímu médiu. Při maximálním výkonu elektronového paprsku (800 kW) jsme schopni vymezením určité oblasti na vzorku dosahovat tepelného toku na plochu daného vzorku až 40 MW/m². Díky velkému vnitřnímu prostoru vakuové komory o průměru 245 cm jsme schopni testovat vzorky o velikosti až 4 m² a váze do 1 000 kg. Chladicí vodní okruh připojený na testovaný vzorek pak může dosahovat tlaku až 15 MPa a teploty 320 °C.

Veškeré podsystémy technologie jsou monitorovány a řízeny skrze centrální diagnostický a řídicí systém. Ten umožňuje naprogramovat jednotlivé testovací sekvence podle požadavků na testovaný vzorek. Hlavními parametry, které je důležité u testovaného vzorku sledovat, jsou rozložení teploty na testovaném povrchu, kalorimetrické měření absorbovaného tepelného toku v chladicí vodě



Obr. 5: Heliová smyčka S-ALLEGRO

vaným v poslední době je smyčka na ověřování fyzikální a provozní stálosti médií určených k vysokoteplotní akumulaci energie. Smyčka je uzpůsobena pro testování různých vsázek, zejména kamenitých (čedič apod.) pro testování stálosti dané vsázky při tepelném cyklování. Ve smyčce proudí vzduch ohřátý až na 600 °C, který nahřívá vsázku na požadovanou teplotu. Otočením oběhu dochází následně k rychlému chladnutí vsázky. V průběhu takového experimentu jsme schopni sledovat, jak kamenivo degraduje.

V současné době postupně vzrůstá zájem o využití superkritických médií (zejména CO₂) S-CO₂ v tepelných obězích v energetice. Je známo, že tepelné oběhy s S-CO₂ vykazují vyšší termodynamickou účinnost (než konvenční parovodní oběhy), tj. při jejich aplikaci bude lepší a efektivnější využívání primárních surovin. Je jen otázkou dalšího vývoje, aby se S-CO₂ začalo využívat v klasické i jaderné energetice. Přemýšlí se také o použití v obnovitelných zdrojích (využití S-CO₂ v solárních elektrárnách nebo pro alternativní zdroje, jako například geotermální elektrárny) apod. V rámci výzkumu superkritického S-CO₂ realizujeme řadu projektů a technologií, jejichž cílem je testování tohoto média, optimalizace proudění i výzkum korozních vlivů na různé materiály. Jedním z příkladů je provoz vybudované smyčky S-CO₂, která slouží k vývoji a testování komponent pro budoucí okruhy s chladicím médiem CO₂ a k validaci parametrů přestupu tepla. Tato smyčka dosahuje teplot plynu CO₂ až 550 °C při pracovním tlaku 25 MPa a průtoku 0,35 kg/s.

Díky zkušenostem v oblasti akumulace energie a také technickým znalostem provozu smyček jsme se rozhodli pro spojení obou problematik do společného projektu, jehož cílem je návrh flexibilního a efektivního systému pro akumulaci tepelné energie a jejího zpětného využití k výrobě elektrické energie a případně i tepla. V rámci projektu tak probíhá návrh a výroba startovacího kompresoru, kompresoru a turbíny uložené na společné hřídeli (tzv. kompandér) a také výkonové tur-

a rovnoměrnost rozložení tepelného toku na testovaném povrchu, dále pak sledujeme přidružené parametry nutné pro testování – například úroveň vakua či chlazení samotné vakuové nádoby (Obr. 4).

Vzhledem k testování pokročilých komponent určených pro fúzní reaktory, které jsou pokryty beryliem, byl kolem samotného zařízení vybudován komplex 19 samostatných a vzájemně propojených hermetických podtlakových boxů, tzv. kontrované beryliové chemické pásmo. Tyto místnosti byly navrženy tak, aby se minimalizovalo šíření beryliových částic mezi nimi a aby se především zabránilo kontaminaci okolního prostředí beryliem. Výkonný vzduchotechnický systém s HEPA filtrací umožňuje nastavení diferenčních podtlaků pro každý box tak, aby byla kontaminace soustředěna v prostorách, kde dochází k uvolňování beryliových částic – mezi ně patří zejména místnost s vakuovou nádobou zařízení HELCZA.

V CVŘ se zabýváme také jedním z neaktuálnějších technických problémů, kterým je akumulace energie. Pro účely výzkumu máme vybudováno několik zařízení, na kterých probíhá výzkum a testování materiálů a médií. Jedním takovým zařízením vybudo-

bíny pro použití v S-CO₂ konverzním oběhu. V rámci projektu probíhá ověření návrhu způsobu regulace oběhu a ověření dynamických vlastností včetně experimentálního ověření pokročilých technologií tepelných oběhů superkritického CO₂ určeného k výrobě elektřiny s vysokou účinností. Volba výkonu turbíny na úrovni do 3 MW byla určena především na základě „rozumných“ účinností turbosoustrojí (na menších výkonech toho nelze dosáhnout) a také proto, že tento výkon už je perspektivní z hlediska komerčního provozu.

Součástí naší technologické platformy je realizace a provoz zařízení i s jinými médii, ať již plynnými nebo s oběhem roztavených kovů či solí. Jako příklad s médii plynnými lze uvést smyčku S-ALLEGRO. Jedná se o model 1:75 k demonstrační jednotce ALLEGRO rychlého reaktoru chlazeného heliem (GFR). Cílem smyčky je ověření termohydraulických modelů, ověření systému chlazení, přestupů tepla, validace výpočetních kódů a také testování pokročilých komponent – ventilů, bezpečnostních ventilů atp. Provozní parametry helia v jednotce S-ALLEGRO jsou 850 °C, 7 MPa a průtok 0,5 kg/s (Obr. 5).

Pro výzkum budoucích reaktorů IV. generace s chladičem v podobě roztavených solí probíhá v současnosti výstavba smyčky s médiem roztavené soli FLiBe. Smyčka slouží k ověření funkčnosti FLiBe s řízenou cirkulací, ke korozním testům stálosti materiálů a ověření výpočetních kódů. Součástí výzkumu je také ověření vlastního návrhu čerpadla a ověření jeho funkčnosti a korozivzdornosti.

Vedle zmíněných technologických celků se nám podařilo zrealizovat celou řadu menších samostatných zařízení, která slouží většinou ke zkoumání korozních procesů. Mezi tato zařízení patří různé autoklávy na CO₂, vodní i olověné autoklávy, pece, statické tanky atp.

Součástí výše uvedených aktivit je i vývoj a výroba sond, ve kterých jsou umístěny specifické vzorky a následně jsou společně se sondou umístěny do reaktoru a ozářeny. Sondy slouží

nejenom k vlastnímu uchycení vzorků v daných pozicích vzhledem k aktivní zóně reaktoru, ale také k udržení specifických podmínek – teploty, tlaku, případně prostředí. Vývoj, návrh i vlastní realizace sond probíhají zcela v režii CVŘ, a to včetně související přípravy vzorků a vyhodnocení výsledků z ozařování.

Zmíněné technologie jsou pouze ukázkou širokého portfolia technologií a aplikací, na kterých CVŘ pracuje a které je schopno díky svým hlubokým technickým znalostem navrhovat, konstruovat a následně provozovat. S každým dalším zařízením se navíc rozšiřuje okruh zkušeností, které s provozem takových složitých technologií máme, a roste tím kompetence CVŘ řešit nové výzvy.

Ing. Jan Prehradný, Ph.D.



jan.prehradny@cvrez.cz

Absolvoval Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou na ČVUT v Praze, obor Jaderné inženýrství, kde následně získal také doktorský titul. Svou odbornou praxi zahájil na Státním úřadu pro jadernou bezpečnost, kde měl v letech 2007–2011 na starost evidenci kontrol na jaderných zařízeních v ČR a kde se začal intenzivně zabývat systémem SKŘ a palivem v jaderných elektrárnách. V letech 2011–2014 pracoval ve ŠKODA JS, kde se zabýval optimalizací palivových vsázek v jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín. Následně přešel na akademickou půdu a na Fakultě strojní ČVUT pracoval jako vědecko-výzkumný a akademický pracovník, zde měl na starost VaV projekty. Od roku 2017 pracuje v Centru výzkumu Řež jako vedoucí oddělení Jaderného palivového cyklu a od roku 2022 jako ředitel sekce Výzkum a vývoj technologií v energetice.

Výzkumné jaderné reaktory Řež

Ing. Ján Milčák

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Jaderné reaktory LVR-15 a LR-0 představují základní části výzkumné infrastruktury společnosti Centrum výzkumu Řež a jsou unikátními zařízeními pro český i mezinárodní jaderný výzkum v oblastech jako je materiálový výzkum, reaktorová fyzika, jaderná bezpečnost nebo dozimetrie ionizujícího záření. Historie reaktorů je plně spjata s řežským údolím, protože už od padesátých let byly základem nejdříve Ústavu jaderné fyziky a následně Ústavu jaderného výzkumu. Oba reaktory jsou dnes zařazeny do národní roadmapy velkých výzkumných infrastruktur MŠMT v oblasti Energetika, kde dosahují velmi kladných hodnocení.

The LVR-15 and LR-0 nuclear reactors represent fundamental part of Research Centre Řež research infrastructure and are unique facilities for Czech and international nuclear research in areas such as materials research, reactor physics, nuclear safety, or ionizing radiation dosimetry. The history of the reactors is fully connected with the Řež valley, because already from the fifties they were the basis of the Institute of Nuclear Physics and then the Institute of Nuclear Research. Today, both reactors are included in the national roadmap of large research infrastructures of the MEYS in the field of Energy, where they achieve very positive evaluations.

Jaderné reaktory LVR-15 a LR-0 spolu s navazující infrastrukturou a podpůrnými laboratořemi jsou základní částí vědecko-technické infrastruktury společnosti Centrum výzkumu Řež, která zajišťuje kromě samotného provozu reaktorů i jejich údržbu, radiační ochranu, přípravu ozařování a poradiační zpracování zakázek a provoz experimentálních zařízení v podobě sond a smyček. Zajištění takovéto infrastruktury se ale neobejde bez podpůrných útvarů poskytujících potřebné fyzikální, technické a chemické analýzy, správu objektů, energodispečink, nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým palivem a další podpůrné činnosti – zčásti zajištěné vlastními útvary společnosti CVŘ a částečně pokryté dodavatelským řetězcem.



| Obr. 1: Výstavba reaktoru VVR-S v 50. letech |

HISTORIE

Výzkumný reaktor LVR-15 (v té době označován jako VVR-S) byl spuštěn v noci z 24. na 25. září 1957 jako první z řady jaderných reaktorů v České, respektive Československé republice. Původní výkon reaktoru byl jen 2 MW_t a zaměřením reaktoru VVR-S měla být výroba radioizotopů a výzkum v oblasti jaderné fyziky, chemie a biologie, čemuž odpovídalo i tehdejší experimentální vybavení reaktoru. To se v době uvedení reaktoru do provozu skládalo z vertikálních ozařovacích kanálů sloužících k výrobě radioizotopů a z horizontálních kanálů pro vyvádění

svazků záření z aktivní zóny. Ve velmi krátké době došlo k několika úpravám reaktoru jak pro zvýšení možnosti využití zařízení (instalace nových experimentálních smyček aj.), tak pro možnost zvýšení výkonu reaktoru (úprava chladicího okruhu, nasazení paliva typu IRT-M). Zásadní rekonstrukcí prošel reaktor v letech 1987 až 1989, kdy byla vyměněna podstatná část technologie reaktoru včetně reaktorové nádoby – návazně na to došlo k přejmenování reaktoru na LVR-15. Povolení ke zkušebnímu provozu obdržel v květnu 1989 a k trvalému provozu v červnu 1995.

Experimentální reaktor LR-0 je v provozu od roku 1982 po rekonstrukci z bývalého reaktoru TR-0, těžkovodního reaktoru modelujícího aktivní zónu elektrárny A1. Při této rekonstrukci došlo ke změně paliva, moderátoru a řídicího systému na technologii lehkovodního reaktoru pro modelování aktivních zón typu VVER.

EXPERIMENTÁLNÍ VYUŽITÍ

Oba reaktory jsou unikátní infrastrukturou pro český i mezinárodní jaderný výzkum a vývoj. Její význam spočívá v zajištění technického vybavení pro udržení excelence výzkumu a odborného know-how v klíčových technologických oblastech, jako jsou materiálový výzkum, reaktorová fyzika, jaderná bezpečnost nebo dozimetrie ionizujícího záření. Výsledky získané s využitím reaktorů jsou využívány i interdisciplinárně – výjimkou nejsou ani experimenty pro letecký a kosmický průmysl, strojírenství nebo přístrojové a technologické řízení procesů. Díky těmto vlastnostem jsou reaktory zařazeny do národní roadmapy velkých výzkumných infrastruktur MŠMT v oblasti Energetika a v rámci pravidelných hodnocení dosahují výborných výsledků.

Reaktor LVR-15 je víceúčelový výzkumný reaktor o tepelném výkonu 10 MW_t. Poskytuje tok neutronů s vysokou hustotou, což umožňuje výzkum materiálů reaktorů generace II, III a IV a také potenciálních materiálů pro fúzní reaktory. Díky variabilní konfiguraci je možné současně provádět několik experimentů na různých pozicích v aktivní zóně reaktoru i mimo něj, včetně horizontálních neutronových svazků. Horizontální kanály a potrubní pošta se používají pro experimenty s rozptylem neutronů a aktivační analýzu pro jaderné analytické metody a pro základní výzkum v oblasti jaderné fyziky. Běžné experimentální zařízení uvnitř reaktoru (např. vertikální ozařovací kanály, ozařovací sondy a nosiče vzorků) se používá pro řadu dlouhodobých ozařovacích experimentů včetně možnosti měnit teplotu vzorků v průběhu ozařování. V mnoha případech jsou ozařovací zařízení vyvinuta a vyrobena na základě specifických požadavků na konkrétní experiment a potřeby uživatelů díky vlastní konstrukci a dílně ve společnosti CVŘ.

Mezi nedávno zprovozněná zařízení patří:

- sonda LTCC pro testování funkčnosti elektrických zařízení při současném ozáření (v rámci výzkumu technologií pro fúzní aplikace)
- sonda WPMAT jako pilotní ozařovací sonda pro umístění do palivového souboru IRT-4M, umožňující změnu podmínek ozařování (teploty vzorku) změnou plynové náplně sondy, použita pro ozařování konstrukčních vzorků z CuCrZr v rámci výzkumu jaderné fúze
- sonda OKaP pro ozařování vzorků povlaků jaderných paliv a dalších konstrukčních materiálů jaderného paliva ve čtyřech sekcích uvnitř palivového souboru IRT-4M
- sonda JCAMP určená pro ozařování za teploty kolem 50 °C pro ozařování stavebních materiálů, jako je beton nebo kamenivo v rámci programů prodloužení životnosti stavebních konstrukcí jaderných elektráren
- sonda PbLi pro testování interakce neutronů s Li v tekutém eutektiku PbLi s monitorováním produkce tritia v rámci výzkumu jaderné fúze
- sonda pro ozařování velkých vzorků betonu při nízkých teplotách mimo samotnou aktivní zónu reaktoru
- sonda Chouca pro ozařování materiálových vzorků za různých teplot, které lze ovlivňovat topnými elementy v samotné sondě
- rotační ozařovací kanál zajišťující homogenní podmínky ozařování uloženého vzorku
- pracoviště neutronové radiografie – první testy s obnoveným zařízením zahájeny na horizontálním kanálu HK1 v roce 2015 s plánem rozvoje v rámci spolupráce s Katedrou jaderných reaktorů FJFI ČVUT v Praze

Reaktor LR-0 je experimentální jaderný reaktor s nulovým výkonem navržený původně pro rozsáhlé experimenty v oblasti fyziky reaktorů typu VVER. Nedávno byl speciálně upraven tak, aby simuloval i další reaktorové technologie, jako jsou vybrané typy reaktorů generace III a IV. Experimenty na LR-0 poskytují data pro vývoj a ověřování kódů a knihoven pro reaktorovou fyziku a transport záření. Hlavními výhodami reaktoru LR-0 jsou nízké



Obr. 2: Hala reaktoru LVR-15

radiační pozadí pro vysoce přesná měření fyzikálních parametrů aktivní zóny, výborná reprodukovatelnost, dobře popsaná geometrie, materiálové složení a dále možnost provádět měření rozložení výkonu v jednotlivých palivových proutcích. Několik vybraných konfigurací LR-0 již bylo zařazeno do mezinárodních referenčních databází v rámci OECD/NEA jako tzv. referenční neutronová pole díky zavedení nové vysoce přesné techniky, včetně pokročilé digitální spektrometrie rychlých neutronů pomocí stilbenových detektorů, stejně jako charakterizace vysoce citlivého gama spektrometru umožňujícího spektrometrii s nízkou aktivitou, ale i měření s velkoobjemovými vzorky v jednotlivých experimentech. Trend ve využití reaktoru LR-0 je v rozšiřování

dostupných konfigurací aktivní zóny včetně speciálních vestaveb:

- s centrální dutinou umožňující vložení vestavby např. s fluoridovou solí, silikonem, sloučeninami chlóru, fluoru aj. pro získávání experimentálních dat a zajištění citlivějších měření integrálních průřezů pro neutronové reakce
- rozměrná centrální dutina pro experimenty s horkými fluoridovými solemi původně navrhovaná v rámci výzkumného a vývojového projektu Molten Salt Reactor
- model MMR - v rámci vývoje malých modulárních reaktorů navržena aktivní zóna simulující malý reaktor s 37 zkrácenými kazetami typu VVER 1000 pro ověřovací měření a validaci výpočetních kódů



Obr. 3: Manipulace s víkem reaktoru LR-0 při přípravě experimentu |

VÝVOJ INFRASTRUKTURY

S ohledem na pokračující trend ukončování provozu evropských výzkumných reaktorů, zpoždění ve výstavbě a zprovoznování nových zařízení, ale také díky rozsáhlému investičnímu projektu SUSEN na rozvoj dalších laboratoří a infrastruktury v areálu ÚJV Řež je aktuálně předpokládán rozvoj pracovišť obou reaktorů a další růst jejich významu. V roce 2020 byla navržena výzkumná infrastruktura s názvem Czech International Centre of Research Reactors (CICRR). Infrastruktura CICRR, která bude vycházet ze spojení stávajících reaktorů (LVR-15, LR-0) a souvisejících výzkumných zařízení, českého podílu na výstavbě Reaktoru Julese Horowitzze

(JHR) a nových laboratoří (horké komory, technologické experimentální smyčky, analytické laboratoře, neutronové zdroje), rozšíří škálu nových možností a dat, které lze díky této infrastruktuře získat, respektive umožní použití v oblastech:

- základní výzkum transportu a interakce neutronového záření
- kvalifikace stávajících materiálů v podmínkách rozšířeného provozu a vývoj a testování nových materiálů pro jaderný průmysl
- vývoj a ověřování jaderných knihoven a kódů, reaktorová fyzika pokročilých reaktorů
- výzkum chemie a korozivních vlastností chladiv reaktorů

- návrh, vývoj a kvalifikace měřicích zařízení pro dozimetrii a monitorování radiačního pole
- vývoj pokročilých technologií, přístrojového vybavení a metod pro jaderné aplikace
- vývoj a produkce radioizotopů
- vzdělávání a odborná příprava

V návaznosti na končící platnost povolení k provozu a na vydání nového atomového zákona č. 263/2016Sb byl již v roce 2016 zahájen interní projekt relicencování obou reaktorů s cílem obnovy všech povolení k provozu vztahujících se k LVR-15 a LR-0 v návazných lhůtách po předchozích povoleních. Mezi hlavní kroky tohoto projektu lze zařadit:

- revize provozní dokumentace v letech 2017-2018 v souladu s přechodovým ustanovením zákona ještě před samotným podáním žádostí k provozu
- provedení zásadních rekonstrukcí v letech 2016-2020 v souladu s programy řízeného stárnutí pro usnadnění průkazů připravenosti k dalšímu provozu
- provedení mezinárodní mise INSARR v roce 2020 jako nezávislého hodnocení stavu bezpečnosti
- revize provozních bezpečnostních zpráv a navazující dokumentace dle provedených hodnocení stavu technologie, lokality a projektu a souvisejících právních předpisů

Hlavního cíle projektu relicencování bylo dosaženo ke konci roku 2020 a potřebná povolení k provozu obou jaderných zařízení a provozu pracovišť IV. kategorie s velmi významnými zdroji záření byla obnovena. Dle aktuálně platné legislativy jsou tato povolení platná na dobu neurčitou, ale jsou doplněna dalšími požadavky, jako je například pravidelná revize provozních bezpečnostních zpráv, provedení periodického hodnocení bezpečnosti a dalších bezpečnostních analýz. Cílem společnosti je zajistit provoz zařízení minimálně do roku 2030, další prodloužení bude připravováno podle výsledků periodických zkoušek a politicko-ekonomického vývoje v oblasti podpory provozu jaderných zařízení.

Ing. Ján Milčák



jan.milcak@cvrez.cz

Absolvoval Katedru jaderných reaktorů ČVUT v Praze v zaměření jaderné inženýrství. V CVŘ působí od roku 2010 v různých pozicích - z počátku jako juniorní vědecko-výzkumný pracovník na reaktoru LR-0 se zaměřením na experimentální reaktorovou fyziku. V letech 2012-2016 vykonával funkci vedoucího provozu tohoto reaktoru. Souběžně s tím v roce 2016 vedl práce na spouštění nově postavené výzkumné infrastruktury v rámci projektu SUSEN. Od listopadu roku 2016 je odpovědný za provoz obou reaktorů a navazující infrastruktury jako ředitel sekce Provoz reaktorů a od dubna 2018 současně vykonává funkci jednatele společnosti.

Experimentální program v rámci vývoje GFR demonstrátoru ALLEGRO

**Ing. Tomáš Melichar, Ing. Otakar Frýbort,
Ing. Petr Hájek, Jan Šeřl, Ing. Jana Kalivodová, Ph.D.**
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

33

V rámci mezinárodního konsorcia V4G4 Centre of Excellence je vyvíjen koncept plynem chlazeného pokročilého reaktoru ALLEGRO. Centrum výzkumu Řež jako přidružený člen tohoto konsorcia přispívá díky dostupnosti významné výzkumné infrastruktury a dlouholetým zkušenostem v této oblasti k vývoji této technologie. V článku je představeno velké experimentální zařízení S Allegro, které umožňuje provedení komplexních experimentů potřebných k ověření nejen bezpečnostních funkcí konceptu GFR, a s ním spojený experimentální program. Stručně jsou pak zmíněny i další experimentální aktivity CVŘ v oblasti vývoje konceptu ALLEGRO.

A gas-cooled fast reactor concept ALLEGRO is being developed within the V4G4 Centre of Excellence consortium. Due to the availability of unique research infrastructure and long standing experience in this field, Research Centre Řež, as an associated member of this consortium, contributes to the development of this technology. In this paper, a large scale experimental facility S Allegro is described. This facility allows complex experiments needed to verification of the system behavior and safety functions of the GFR concept. Other activities of Research Centre Řež in the field of ALLEGRO development are also briefly presented.

V rámci mezinárodního sdružení V4G4 Centre of Excellence (V4G4 CoE) je vyvíjen koncept rychlého plynem chlazeného reaktoru ALLEGRO. Jedná se o demonstrační reaktor chlazený heliem o tepelném výkonu 75 MW. Centrum výzkumu Řež jakožto přidružený člen V4G4 CoE je v této aktivitě zapojeno do výzkumu a vývoje v různých oblastech včetně materiálového výzkumu, vývoje komponent nebo termohydrauliky. Klíčovým elementem je pak využívání unikátní experimentální infrastruktury zvané S-Allegro. Zařízení S-Allegro bylo navrženo a dodáno v rámci projektu SUSAN [1] a je umístěno v expe-

perimentální hale CVŘ v Plzni. Svým uspořádáním odpovídá demonstrátoru ALLEGRO ve zmenšení přibližně 1:75 z hlediska tepelného výkonu, tj. maximální tepelný výkon zařízení je 1,05 MW. Topení je realizováno prostřednictvím odporových topných elementů umístěných v tlakové nádobě, které simulují aktivní zónu reaktoru. Tlaková nádoba s topnou sekci je součástí primárního okruhu. Primární okruh je tepelně propojen se sekundárním okruhem. Oba okruhy pracují s heliem o tlaku do 7 MPa a průtocích do 0,5kg/s. Maximální teplota v primárním okruhu je 850 °C. Vzhledem k provozním



| Obr. 1: Zařízení S-Allegro v experimentální hale CVŘ v Plzni |

parametrům je v heliových okruzích využito koaxiálních potrubí, kdy chladnější helium proudí vždy ve vnější větvi. Průtok v obou heliových okruzích je zajištěn odstředivými cirkulátory. Teplo ze zařízení je odváděno terciárním vodním okruhem do chladicích věží. K primárnímu okruhu v místě tlakové nádoby je připojen tzv. DHR okruh (decay heat removal). Jedná se o vertikálně orientovaný okruh, jehož funkcí je pasivní odvod zbytkového tepla z reaktorové nádoby prostřednictvím přirozené (případně kombinované) konvekce helia. Zařízení S-Allegro slouží k experimentálnímu ověření systémového chování a fyzikálních principů konvekčního odvodu tepla z reaktorové nádoby, a to jak při běžných provozních režimech, tak při havarijních stavech. Další oblastí využitelnosti je generování experimentálních dat pro validace numerických termohydraulických modelů. U konceptu GFR jsou identifikovány určité fyzikální děje, dané buď samotným principem reaktoru, nebo specifickou geometrií určitých komponent, které je nutné při numerickém modelování uvažovat. Tyto jevy souvisí především s přirozenou cirkulací helia nutnou pro pasivní a bezpečný odvod zbytkového tepla a jejím ustavením při změně charakteru provozního režimu (tj. přechod z nominálního do DHR provozu nebo při haváriích). Dalším jevem je pak například vliv havarijního vstříkávání těžkého plynu pro zvýšení rozdílu hustot chladiva, a tedy pro intenzifikaci přirozené cirkulace. Pro tyto jevy existují pouze velmi omezená relevantní data, ta je však možné získat z provozu S-Allegro. Další možností využití zařízení je pak testování komponent při podmínkách GFR nebo jiných vysokoteplotních heliových okruhů [2].

Od prvního zprovoznění v roce 2017 byla provedena řada experimentálních kampaní. V rámci řešení projektu TK01030116 – Návrh konceptu bezpečnostně důležitých prvků rychlého heliem chlazeného demonstračního reaktoru ALLEGRO, podpořeného Technologickou agenturou ČR, byl navržen detailní experimentální program, který obsahuje více než 30 typů různých experimentů spojených s vývojem a ověřením

bezpečnosti konceptu ALLEGRO, které jsou postupně prováděny. Provedeny byly např. experimenty spojené se simulováním poruchy DHR cirkulátoru a měřením hydraulického odporu na jeho obtoku, které podpořily ÚJV Řež v návrhu nového konceptu DHR systému pro ALLEGRO. Dále byla experimentálně ověřena komponenta zvaná křížový ventil. Jedná se o koaxiální ventilový prvek, který v nominálním provozním stavu zajišťuje prekondicionování DHR okruhu pro usnadnění ustavení přirozené cirkulace v DHR okruhu v případě potřeby, v DHR režimu pak umožňuje potřebný průtok chladiva DHR okruhem [3]. Křížový ventil byl vyvinut a patentován v CVŘ, na základě získaných dat pak byly navrženy konstrukční úpravy a komponenta byla optimalizována. V rámci stejného projektu budou provedeny komplexní experimenty simulující havárie spojené s poruchami vybraných komponent. V projektu SafeG [4], podpořeném v rámci programu H2020 Euratom, jsou pak plánovány experimenty zaměřené na studie vlivu sníženého tlaku na ustavení přirozené cirkulace helia v DHR okruhu a odvodu tepla z reaktorové nádoby. Rovněž je plánován podobný experiment se zapojením vstříkávání těžšího plynu do prostoru DHR okruhu, který by měl v případě vážné havárie zefektivnit ustavení cirkulace a odvodu tepla. Zařízení dále umožňuje simulování dalších typů havárií a jejich kombinací. V různých pozicích jsou umístěny tzv. LOCA ventily, které umožní řízení a prudké vypouštění helia, a lze tak simulovat havárii spojenou se ztrátou chladiva. Podobně lze simulovat i stavy spojené se ztrátou průtoku chladiva kontrolovaným odstavením cirkulátorů.

I přesto, že s využitím S-Allegro již bylo dosaženo řady důležitých výsledků, vzhledem ke komplexnosti zařízení stále probíhají úpravy a optimalizace systému tak, aby bylo možné efektivně provádět složité experimenty při relevantních parametrech a při zajištění bezpečnosti provozu. Provedení nejsložitějších experimentů simulujících vážné havárie nebo kombinace havárií se tedy předpokládá v následujících letech. Získaná data budou rovněž využita v rámci mezinárodních

benchmarků termohydraulických výpočetních modelů. Kromě S-Allegro jsou v CVŘ realizována menší jednoúčelová testovací zařízení, která umožňují detailnější ověření komponent (např. pasivních ventilových prvků) při nižších provozních nákladech. Mimo tuto oblast se CVŘ významně zapojuje do výzkumu materiálů odolávajících prostředí vysokoteplotních plynem chlazených reaktorů s využitím např. smyček HTHL [5] s možností dosažení relevantních termohydraulických i chemických parametrů chladiva. Patrně nejvýznamnější infrastrukturou je pak experimentální reaktor LVR 15, který v kombinaci s moderními horkými komorami umožňuje mimo jiné i výzkum degradace materiálů nejen vlivem požadovaného prostředí, ale i neutronového toku. Díky zmíněné infrastruktuře a mnohaletým zkušenostem tak může CVŘ významně přispívat do vývoje demonstrátoru ALLEGRO a dalších konceptů heliem chlazených jaderných reaktorů.

Ing. Tomáš Melichar



tomas.melichar@cvrez.cz

Na Fakultě strojní ČVUT v Praze absolvoval magisterský obor Jaderná energetická zařízení. V roce 2014 nastoupil do Centra výzkumu Řež, kde se jako CFD výpočtář podílel na výzkumu komponent namáhaných vysokými tepelnými toky pro fúzní energetická zařízení. Dále prováděl termohydraulické analýzy v rámci výzkumu a vývoje pokročilých jaderných energetických systémů. V této oblasti se rovněž podílel se na realizaci a provozu několika experimentálních zařízení. Od roku 2017 je vedoucím výzkumné skupiny, která je zaměřena na provádění technických výpočtů a studií pro pokročilé energetické technologie a poskytuje technickou podporu vývoji ozařovacích zařízení pro experimentální reaktory. V posledních letech se zabývá nejadernými energetickými technologiemi včetně vývoje inovativních konverzních cyklů a akumulace energie. V Centru výzkumu Řež je zodpovědný za plnění několika národních i mezinárodních projektů a je autorem řady vědeckých publikací, užitých vzorů a patentů.

Reference:

- [1] Projekt SUSEN, <http://susen2020.cz/>
- [2] T. Melichar, J. Šefl, T. Krivský, J. Kalivodová, P. Hájek, O. Frýbort, "Thermal Hydraulic Experiments At Large-Scale Experimental Facility S Allegro". Proceedings of HRT 2021 conference (paper no. HTR 2020-132), 2021.
- [3] Melichar, T., Frýbort, O., Hájek, P., Šefl, J., Dočkal, K., Filip, R.: Coaxial and Cross Valve Prototypes for Gas Cooled Fast Reactor. Jaderná energie Speciál číslo/2020, ročník 1 [66], Centrum výzkumu Řež
- [4] Projekt H2020 SafeC, <https://www.safeg.eu/overview/general-information>
- [5] Berka, J., Kalivodová J.: Testing of high temperature materials within HTR program in Czech Republic, EPJ Nuclear Sci. Technol. 2, 24 (2016)

Zařízení pro dálkový odběr replik povrchů

**Jiří Netušil, Jan Matějček, Ing. Jana Veselá, Ph.D.,
Ing. Pavel Mareš, Ing. Jaroslav Brom**

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

42

Tento článek pojednává o vývoji zařízení pro dálkový odběr materiálových replik. Popisuje samotné zařízení pro aplikaci replikační hmoty na zkoušený povrch a dále zařízení pro dálkové vytlačování replikační hmoty z komerčně dostupné patrony.

This paper describes development of remote device for application of replication silicone rubber compound. It consists of device for application of replica to testing surface and device for remote dispensing of replica compound from commercial cartridge.

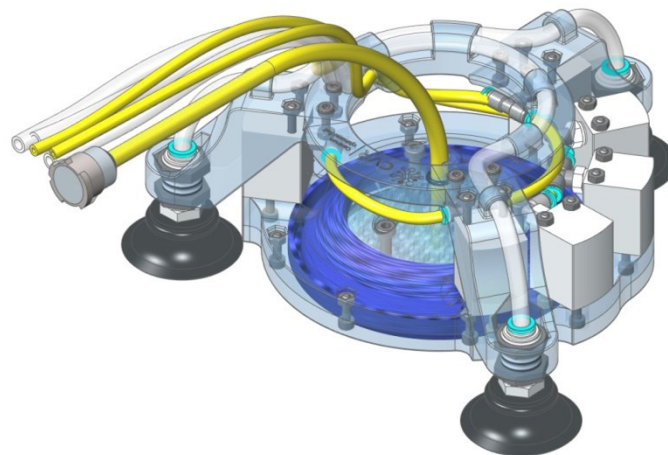
ÚVOD

V současnosti lze provádět kontrolu poškozeného povrchu komponenty v člověku nepřístupných místech (místa s vysokou radiací, pod vodou) zpravidla nepřímou vizuální kontrolou pomocí endoskopů. V případě nutnosti stanovit míru poškození a rozměry poškozeného místa je tato činnost spojena s obdržáním vyšších osobních radiačních dávek. Profil takovýchto míst se prakticky nedá zjistit. Stanovení rozměrů a profilu poškozeného povrchu je možné získat zařízením umožňujícím dálkové sejmutí otisku povrchu pro jeho následné 3D naskenování. 3D model poškozené oblasti bude možné využít jak pro okamžité vyhodnocení stupně poškození, tak i pro případné hodnocení rozvoje poškození (při sejmutí repliky v různých časových okamžicích).

POPIS ZAŘÍZENÍ

Vytváření otisku pomocí replikační hmoty člověkem je dnes běžně proveditelné. Neexistuje však na trhu zařízení, které dokáže vytvořit repliku v místech, kam člověk nemůže vstoupit, aniž by nedošlo k úniku hmoty do prostředí. Po vytvrnutí replikační hmoty je celá replika silně přilepena na zkoušený povrch a je potřeba ji bezpečně odtrhnout a vyjmout z prostředí vody.

Uvedené nedostatky odstraňuje zařízení pro vytváření otisků povrchů v nepřístupných místech jaderných zařízení. Sestává z vnějšího a vnitřního zvonu a základny s rameny, kdy vnější zvon je pomocí pneumatických pohonů připevněn na základnu s rameny a pneumatické pohony vytvářejí požadovaný přítlak na zkoušený povrch. Vakuové přísavky upevněné na ramenech základny drží celé zařízení přisáté na zkoušeném povrchu. Vnitřní zvon



má po obvodu těsnicí O-kroužek, který dosedá na zkoušený povrch a zabraňuje úniku replikační hmoty do prostoru vnějšího zvonu a současně má schopnost se přizpůsobit reliéfu zkoušeného povrchu. Kolem vnitřního zvonu je vložena filtrace pro zachycení úniku replikační hmoty, která je připevněna pomocí příruby. Na vnitřní straně vnitřního zvonu je mřížka pro vtěsnání nadbytečné replikační hmoty a k zajištění úniku vzduchu slouží otvory na obvodu vnitřního zvonu.

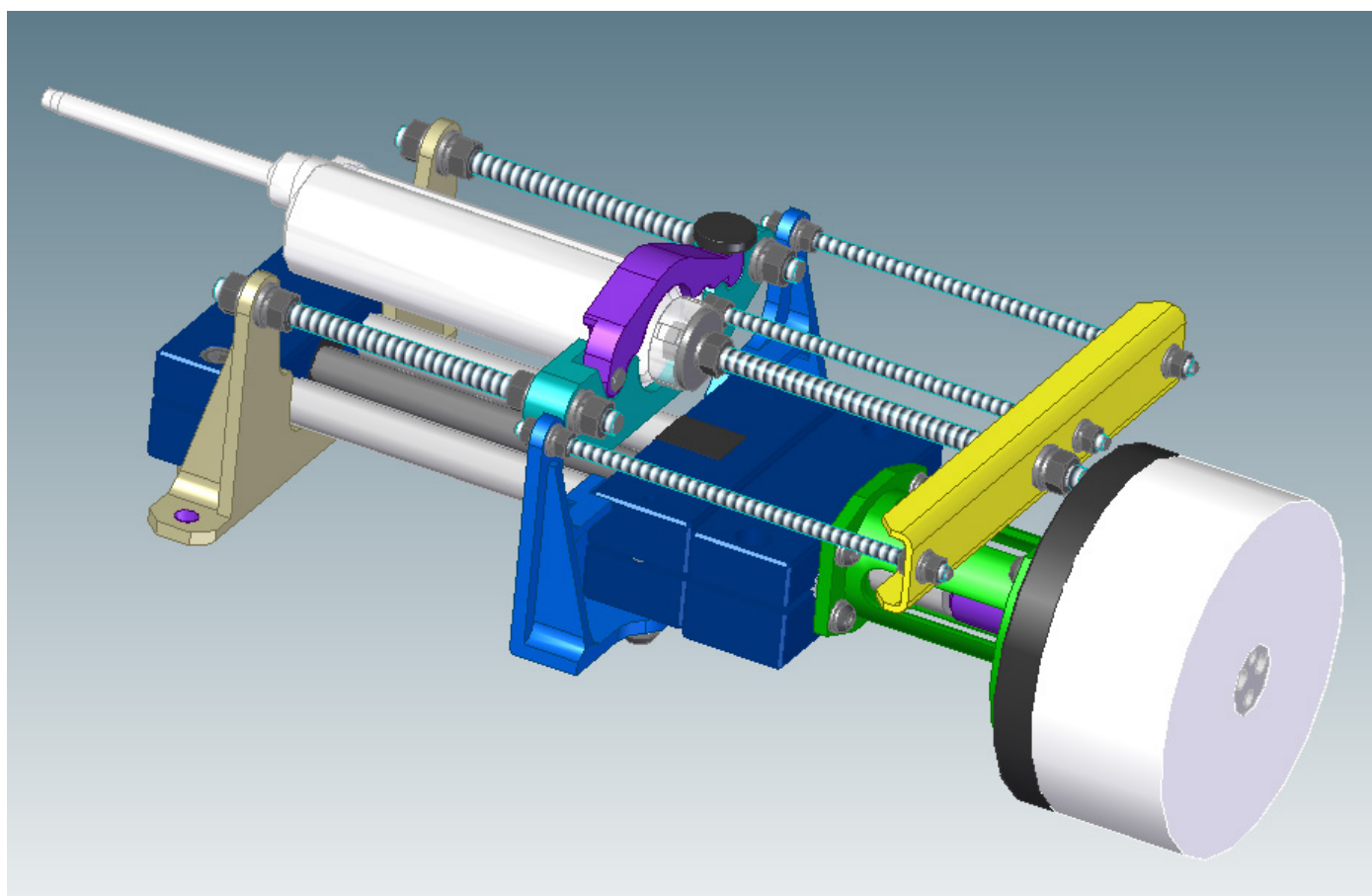
Zařízení se skládá ze dvou na sobě nezávislých celků, kde první část tvoří vnější plastový zvon s přírubou, která pomáhá udržet vnitřní filtraci ve svém stálém tvaru, a tak zabraňuje při úniku replikační hmoty jejímu vmísení do kapaliny ve vnějším prostředí. Na vnější straně zvonu jsou vyrobeny tři plošky pro osazení tří pneumatických pohonů, které po vytvrnutí replikační hmoty slouží k odtržení repliky a celého diagnostického zařízení od zkoušeného povrchu. Replikační hmota je přímo přiváděna do místa odběru otisku pomocí světlonosné hadice, která prochází v ose zvonu a v jeho prostřední části je aretována pomocí gumového těsnění. Do vnějšího zvonu je za pomoci tří šroubů přichycen vnitřní zvon, v jehož středu je umístěný otvor, kterým rovněž prochází průhledná hadice k přivedení replikační hmoty. Přebytečná replikační hmota se vtěsnává do mřížky na vnitřní straně vnitřního zvonu. Současně mřížka slouží k udržení tvaru daného otisku a zachovává soudržnost s vnitřním zvonem při odtrhávání od zkoušeného povrchu. Při vtlačování replikační hmoty do vnitřního prostoru zvonu je hadičkou přiváděný i vzduch, jemuž malé otvory po obvodu umožňují únik. Tak je zajištěno úplné vyplnění prostoru pro odběr otisku a je za-

chována kvalita repliky bez dutin. Na spodní ploše vnitřního zvonu je po obvodu vytvořena drážka pro vložení gumového O-kroužku, který odběrovou plochu těsní a brání úniku replikační hmoty mimo vnitřní zvon. Využívá se také schopnost kroužku se jemně přizpůsobit reliéfu povrchu a kopírovat jeho tvar.

Pro udržení celého zařízení na svém místě při aplikaci a pro následné tvrdnutí replikační hmoty vznikla oválná základna se třemi rameny posunutými vzájemně o 120°. Ve vnitřku každého ramene je vytvořen přesný otvor na vložení pneumatického pohonu. Pohony slouží k vytvoření požadovaného tlaku na celou soustavu dvou zvonů. Na konci každého ramene je umístěna vakuová přísavka, s jejíž pomocí celé diagnostické zařízení drží připevněné na povrchu. Přísavky fungují na principu vakua, kdy ejektor připojený na tlakový vzduch odčerpává kapalinu pod prostorem přísavky a odvádí ji mimo.

DÁLKOVÉ VYTLAČOVÁNÍ REPLIKAČNÍ HMOTY

Nedílnou součástí systému pro dálkový odběr materiálové repliky je zařízení pro dálkové vytlačování replikační hmoty. Standardní vybavení komerčně dostupného replisetu umožňuje použití hadičky nasazené na míchací jehlu a aplikaci pomocí ruční pistole. Vlivem viskozity hmoty je tento způsob možný pouze do délky hadičky cca 1 m, pak díky odporu prostředí vzniká příliš vysoká tlaková ztráta



Obr. 2: Zařízení pro dálkové vytlačování replikační hmoty |

a ruční aplikace je z důvodu potřeby velké síly již nemožná. Pro větší vzdálenosti než 1 m bylo vyvinuto zařízení, umožňující bezpečné vytlačení replikační hmoty, které bude v bezprostřední blízkosti zařízení pro odběr replik. Sestává z lineární jednotky se samomaznými kluznými elementy. Na pevné přední části je připevněn rámeček, do kterého je přes závitové tyče připevněn držák patrony se zajišťovacím těmenem pojištěným aretačním šroubem. Do držáku je vložena samotná patrona s míchací jehlou obsahující dvousložkovou replikační hmotu. Na pohyblivé části lineární jednotky je upevněn držák příčnicku, ke kterému je připevněn příčník, opět pomocí závitových tyčí. Na příčnicku jsou umístěny velký a malý píst, tlačící na samotné zátky patrony

při vytlačování hmoty. Otáčení pohybového šroubu lineární jednotky je docíleno pomocí pneumatického motoru s radiálními písty připojeného k jednotce přes držák motoru, jehož hřídel je spojena přes redukcí a pružnou spojku.

Zařízení je uzpůsobeno pro provoz pod vodou, samomazné provedení lineární jednotky vylučuje vyplavení maziva do okolního prostředí. Vzdálenost pro použití byla testována na 50 m, teoreticky ale může být řádově stovky metrů, než dojde k příliš velké tlakové ztrátě vzduchu vlivem délky vstupní a výstupní hadičky napájecího a výstupního vzduchu. Další omezení vzdálenosti je dáno zavázeční trasou, po které je nutné hadičky

táhnout. Pneumatický typ motoru byl zvolen s ohledem na požadovaný stupeň krytí IP68 a velký krouticí moment při nízkých otáčkách. Dalšími výhodami v porovnání s elektromotorem s převodovkou o podobných mechanických parametrech na výstupní hřídeli jsou menší rozměry a nižší hmotnost, bezpečnější provoz pod vodou a odpadající potřeba elektrického napájení, kdy se využije kompresor pro pohon samotného zařízení pro odběr replik. Pohon motoru je pomocí stlačeného vzduchu s tlakem max. 8 bar. Regulace tlaku umožňuje dosáhnout nižších otáček motoru a zmenšení vytlačovací síly a dochází k pomalejšímu vytlačování replikační hmoty do prostoru odběru otisku. Pro přívod vzduchu do motoru slouží dvě hadičky, každá pro jeden směr otáčení motoru.

Sledování průběhu vymačkávání se předpokládá vizuálně, buď přímo, nebo pomocí kamery či endoskopu. Dále je možné lineární jednotku osadit koncovými snímači a signalizací při dosažení požadovaného zdvihu. Celkový zdvih zařízení je možno nastavit pomocí poloh jednotlivých matic na závitových tyčích, maximální zdvih odpovídá vytlačení téměř celé patrony, takže nemůže dojít k jejímu zničení a vniknutí cizího předmětu do zkoušené technologie.

Celé zařízení je také možné připevnit na zavážecí tyč, případně manipulátor (např. „crawler“), dle přístupnosti zkoušeného místa a povahy zavážecí trasy.

SHRNUTÍ

Stále rostoucí tlak na zvyšování bezpečnosti a spolehlivosti zařízení vede k vývoji nových diagnostických zařízení, která umožní přesněji provést požadovanou činnost. Další výhodou může být provádění těchto činností bez přímé účasti operátora, tzn. vzdáleně, tím dojde ke snížení rizika pro operátora a také k umožnění přístupu do prostor, kde by ani přítomnost lidské obsluhy nebyla možná.

S ohledem na rozsah činností prováděných v CVŘ v oblasti energetiky vznikla potřeba provádět odběry replik pod vodou. Proto v rámci vývojových aktivit CVŘ vznikl interní projekt, který řeší návrh, konstrukci, výrobu a testování zařízení pro odběr repliky pod vodou. V současné době je již k dispozici prototyp zařízení, testují se jednotlivé druhy replisetů, ověřuje se jejich přesnost a stabilita po odběru v prostředí vody. V budoucnu se plánuje využití zařízení pro odběr replik v oblasti s vysokou radioaktivitou nebo pro otisky povrchů radioaktivních vzorků, které je možné provést v tzv. horkých komorách.

Jiří Netušil

jiri.netusil@cvrez.cz

Po ukončení SPŠ strojnické v Plzni pracoval v letech 2006–2020 ve společnosti Doosan Škoda Power. Zde postupně prošel několika pozicemi, zabýval se konstrukcí povrchových kondenzátorů a zejména parních turbín a jejich oprav a retrofitů a technickou podporou obchodu. V roce 2020 nastoupil do společnosti Centrum výzkumu Řež jako vědecko-výzkumný pracovník, zde se zabývá především vývojem a konstrukcí diagnostických manipulátorů.



Vývoj velkokapacitní akumulace energie v CVŘ

**Ing. Tomáš Melichar, Ing. Otakar Frýbort,
Ing. Radomír Filip**

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

46

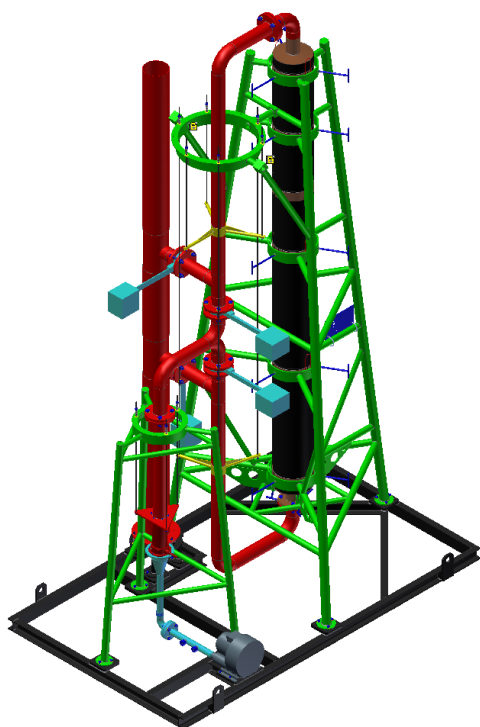
Centrum výzkumu Řež je zapojeno do vývoje systémů velkokapacitní akumulace energie, což je element, jehož potřeba v energetickém mixu se s rostoucím využitím obnovitelných zdrojů neustále zvyšuje. Jedním z principů akumulace je tzv. Thermal Energy Storage (TES), kde je energie ukládána ve formě tepla a v případě potřeby je využívána prostřednictvím konverze na elektřinu nebo pro teplotní využití. Článek stručně popisuje výhody a možnosti technologie TES a vývojové činnosti CVŘ v této oblasti, mezi které patří mimo jiné návrh a vývoj vlastního vysokoteplotního TES systému využívajícího materiál se změnou fáze.

Research Centre Řež is involved in the development of bulk energy storage systems. The relevance of this technology is continuing to grow due to the increasing ratio of renewables in the energy sector. A concept of bulk energy storage based on Thermal Energy Storage (TES) assumes the storage of energy in the form of heat with subsequent conversion to electric power or for district heating utilization. This paper describes the advantages of this technology and the R&D activities of Research Centre Řež in this field including the development of a unique TES concept using high temperature phase change material.

Potřeba akumulace energie v energetickém mixu neustále roste a nedá se předpokládat, že by se tento trend v blízké a střední budoucnosti změnil. To je dáno tlakem na snižování emisní zátěže, ale i zvýšeným rizikem omezení dodávek fosilních zdrojů vlivem zkomplikování politické situace v Evropě v roce 2022. Obecným důvodem zvyšování potřeby akumulace energie je pak rostoucí využití obnovitelných zdrojů energie, které nemohou stabilně dodávat elektřinu do sítě. Akumulace energie v dostatečné kapacitě však nemusí být využívána pouze v souvislosti s obnovitelnými zdroji a ke stabilizaci přenosové soustavy, ale může najít uplatnění i v kombinaci

s fosilními nebo jadernými bloky a přispět ke zvýšení jejich využitelnosti. Velkokapacitní úložiště (s kapacitou v řádu stovek MWh a s výkony v řádu desítek MW) jsou již celosvětově využívána, nicméně i přes značný potenciál jsou s výjimkou přečerpávacích elektráren v současné době takové technologie využívány spíše ojediněle. Převážně se jedná o technologie pracující na elektrochemickém principu (převážně Li-Ion baterie) a na principu TES (Thermal Energy Storage), vyvíjeno je však mnoho dalších konceptů pracujících na různých principech. Do vývoje a studií technologie TES se v posledních letech zapojilo i Centrum výzkumu Řež.

Obr.1: Stend pro testování
akumulačního materiálu ve formě
kameniva v experimentální hale CVŘ

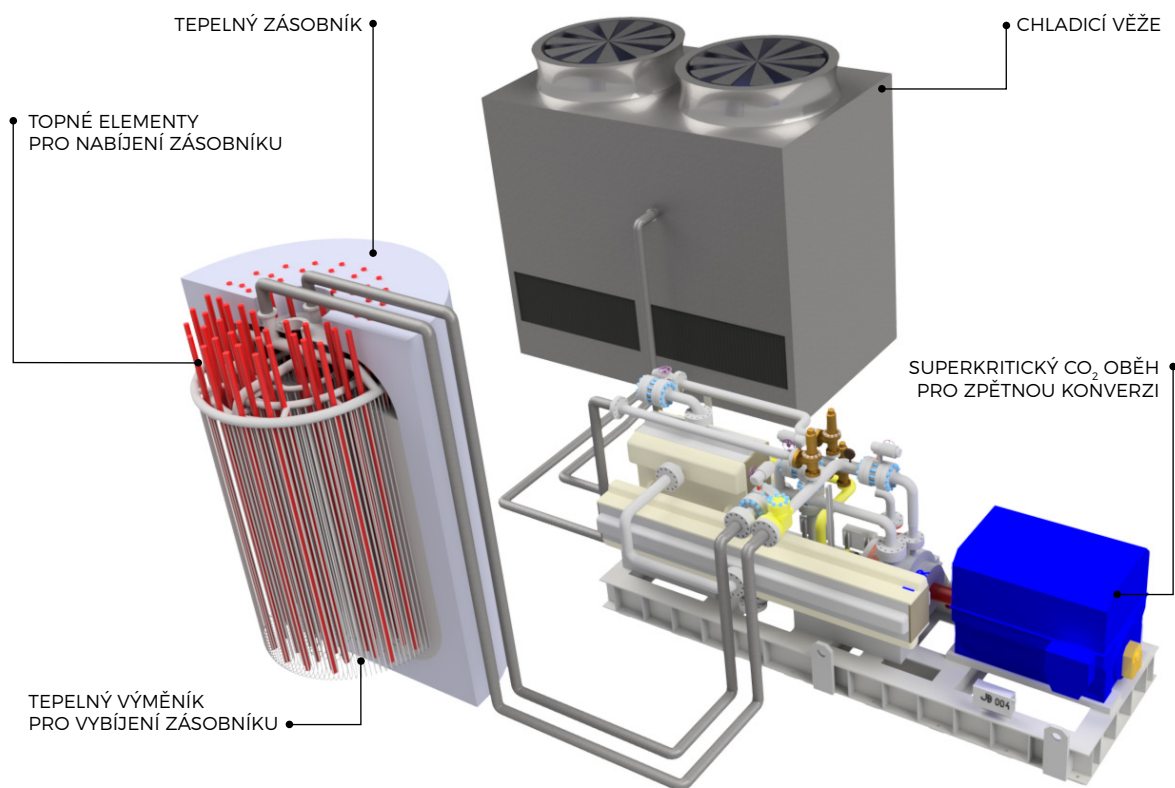


Obr.2: Schéma zařízení pro testování
kameniva jako akumulčního materiálu



Princip akumulace energie TES uvažuje ukládání přebytečné energie do tepelného zásobníku. Vstupní energií může být elektřina s následnou konverzí na teplo nebo přímo vysokopotenciální teplo. Teplo je po potřebnou dobu uloženo v zásobníku s akumulčním materiálem a v případě potřeby je energie využívána prostřednictvím zpětné konverze tepla na elektřinu nebo pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. Celková účinnost akumulace je ovlivněna především procesem zpětné konverze tepla na elektřinu s využitím tepelných oběhů, proto je výhodné akumulovat teplo na vyšších teplotách. Přes relativně nízkou účinnost (v závislosti na volbě technologií 35-50 %

v případě akumulace elektřina-elektřina) má technologie řadu výhod. Na rozdíl od přečerpávacích elektráren je možné jednotky TES realizovat prakticky bez omezení nezávisle na lokalitě a jednotlivé instalace lze škálovat prakticky do neomezených kapacit a výkonů. Jedná se o bezpečnou technologii využívající pro životní prostředí nezávadné materiály. Navíc se předpokládají relativně nízké investiční i provozní náklady v porovnání s jinými potenciálně využitelnými koncepty akumulace, jako je např. využití stlačeného nebo zkapalněného vzduchu nebo i s elektrochemickými úložišti. Provozní parametry i uspořádání vysokoteplotního systému TES lze ovlivnit volbou akumulčního



Obr. 3: Koncept akumulčního zásobníku se slitinou hliníku a křemíku v kombinaci s sCO_2 oběhem

materiálu. Nabízí se akumulace tepla do materiálů v pevném a kapalném skupenství nebo do materiálů se změnou fáze. V současné době jsou nejrozšířenější systémy s akumulčním materiálem ve formě roztavených solí, které jsou provozovány v kombinaci solárních CSP jednotek s parními oběhy pro zpětnou konverzi a dosahují kapacit přes 1 GWh_e a výkonů v řádu stovek MW_e .

CVŘ se věnuje analytickým i experimentálním studiím různých konceptů akumulace TES. V rámci projektu Národní centrum pro energetiku podpořeného Technologickou agenturou ČR byly studovány a porovnány koncepty TES uvažující akumulční materiál ve formě roztavených solí, kameniva a kovu s využitím skupenského tepla. Pro studie systému se zásobníkem s kamenivem, který je součástí tepelného okruhu se vzduchem jako tepelným médiem, byl sestaven experimen-

tální stand simulující fyzikální jevy v reálném zásobníku (Obr. 1). Primárním cílem bylo ověřit stabilitu kameniva z různých, potenciálně vhodných lokalit vlivem cyklického tepelného zatěžování v rozmezí $320\text{--}620 \text{ }^\circ\text{C}$. Dále byly sledovány tepelné fyzikální charakteristiky vrstvy kameniva. Na základě experimentů byla ověřena technická proveditelnost konceptu, na základě paralelních technicko-ekonomických studií však byl tento systém posouzen jako vhodný spíše pro nižší výkony a velké kapacity. To je dáno potřebou vzduchového okruhu, resp. limitovanou proveditelností jeho komponent pro vysoké výkony (ventilátory, tepelné výměníky). Pro výkony v řádu alespoň několika desítek MW se ze sledovaných systémů jeví výhodnější využití právě roztavených solí nebo materiálů se změnou fáze. V rámci projektu Efekt, podpořeného rovněž TA ČR, byl v CVŘ navržen vlastní systém akumulace využívající slitinu hliníku a křemíku jako

akumulační materiál. Tato slitina má výhodné tepelně-fyzikální vlastnosti, jako je vysoké skupenské teplo a tepelná vodivost, a v případě eutektické slitiny i teplotu tavení 577 °C (tj. nominální provozní teplotu). Takový systém je pak možné provozovat i v kombinaci např. se supekritickým CO₂ oběhem pro zpětnou konverzi tepla na elektřinu (Obr. 2) [1]. Celý systém je pak vysoce kompaktní a flexibilní díky relativně malým rozměrům a jednoduchému uspořádání, kdy ohříváky pro nabíjení i tepelný výměník pro vybíjení lze umístit přímo do akumulačního materiálu [2]. Překážkou před realizací energetické jednotky takového systému je především problematika degradace konstrukčních materiálů v prostředí kovu o vysoké teplotě a měnícího své skupenství. Slibnou možností je využití např. keramických ochranných povlaků, další výzkum v této oblasti je však nezbytný. V rámci projektu Efekt se předpokládá realizace a provoz takového zařízení v malém měřítku o kapacitě přibližně 50 kWh_t. CVŘ se rovněž v rámci evropského projektu H2020 COMPASSCO₂ [3] věnuje vývoji systému využívajícího pevné částice jako teplonosný i akumulační materiál, od kterého se slibuje provoz na velmi vysokých teplotách (až 900 °C). Konkrétně se jedná o vývoj tepelného výměníku mezi horkými částicemi a superkritickým CO₂ oběhem jakožto jedné z klíčových komponent systému. S aplikací vysokoteplotních TES systémů souvisí právě výzkum superkritických CO₂ tepelných oběhů, což je problematika, které se CVŘ věnuje již dlouhodobě a patří k evropským lídrům v této oblasti.

Cílem CVŘ je zvolení vhodného systému a demonstrování vysokoteplotní technologie TES ve velkém měřítku v prostředí České republiky, což je nezbytný a zároveň poslední krok před energetickým nasazením technologie. V této lokalitě má technologie potenciál

využití v kombinaci s obnovitelnými zdroji, ale i se stávajícími fosilními nebo jadernými bloky, kdy akumulovaná energie může být využita pro teplotní účely. Ačkoliv při současných podmínkách trhu s elektrickou energií nemusí být TES technologie ekonomicky návratné (což ale platí i pro ostatní principy akumulace), nasazení velkokapacitních jednotek bude vzhledem k nevyhnutelnému nárůstu obnovitelných zdrojů nezbytné, a to již v relativně blízké budoucnosti.

Ing. Tomáš Melichar



tomas.melichar@cvrez.cz

Na Fakultě strojní ČVUT v Praze absolvoval magisterský obor Jaderná energetická zařízení. V roce 2014 nastoupil do Centra výzkumu Řež, kde se jako CFD výpočtář podílel na výzkumu komponent namáhaných vysokými tepelnými toky pro fúzní energetická zařízení. Dále prováděl termohydraulické analýzy v rámci výzkumu a vývoje pokročilých jaderných energetických systémů. V této oblasti se rovněž podílel se na realizaci a provozu několika experimentálních zařízení. Od roku 2017 je vedoucím výzkumné skupiny, která je zaměřena na provádění technických výpočtů a studií pro pokročilé energetické technologie a poskytuje technickou podporu vývoji ozařovacích zařízení pro experimentální reaktory. V posledních letech se zabývá nejadernými energetickými technologiemi včetně vývoje inovativních konverzních cyklů a akumulace energie. V Centru výzkumu Řež je zodpovědný za plnění několika národních i mezinárodních projektů a je autorem řady vědeckých publikací, užitných vzorů a patentů.

Reference:

- [1] Melichar T., Frýbort, O.: Vývoj sCO₂ oběhů a bezemisní teplárna, All for Power, 15. ročník 2/2021
- [2] Melichar, T., Dočkal, K., Frýbort, O., Hájek, P., Filip, R.: Thermal design of latent heat thermal energy storage facility with supercritical CO₂. The 4th European sCO₂ Conference for Energy Systems, conference proceedings, 2021
- [3] Projekt H2020 COMPASSCO₂. <https://www.compassco2.eu/>

Experimentální výzkum jaderných havárií v Centru výzkumu Řež

**Mgr. Bence Mészáros, Mgr. Mykhaylo Paukov,
Ing. Jan Hrbek, Ph.D.**

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

50

Hlavním cílem tohoto článku je upozornit na experimentální výzkum v oblasti jaderných havárií v Centru výzkumu Řež. Historie laboratoře studeného kelímku sahá až do roku 2016 a dnes je jednou z nejmodernějších laboratoří pro studium vlastností materiálů při vysokých teplotách a modelování chování materiálů při jaderné havárii. Během té doby jsme se stali účastníky mnoha významných projektů popsaných níže v diskusi článku, z nichž některé pokračují dodnes.

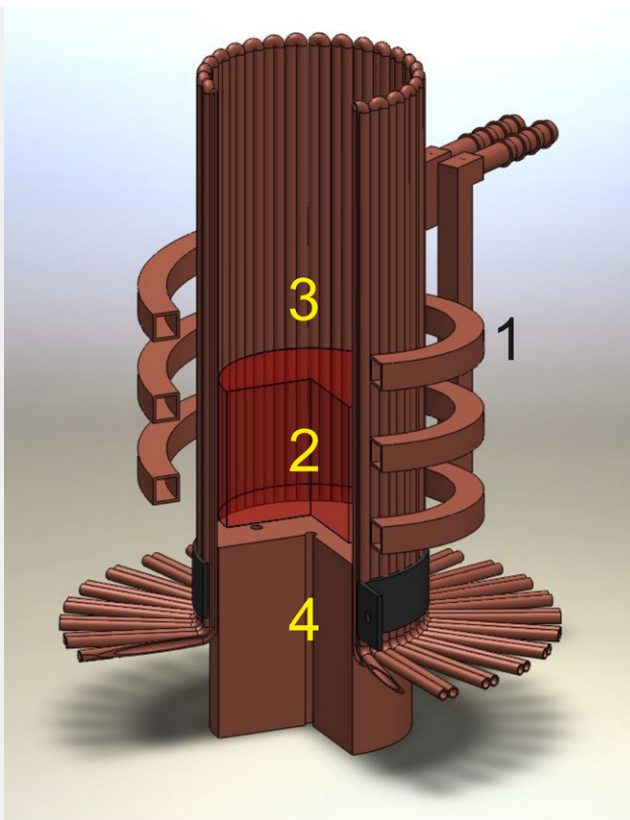
This article aims to draw attention to experimental research in nuclear accidents at the Research Centre Řež. The history of the cold crucible laboratory dates back to 2016, and today it is one of the most modern laboratories for studying the properties of materials at high temperatures and modelling the behaviour of materials in a nuclear accident. During that time, we became involved in many of the significant projects described below in the article discussion, some of which continue to this day.

Úvod

Havárie s tavením aktivní zóny představují významné riziko. Hlavními ochrannými bariérami, které brání úniku radioaktivních štěpných produktů, jsou palivové soubory, pokrytí palivového článku, systém primárního okruhu a kontejnmentu. Pro omezení následků těžkých havárií musí být vytvořeny spolehlivé systémy pro omezení tavení aktivní zóny.

K popisu průběhu těžké havárie se používá především matematické modelování. Výsledky modelování těžkých jaderných havárií závisí na vstupních parametrech, jako jsou materiálové parametry koria a informace o chemické interakci koria s konstrukčními materiály nebo obětním materiálem.

Experimenty indukčního tavení ve studeném kelímku umožňují zpřesňování vstupních parametrů matematických modelů. Touto unikátní technologií je vybavena naše laboratoř. V laboratoři se zabýváme experimentálním studiem materiálových parametrů, jako je hustota, viskozita, tepelný tok z taveniny do stěny tlakové nádoby reaktoru, emisivita taveniny a termofyzikální vlastnosti modelových materiálů a koria. Zkoumáme interakci materiálů při vysoké teplotě během tavení a při vylití roztaveného materiálu na povrch specifických materiálů, jako jsou konstrukční a obětní materiály, s následným studiem interakce taveniny a daného materiálu. Nezbytnou součástí jaderného průmyslu je zpracování radioaktivního odpadu.



Obr. 1: Vysokofrekvenční indukční pec s příslušenstvím (a), schematické znázornění indukční pece se studeným kelímkem, 1 – induktor, 2 – tavenina, 3 – stěna studeného kelímku, 4 – dno studeného kelímku (b)

Jedním ze směrů výzkumu v laboratoři je také experimentální studium vitifikace takových materiálů.

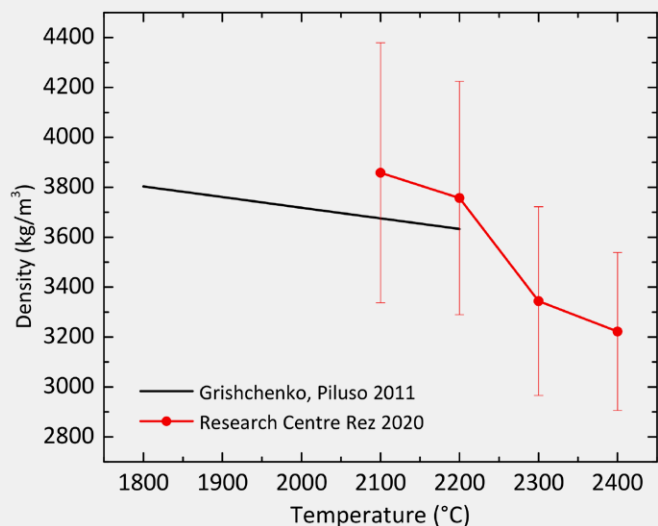
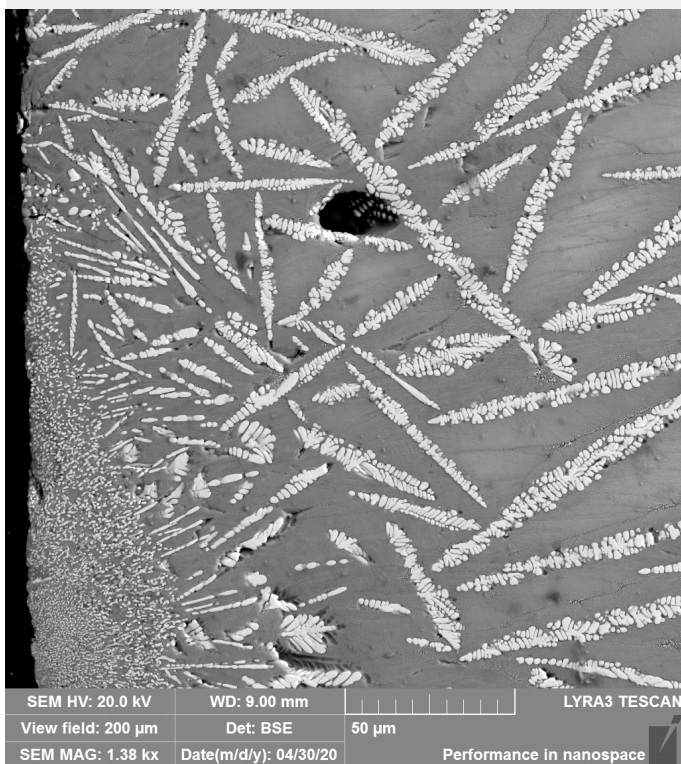
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Indukční tavení materiálů ve studeném kelímku umožňuje získat požadované taveniny ve vysoké čistotě, někdy dokonce čistší než vstupní materiály, protože roztavený materiál neinteraguje s kelímkem a některé nečistoty se vypařují při vysokých teplotách [7]. Dalším významným faktorem je, že při tavení ve studeném kelímku teoreticky neexistují žádná omezení pro maximální teplotu taveniny. Laboratoř je omezena výkonem zařízení, výkonem chladicího systému, ale především maximální měřitelnou teplotou používaných přístrojů na měření této veliči-

ny. V současné době je maximální teplota, kterou můžeme s certifikací zaznamenat, omezena 3 200 °C.

Vysokofrekvenční indukční pec se studeným kelímkem je ukázána na Obr. 1a. Schematické znázornění indukčního systému je zobrazeno na Obr. 1b.

Vakuový systém (C) (Obr. 1a) odsává aerosoly, které vznikají při tavení materiálu. Polohovací systém (D) je další nezbytnou součástí technologie, která umožňuje pohyb studeného kelímku ve vertikálním směru. Hustota vstupních materiálů ve formě prášku je až desetkrát menší než hustota taveniny, aby bylo možné materiál tavit je nezbytné udržovat taveninu na úrovni induktoru.



Obr. 2: SEM snímek ze vzorku z experimentů (a), graf závislosti hustoty na teplotě pro směs $ZrO_2-Al_2O_3$ (b) [8]

Na začátku experimentu je polohovací zařízení ve spodní poloze, která odpovídá umístění induktoru v horní části studeného kelímku (viz Obr. 1a). Po roztavení celého objemu vsádky je polohovací zařízení v takzvané nulové poloze. V této poloze je spodní část induktoru ve stejné úrovni jako horní část dna studeného kelímku (viz Obr. 1b). Hladina taveniny je během experimentu zaznamenávána na kameru (B) a teplota je měřena bezkontaktně pomocí pyrometru (A). Chladicí systém je osazen průtokoměry a termočlánky, pomocí kterých se získávají informace o výkonu v tavenině, a dalších důležitých částí systému.

Na začátku experimentu je polohovací zařízení ve spodní poloze, která odpovídá umístění induktoru v horní části studeného kelímku (viz Obr. 1a). Po roztavení celého objemu vsádky je polohovací zařízení v takzvané nulové poloze. V této poloze je spodní část induktoru ve stejné úrovni jako horní část dna studeného kelímku (viz Obr. 1b). Hladina taveniny je během experimentu zaznamenávána na kameru a teplota je měřena bezkontaktně pomocí pyrometru. Chladicí systém je osazen průtokoměry a termočlánky, pomocí kterých se získávají informace o výkonu v tavenině a dalších důležitých částech systému.

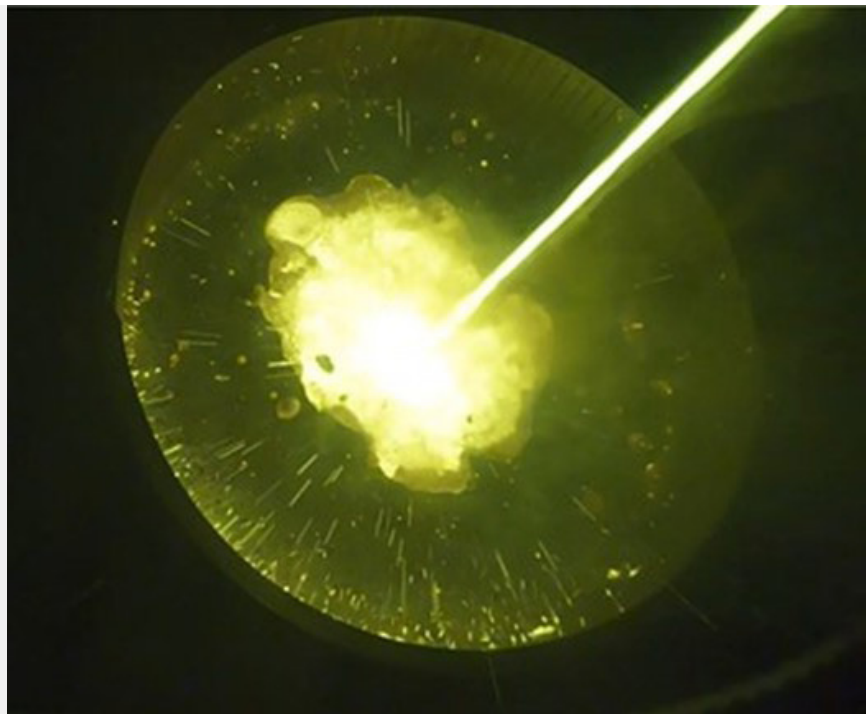
DISKUSE

Během existence laboratoře jsme se účastnili několika významných mezinárodních projektů a navázali spolupráci s mezinárodními partnery, například v Japonsku, která trvá dodnes.

Jedním z významných programů byl evropský projekt IVMR „In-Vessel Melt Retention Severe Accident Management Strategy for Existing and Future NPPs“. Cílem projektu byla analýza použitelnosti a technické proveditelnosti strategie IVMR na výkonnové reaktory, a to jak stávající (např. bloky VVER-1000 typ 320), tak i budoucí reaktory různých typů (PWR nebo BWR). Hlavními výstupy projektu jsou příslušné předpoklady a scénáře pro odhad maximálního tepelného zatížení stěny reaktorové nádoby, vylepšené numerické nástroje pro analýzu problémů IVMR.



Obr. 3: Průřez ingotu z neaktivního experimentu



Obr. 4: Výlev koria na vzorek žáruvzdorné desky

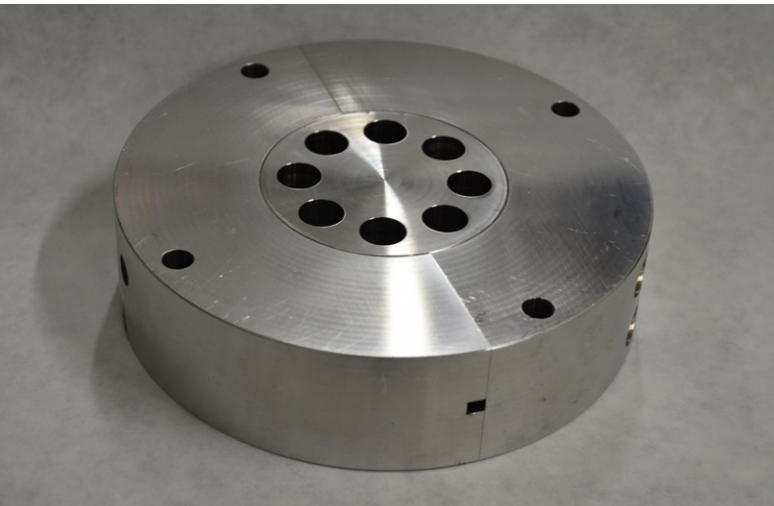
Dalším významným mezinárodním úspěchem byla účast na projektu TCOFF „THERMODYNAMIC CHARACTERISATION OF FUEL DEBRIS AND FISSION PRODUCTS“, který se zabýval výzkumem vyřazování jaderné elektrárny Fukušima-Daiči (FDNPP) z provozu po její těžké havárii v roce 2011. Projekt nesloužil pouze k vědecké podpoře při vyřazování této elektrárny, ale také pro zlepšení bezpečnosti lehkovodních jaderných reaktorů (LWR) a také k rozvoji dovedností nové generace vědců a inženýrů.

Dalším významným kladným výsledkem laboratoře bylo vyvinutí a ověření nové metody na měření hustoty směsí při teplotách nad 2 000 °C v rámci interního projektu. [8] Vyvinutá metoda byla ověřována na směsi oxidů hlinitého a zirkoničitého v různých poměrech (Obr. 2), výsledky byly následně porovnány s dostupnou literaturou.

Ve spolupráci s JAEA „Japan atomic energy agency“ bylo provedeno studium solidifikačních mechanismů roztaveného koria. Studie sloužila k odborné pomoci při vyřazování jaderné elektrárny Fukušima-Daiči z provozu a některé výsledky byly společně publikovány v [9].

Pro TiTech „Tokyo Institute of Technology“ byl uskutečněn výzkum na rozpouštění nerezové oceli v tavenině částečně zoxidovaného koria.

Na tento projekt navazuje současná kooperace s TiTech, JAEA a dalšími japonskými univerzitami na téma studium rozpouštění nerezové oceli v částečně roztaveném oxidickém kriu za podmínek na bloku 3 při havárii jaderné elektrárny Fukušima-Daiči (Obr. 3).



Obr. 5: Vzorek eliptického perforovaného dna nosného válce (a), vzorek po experimentu (b) |

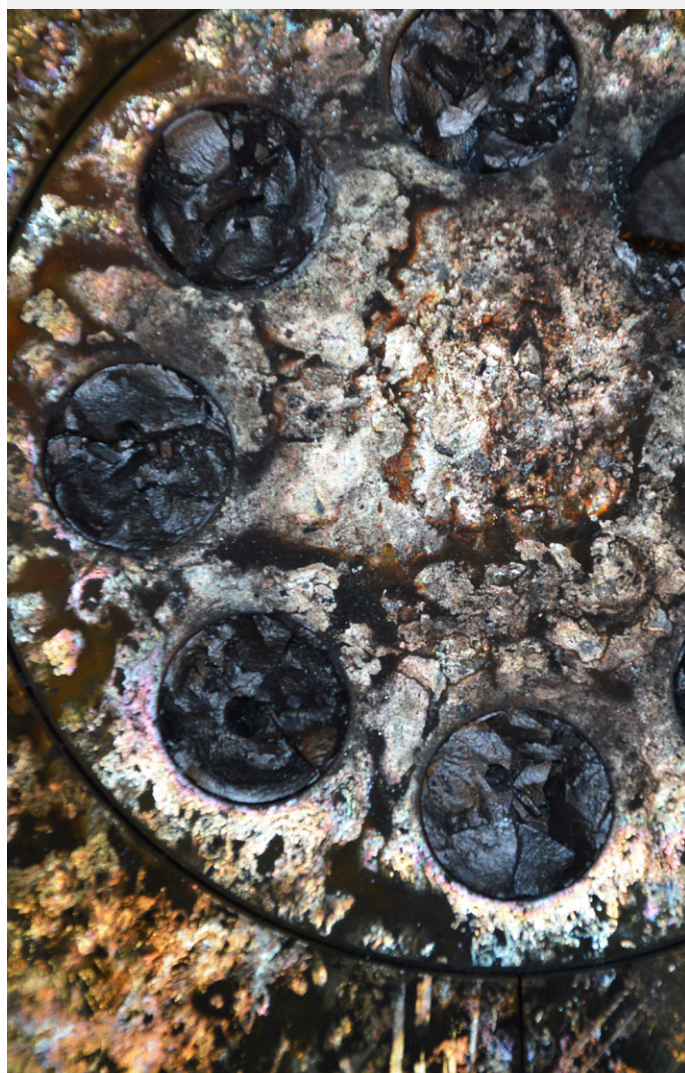
V současné době pracujeme ještě na dalších dvou významných národních projektech. V rámci projektu TA ČR - NOVA se zabýváme studiem interakce nových anorganických materiálů na bázi hliníkokřemičitanových geopolymérů s roztaveným korielem (Obr. 4).

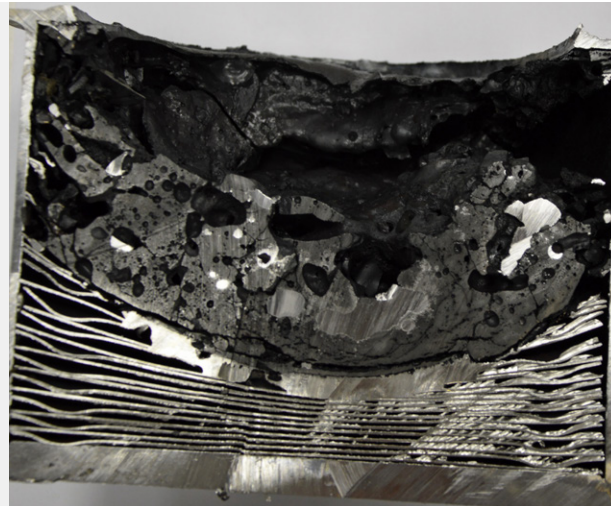
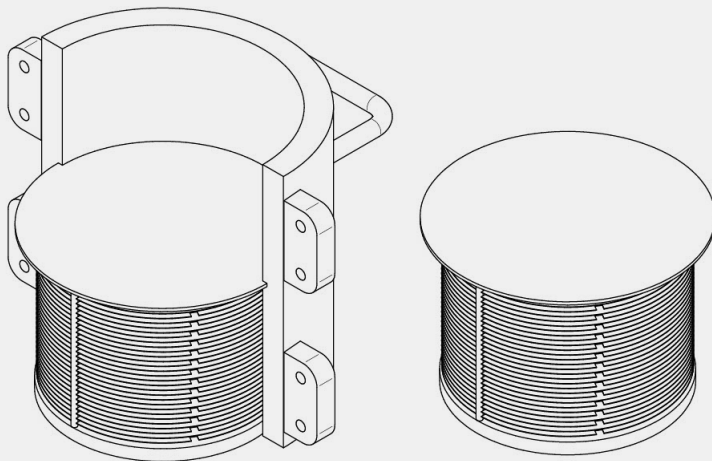
Dalším významným národním projektem je projekt TA ČR - Corium, který se zabývá studiem vybraných materiálových parametrů koria a interakce s modely vybraných konstrukčních prvků jaderného reaktoru typu VVER-1000, a to konkrétně s materiálem eliptického perforovaného dna nosného válce (Obr. 5) a s tepelným stíněním na podlaze šachty reaktoru (Obr. 6).

SHRNUTÍ

Laboratoř studeného kelímku je významným vědeckým partnerem na mezinárodní i národní úrovni. V rámci výzkumu poskytuje unikátní data potřebná k matematickému modelování havárií a experimentálně se podílí na výzkumu těžkých jaderných havárií.

Prezentované výsledky byly realizovány v rámci Institucionální podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR.





Obr. 6: Schéma vzorku tepelného stínění na podlaze šachty reaktoru (a), průřez vzorkem po experimentu (b)

Reference:

- [1] DAVID, P.A., MAUDE-GRIFFIN, R., ROTHWELL, G., Learning by accident? Reductions in the risk of unplanned outages in U.S. nuclear power plants after Three Mile Island, *J. Risk Uncertain.* 13 2 (1996) 175
- [2] KISELEV, A.N., SURIN, A.I., CHECHEROV, K.P., Posleavariynoye obsledovaniye 4-go energobloka Chernobol'skoy AES, *Atomnaya Energiya* 80 4 (1996) 240
- [3] INTERNATIONAL INSAG-12, NUCLEAR SAFETY ADVISORY GROUP, Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants: 75-INSAG-3 Rev. 1, Vienna: International Atomic Energy Agency (1999) 97 pp
- [4] LORNA, A., Windscale 1957. Anatomy of a Nuclear Accident, 1st ed., Palgrave; (September 12, 2007) (2007) 266 pp
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA INTERNATIONAL FACT FINDING EXPERT MISSION OF THE FUKUSHIMA DAI-ICHI NPP ACCIDENT FOLLOWING THE GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE AND TSUNAMI, (2011) 160 pp.
- [6] BABA, M., Fukushima accident: What happened?, *Radiat. Meas.* 55 (2013) 17
- [7] ALEKSANDROV, V.I., OSIKOV, V.V., PROKHOROV, A.M., TATRINTSEV, V.M., The Formation of High-temperature Materials by Direct High-frequency Fusion in a Cold Container, *Russ. Chem. Rev.* 47 N3 213 (1978), The Chemical Society and The British Library
- [8] HRBEK, J., MÉSZÁROS, B., PAUKOV, M., KUDLÁČ, M., Methodology for Measurement of Density of Liquid Oxides, *J. Nucl. Eng. Radiat. Sci.* 7 (2021)
- [9] Sudo A., Meszaros B., Poznyak I., Sato T., Nagae Y., Kurata M., Segregation behavior of Fe and Gd in molten corium during solidification progress, *Journal of Nuclear Materials*, Volume 533, 2020, 152093, ISSN 0022-3115
<https://doi.org/10.1016/j.nucmat.2020.152093>

Mgr. Mykhaylo Paukov



mykhaylo.paukov@cvrez.cz

Narodil se v roce 1982 ve městě Baku. V roce 1991 se se svými rodiči přestěhoval na Krym. Po úspěšném absolvování bakalářského studia experimentální fyziky na Taurida National University v. I. Vernadského, během něhož obhájil bakalářskou práci „Magnetická susceptibilita feritů s magnetoelastickými interakcemi“, pokračoval tamtéž na magisterském stupni. Tématem jeho diplomové práce, kterou rovněž úspěšně obhájil, bylo „Buzení elastických vibrací v pevných rezonátorech“. V roce 2012 nastoupil na doktorský studijní program na MFF UK v Praze. Od roku 2017 působí jako odborný asistent v laboratoři nových magnetických materiálů Baltské federální univerzity Immanuela Kanta. V roce 2018 nastoupil na pozici vědecko-výzkumného pracovníka v Centru výzkumu Řež. Seznam jeho publikací obsahuje více než 50 odborných článků, z nichž většina vyšla v impaktovaných časopisech.

Velké technologické projekty Centra výzkumu Řež

Ing. Petr Březina, MSc.

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Centrum výzkumu Řež není jen výzkumná organizace, jedna z jeho sekcí se zaměřuje na realizaci velkých technologických projektů od návrhu přes strojírenskou výrobu, realizaci, zkoušky až po samotné zprovoznění. Hlavním projektem sekce je „in-kind“ příspěvek České republiky výstavby horkých komor na projektu JHR (Jules Horowitz Reactor). Dalším významným mezinárodním projektem CVŘ je dodávka hlavního heliového chladicího okruhu do ESS (European Spallation Source). Strojírenská prototypová výroba v CVŘ dokáže vyrábět složitá zařízení nejen pro provádění interních experimentů.

Research Centre Řež is not just a research organisation, one of its sections focuses on the implementation of large technology projects from design, through engineering, installation, testing and commissioning. The main project of the section is the "in-kind" contribution of the Czech Republic to the construction of hot cells on the JHR (Jules Horowitz Reactor) project. Another important international project of CVŘ is the delivery of the main helium cooling circuit to the ESS (European Spallation Source). The fabrication and prototype production at the CVŘ can produce complex devices not only for internal experiments.

V tomto speciálním čísle jsou v článkách mých kolegů popsány výzkumné aktivity, kterým se Centrum výzkumu Řež věnuje, i technologie a infrastruktury, které pro výzkum využívá. Tento článek si klade za cíl popsat kompetence, kterými CVŘ disponuje a které se významnou měrou podílí na výstavbě a rozvoji těchto technologií. Mezi tyto kompetence patří konstrukce a strojírenská výroba, která navazuje na dlouholetou tradici rozvíjenou v řežském údolí už od samotného počátku historie budování výzkumného reaktoru VVR-S, přes návrhy, výrobu a zprovoznování nejrůznějších experimentálních zařízení a technologických celků až po významný podíl na vývoji, výrobě a zprovoznování technologií v rámci projektu SUSEN. Díky těmto zkušenostem, získanému know-how a významným referencím může CVŘ své konstrukční a výrobní kapacity zapojovat i do velmi významných mezinárodních projektů výstavby velkých experimentálních infrastruktur.



Obr. 1: Pohled na stavbu JHR v roce 2021 (zdroj: CEA)

Reaktor Julese Horowitzze (JHR)

JHR je jedním z velkých mezinárodních inženýrských projektů, na kterém od roku 2009 CVŘ aktivně spolupracuje, aby umožnila účast České republiky na výzkumné činnosti JHR. JHR-CZ zabezpečuje zapojení České republiky do stavby JHR a podílí se na jeho vybudování tzv. in-kind dodávkou (Design – Build) horkých komor. Díky dodávce této části JHR bude Česká republika po spuštění provozní fáze JHR disponovat přístupem k experimentální kapacitě JHR až do výše 3 %. JHR-CZ bude následně na základě politiky otevřeného přístupu zabezpečovat přístup české výzkumné komunity ke kapacitám JHR. Zároveň bude výzkumná infrastruktura připravovat novou generaci vědců a inženýrů, kteří budou mít přístup ke kapacitě JHR. V rámci přípravných experimentálních prací JHR je JHR-CZ (CVŘ) zapojeno do sdružení FIJHOP (Foundation for Future International

Jules Horowitz Experimental Programmes). První krůčky na projektu JHR nebyly lehké. Psal se rok 2009, kdy se kolegové pustili do studia rozsáhlých podkladů, které obsahovaly popis několika desítek prototypových zařízení a to, jak mají fungovat, jaké mají vazby, čím se mají ovládat apod. Součástí vstupních podkladů byl i basic design zpracovaný ve 3D SW Catia. Během následujících let konstruktéři z CVŘ dokázali tyto představy a myšlenky transformovat do reálného designu. V rámci fáze designu bylo rovněž ke každému zařízení vypracováno nesčetně dokumentace, jedná se například o popisy funkcí, elektro dokumentaci, dokumentaci spolehlivosti, dokumentaci vázanou na bezpečnostní třídy, výpočtové zprávy apod. Veškerá dokumentace související s projektem JHR dnes obsahuje kolem 2 000 dokumentů a velké množství jednotlivých výkresů. Kolem roku 2015 začala probíhat první výběrová řízení na dodávky

O projektu JHR:

JHR-CZ je výzkumná infrastruktura, která umožní účast ČR na výzkumné činnosti JHR (Jules Horowitz Reactor). JHR je materiálovým výzkumným reaktorem určeným pro výzkum, vývoj, inovace a kvalifikaci materiálů a jaderného paliva. Související studie již nyní přispívají ke zvyšování bezpečnosti existujících a budoucích jaderných reaktorů. JHR umožní testovat materiály za podmínek odpovídajících energetickým reaktorům, zrychlit modelování degradace materiálů a vyhodnocovat vlastnosti komponent na konci jejich životnosti. Výsledky výzkumu, vývoje a inovací prováděných v JHR budou mít uplatnění zejména v energetickém průmyslu, ale např. i v medicíně. JHR bude sloužit širokému spektru ozařovacích experimentů, jakými jsou studie paliva zahrnující jeho výběr a charakterizaci, testování a hodnocení paliva vystaveného podmínkám, které odpovídají normálnímu provozu, přechodovým stavům reaktoru, jakož i podmínkám mimořádným i havarijním. Portfolio poskytovaných expertiz a služeb zahrne také nakládání s jaderným odpadem a medicínské aplikace. Konstrukci JHR zabezpečuje mezinárodní konsorcium skládající se z výzkumných organizací a průmyslových podniků z Belgie, ČR, Finska, Francie, Indie, Izraele, Japonska, Španělska, Švédska, Velké Británie a Číny. Partnerem projektu JHR je i Evropská komise.

<https://jhrreactor.com/>

těchto zařízení. Cesta to byla trnitá, museli jsme pracovat v intencích zákona o veřejných zakázkách, dokonce jsme i několik výběrových zařízení museli opakovat, protože jsme například neobdrželi nabídky. Ale povedlo se a všechny smlouvy jsme s jednotlivými dodavateli úspěšně uzavřeli. Během jejich plnění, jak to již bývá, nastaly v realizační fázi různé změny, ať už z důvodu technologických či z důvodu nedostupnosti navržených komponent apod.

Od roku 2012 je náš montážní tým na stavbě ve Francii v Cadarache. Tento tým kontinuálně zajišťuje nejen montáž a dohled nad jednotlivými dodavatelskými subjekty, které provádějí montáže svých zařízení, ale i komunikaci s hlavním investorem přímo na stavbě. Dnes, v roce 2022, je plně dokončena hermetická bariéra horkých komor, tzv. opláštění, včetně jeho testování na těsnost. Byly namontovány a postupně se zprovozňují posuvné a otočné dveře (pro představu – jedny dveře mají hmotnost cca 10 t v rozměrech 3,5 × 1,2 × 0,3 m a jsou uvnitř vyskládané z olovených cihel zajišťujících stínící funkci), byly instalovány a zprovozněny údržbové jeřáby a další drobnější zařízení. Jedna z největších a nejsložitějších prací nás teprve čeká, a tou je montáž podvěsných jeřábů v každé horké komoře (celkem 9 kusů) – tato montáž by měla začít v letošním roce.

Tím to ale ještě nekončí. Jakmile vše namontujeme, tak nás bude čekat fáze globálních zkoušek, tzn. ověření funkčnosti veškerého vybavení, které se v komorách bude nacházet a které je povinné odzkoušet před uvedením do plného provozu. Tady nás může potkat ještě plno problémů, ale věříme, že vše dobře zvládneme a tento významný projekt úspěšně dokončíme a projekt JHR úspěšně dotáhneme do finále! Jedná se o jednu z prestižních referencí a vizitek, kterou v odvětví výstavby horkých komor můžeme získat.

Evropský spalační zdroj (ESS)

Dalším významným mezinárodním projektem, na kterém CVŘ spolupracuje společně s Ústavem jaderné fyziky AV ČR, je projekt ESS (European Spallation Source), ve kterém CVŘ zajišťuje dodávku (design and build) hlavního heliového chladicího okruhu.

Účelem heliového chladicího systému je odvedení tepelné energie až 3 MW z ozařovaného terče. Pro tento účel je systém rozdělen na tři části. Primární systém zajišťuje proudění helia skrze terč a zajišťuje odvod zmíněného tepla. Systém kontroly tlaku zajišťuje konstantní hodnotu pracovního tlaku v primárním systému. Pomocný systém je napojený přímo na ložiska terče, kde zajišťuje jejich vlastní těsnost.



0 projektu ESS:

ESS (European Spallation Source) je projektem vysoce výkonného neutronového pulzního zdroje, který je budován v Lundu ve Švédsku. Na neutronových svazcích ESS bude možné studovat problémy mnoha vědních oborů, jakými jsou fyzika pevné fáze (výzkum supravodivosti a magnetických struktur), chemie (studie struktur surfaktantů), biologie (studie působení léčiv, struktura, uspořádání a dynamika řetězců DNA), materiálový výzkum (in situ a in operando studie pokročilých materiálů, nabíjecí a vybíjecí procesy v bateriích, transport vodíku v palivových článcích, fázové přechody v nových typech slitin s unikátními vlastnostmi, jako vysoká mechanická a tepelná odolnost, jev tvarové paměti) a kulturní dědictví (nedestruktivní zobrazovací studie historických artefaktů). Věcným vkladem ČR do výstavby ESS je difraktometr BEER (Beamline for European Engineering Materials Research), vědecký instrument na svazku ESS zaměřený na materiálový výzkum. Přístroj je speciálně navržen pro detailní nedestruktivní charakterizaci inženýrských materiálů a technologických komponent in situ a in operando v průběhu termomechanické zátěže, tedy za podmínek, které simulují skutečné průmyslové procesy, a to výrobní, zpracovatelské i provozní. Dalším příspěvkem České republiky do konstrukční fáze ESS jsou dodávky systémů pro terčovou stanici ESS – heliová chladicí smyčka, vodní chlazení terče a HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning) budovy terčové stanice. Tyto příspěvky zajistí výzkumným pracovníkům z České republiky 2% využití experimentální kapacity na všech instrumentech ESS. Česká republika se stala zakladatelským členským státem konsorcia evropské výzkumné infrastruktury European Spallation Source ERIC, přičemž ESS Scandinavia-CZ bude zajišťovat přístup ke všem instrumentům ESS pro české uživatele po uvedení ESS do uživatelské fáze. European Spallation Source ERIC se jako právnická osoba zapojuje do mezinárodních sítí prostřednictvím strategického konsorcia LENS (League of Advanced European Neutron Sources), které bude sdružovat klíčové evropské výzkumné infrastruktury provozující neutronové zdroje a zajistí jejich optimální využití ze strany akademické i podnikatelské sféry.



Obr. 3: Výroba vnitřních boxů horkých komor v dílnách Centra výzkumu Řež

Součástí primárního chladicího systému jsou tepelné výměníky helium-voda, filtry a cirkulátor. Cirkulátor jakožto hlavní komponenta systému je navržen tak, aby při pracovním tlaku 1,1 MPa generoval rychlost helia ve smyčce až 2,5 kg/s, přičemž otáčky samotného cirkulátoru při tom dosahují až 40 000 rpm a teplota helia kolem 300 °C. Jedná se o prototyp s velkým P, protože cirkulátor s takovýmto výkonem na světě není dostupný, ne tedy v kombinaci s požadavkem na bezolejové provedení. Návrh designu této hlavní komponenty pochází z kreslicího prkna švýcarské firmy OFTtech, avšak výrobu většiny dílčích komponent, z nichž se cirkulátor skládá, zajistily dílny CVŘ. Už ve fázi výroby se musel klást velký důraz na přesnost a dodržení přesných tolerancí, protože pracovním médiem je helium.

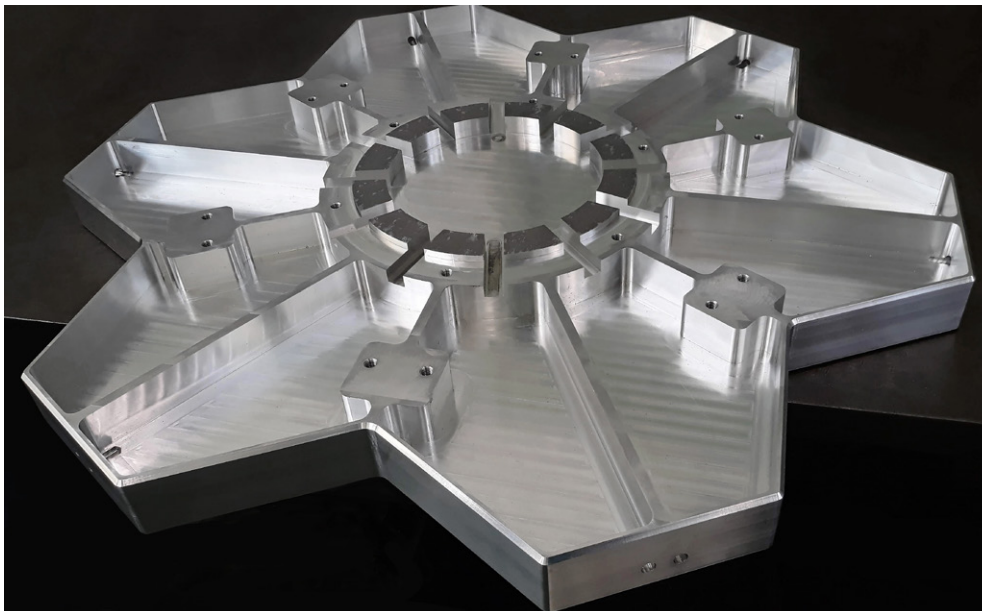
Další velmi důležitou komponentou jsou filtry, jejichž celý proces od návrhu přes výrobu až po testování a instalaci byl realizován CVŘ. Účelem sekundárního filtru, který je umístěn v neaktivní zóně, je zachytit částice větší než 0,5 mm tak, aby se nedostaly až do terče a neucpaly jej. Hlavní filtr umístěný v aktivní zóně zachycuje ozářené radioaktivní částice tak, aby nedošlo k jejich proniknutí do neaktivní zóny. Pro tento účel a s ohledem na parametry je hlavní část filtru složena z 34 filtračních vložek, které zachytí částice větší než 5 µm, a 5 filtračních svíček, které zachytí částice větší než 1 µm. Důležitým aspektem při návrhu

obou filtrů bylo nejen navržení samotné tlakové nádoby, která musí odolat tlaku 1,3 MPa při teplotě 300 °C, ale zároveň musí splnit náročné podmínky na vlastní vnitřní aerodynamiku, kde dalším nepříznivým faktorem je limitovaný prostor, do kterého se hlavní filtr musel vejít. Přísná kritéria na tlakovou ztrátu, návrhové parametry, limity objemu a na snadnou a rychlou vyměnitelnost vyústila v několik různorodých návrhů, které následně byly podrobeny simulacím pevnostní analýzy a simulaci proudění. Abychom měli jistotu, že simulace proudění a výpočet tlakové ztráty odpovídají skutečnosti, využili jsme možnosti změřit fragmenty obou filtrů na naší heliové smyčce S-ALLEGRO. Po výrobě obou filtrů realizované v našich dílnách byla provedena i tlaková zkouška, která ověřila správnost výpočtu dle návrhových hodnot.

Celý systém pak musí po instalaci projít nejen standardními procesy testů a zprovoznění, ale zároveň musí splnit i podmínku úniku helia do okolí, která nesmí být větší než 1 g/h na celý systém. To klade důraz nejen na preciznost montáže např. přírubových spojů, ale také na požadované parametry pro jednotlivé komponenty, jako jsou např. ventily. Tato fáze nastane ke konci letošního roku a věříme, že i tento projekt bude úspěšně zakončen.

Strojírenská prototypová výroba v CVŘ

Dílny CVŘ slouží zejména k výrobě zařízení pro provádění experimentů, které jsou navrženy v rámci různých vědecko-výzkumných projektů. Ať už jde o experimentální ozařovací sondy, pouzdra pro ozařování vzorků materiálů v reaktoru LVR-15 anebo o komponenty dodávané v rámci in-kind dodávky horkých komor pro JHR, vždy je kladen důraz na kvalitu provedení práce včetně dodání veškeré potřebné výrobní dokumentace, která je vyžadována v rámci zajištění jakosti (Quality Assurance).



Obr. 4: Spodní díl velké vyhřívané vložní zóny pro reaktor LR-0

Technologie dílen CVŘ

- obrábění (soustružení, frézování)
- zámečnické a montážní práce
- svářečské práce – ocel, nerez, Al slitina, Inconel, zirkon, měď
- povrchová úprava – moření, pasivace a tryskání nerezových dílů
- řezání CNC vodním paprskem / plazmou
- ohýbání plechů na CNC lisech
- CNC frézka, CNC soustruh, EDM stroj (elektro drátová řezačka)

Výrobní dílna CVŘ je držitelem certifikací

- EN ISO 3834-2
- EN 1090-2
- DNV GL class I a II
- CVŘ je držitelem více než 60 kvalifikovaných svařovacích postupů (WPQR)
- CVŘ disponuje kvalifikovanými svářeči pro metody TIC, MIG a MMA pro materiály – nerez, hliník, Inconel, uhlíková ocel; zároveň disponuje kvalifikovaným svářečským personálem – IWE, IWT, IWI včetně NDT pracovníků na PT a VT level II a revizního technika pro provádění tlakových zkoušek dle PED 97/23/EC

Ing. Petr Březina, MSc.

petr.brezina@cvrez.cz



Absolvent Fakulty stavební ČVUT v Praze a současně v rámci „double degree“ programu Erasmus absolvent Cranfield University ve Velké Británii. Po ukončení studií nastoupil do velké stavební společnosti Costain Ltd., kde byl vybrán a absolvoval „Graduate Development Programme“ pro budoucí manažery. Pracoval jako Site Engineer na realizaci velkých stavebních projektů. Po víceletém působení ve Velké Británii přijal pracovní nabídku od Vinci Construction France, kde působil jako Construction Site Manager a QA Manager na významných stavebních projektech v Paříži, Grenoblu a Lyonu pro zákazníky jako např. EDF, Areva a Orano na stavbě Cumurhex II – závod na přepracování uranu.

Od roku 2012 pracuje ve společnosti Centrum výzkumu Řež, kde působil přímo na stavbě JHR v Cadarache jako hlavní inženýr projektu. Následně postoupil na pozici ředitele sekce Velkých technologických projektů a od roku 2019 zastává souběžně i funkci jednatele CVŘ.

Spolupráce Centra výzkumu Řež s průmyslem

Ing. Daneš Burket, Ph.D.

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Tento článek popisuje široké spektrum vědecko – výzkumných aktiv Centra výzkumu Řež realizovaných ve spolupráci s průmyslem, a to především v oblasti energetiky, jaderné i nejaderné. Výčet aktivit zahrnuje oblasti výzkumu, unikátní experimentální technologie a příklady významné národní i mezinárodní spolupráce.

This article describes a wide range of scientific and research assets of the Research Centre Řež implemented in cooperation with industry, primarily in the field of energy, both nuclear and non-nuclear. The list of activities includes areas of research, unique experimental technologies, and examples of significant national and international cooperation.

62

Centrum výzkumu Řež se zaměřuje především na výzkum, vývoj a inovace v oblasti energetiky. Z tohoto pohledu je pro nás samozřejmě klíčová spolupráce s provozovateli elektráren, firmami zajišťujícími údržbu a servis na elektrárnách a dodavateli technologických celků, zařízení a komponent.

Nejbližším partnerem je logicky mateřská společnost ÚJV Řež, která zajišťuje technickou a inženýrskou podporu především pro jaderné elektrárny. Jedním z poslání Centra výzkumu Řež je předkomerční vývoj technologií a metod, které mateřská společnost může následně uvádět do praxe a dodávat provozovatelům v podobě inženýrské a technické podpory nebo servisních služeb. Vedle mateřské společnosti je dalším blízkým partnerem společnost ČEZ (ÚJV Řež je součástí Skupiny ČEZ), se kterou coby tuzemským provozovatelem elektráren rozvíjí Centrum výzkumu Řež nejrozsáhlejší spolupráci.

Díky skutečnosti, že se mezi lety 2012 a 2017 podařilo v Centru výzkumu Řež vybudovat v rámci projektu SUSEN (Sustainable Energy) v některých ohledech světově unikátní infrastrukturu za více než 2,5 miliardy korun, můžeme poskytovat provozovatelům a dodavatelům špičkové výzkumně-vývojové služby. Neocenitelnou výhodou je spojení výzkumného reaktoru LVR-15 s vybudovaným komplexem moderních horkých komor a špičkově vybavenými laboratořemi elektronové mikroskopie. Díky tomu může Centrum výzkumu Řež zajišťovat výzkum a vývoj v oblasti materiálů, počínaje jejich ozařováním přes mechanické testování v horkých komorách až po analýzy vlivu záření na mikrostrukturu materiálů, nejen kovových – Centrum výzkumu Řež patří mezi světovou špičku v oblasti studia vlivu záření na betonové struktury. Mezi další unikátní infrastruktury patří technologie LOCA (Loss of Coolant Accident), ve které je možné simulovat průběh celé LOCA havárie pro elek-



Technologie LOCA při přípravě na experiment

trány stávající generace i pro reaktory generace III a III+. Tato technologie je využívána dodavateli zařízení a komponent, které musí zajistit funkčnost i v podmínkách těžkých havárií pro jejich kvalifikace. Další technologií využívanou pro analýzy těžkých havárií patří Studený kelímek, což je zařízení, ve kterém lze za pomoci speciálního indukčního zařízení tavit směsi uranu s přísadami dalších materiálů, jako jsou materiály pokrytí paliva nebo vnitřních částí reaktoru i betonů biologického stínění, a určovat tak důležité fyzikální charakteristiky roztaveného koría, jako jsou například teploty tání a tuhnutí, hustota nebo viskozita. Silnou doménou Centra výzkumu Řež je i vývoj nových materiálů (především se zaměřením na pokrytí paliva nebo další materiály vystavené extrémním podmínkám), povrchových úprav pro jejich z odolňování a opravných technologií. S tím souvisí i vývoj pokročilých metod ne-destruktivního testování a manipulátorů a robotických systémů pro jejich aplikaci v těžko

dostupných podmínkách nebo pro optimalizaci (urychlení) realizovaných kontrol, což je z pohledu zkracování odstavek elektráren velmi aktuální téma. Centrum výzkumu Řež se dlouhodobě věnuje i nejaderným technologiím, jako jsou například vodík a akumulace. Naší doménou je především velkokapacitní akumulace energie. Konkrétně technologie Thermal Energy Storage, která na rozdíl od baterií, které jsou určeny pro akumulaci energie v řádu maximálně několika hodin, umožňuje akumulovat energii v řádech desítek nebo stovek megawattů po dobu několika hodin nebo dnů ve formě tepla uloženého do různých médií. Díky rozsáhlému know-how, které se Centru výzkumu Řež podařilo za posledních několik let získat, plánujeme výstavbu první demonstrační jednotky založené na akumulaci do roztavených dusičnanových solí. Podrobněji je o jednotlivých technologiích a řešených projektech a zakázkách pojednáno v článkách mých kolegů.



Experiment výlevu roztaveného koria na core catcher v rámci spolupráce s Mitsubishi Heavy Industries

Veolia, ZAT, ATEKO a další. Centrum výzkumu Řež v tomto nejúspěšnějším projektu v rámci celého programu vede největší aplikační segment Účinnost, spolehlivost, bezpečnost energetických celků a spolupracuje se zmíněnými průmyslovými partnery na řešení mnoha zajímavých témat. Velkou výhodou tohoto projektu je fakt, že jednotlivé dílčí projekty, které jsou v rámci Národního centra pro energetiku řešeny, byly iniciovány průmyslovými partnery a díky tomu se řeší jen témata, která jsou pro ně skutečně aktuální a zvyšují jejich konkurenceschopnost.

Mezi nejčastější formy spolupráce s průmyslem patří zakázky smluvního výzkumu, ale i spolupráce v rámci dotačních projektů, nejen tuzemských, ale i mezinárodních – Centrum výzkumu Řež aktuálně realizuje dvacet projektů finančně podporovaných z programů Horizon 2020 a Horizon Europe ve velkých a silných konsorciích předních zahraničních partnerů a dva z těchto projektů dokonce vede v pozici hlavního koordinátora. To činí Centrum výzkumu Řež jednou z nejúspěšnějších českých organizací z pohledu mezinárodní spolupráce a přináší mu to kontakt se světovou špičkou a přístup k nejnovějším poznatkům a know-how. Největší rozmach spolupráce s tuzemskými průmyslovými podniky přinesla Centru výzkumu Řež účast v projektu Národní centrum pro energetiku podpořenému z programu Národní centra kompetence Technologické agentury České republiky, v kterém spolupracuje více než dvacet předních českých hráčů na poli energetiky, jako jsou například ČEZ, Škoda Doosan Power,

Vedle spolupráce s tuzemskými průmyslovými podniky rozvíjí Centrum výzkumu Řež velmi intenzivní spolupráci i se zahraničními partnery. Nejrozsáhlejší zakázky a projekty řeší s japonskými partnery, mezi které patří například společnosti Hitachi nebo Mitsubishi Heavy Industries, v rámci kterých byly například vyvíjeny metody pro separaci paliva a troskek pod fukušimskými reaktory, analyzovány fyzikální vlastnosti roztaveného koria pro lepší určení stavu a rozložení těchto ma-



Ze spolupráce s Hitachi při vývoji metod separace troskek pod fukušimskými reaktory

teriálů po havárii nebo prováděny již zmíněné analýzy vlivu záření na betonové struktury s cílem jejich z odolňování a lepšího mapování stavu betonových konstrukcí na japonských jaderných elektrárnách. Zajímavá je spolupráce s partnery ze Spojených států amerických zaměřená také na analýzy stavu betonových struktur nebo spolupráce s francouzskou společností EDF v oblasti reaktorové a neutronové fyziky pro zpřesňování výpočetního aparátu používaného pro návrhy palivových vsázek jaderných reaktorů.

Vzhledem k tomu, že posláním Centra výzkumu Řež je především výzkum a vývoj a jako výzkumná organizace řeší ve velké míře dotační projekty, je spolupráce s průmyslovými partnery velmi důležitá. Umožňuje směřovat výzkum do oblastí, které jsou pro průmyslové partnery zásadní, mají pro ně přínos, a můžeme se tedy vyvarovat časté chyby výzkumných organizací, kterou je takzvaný „výzkum do šuplíku“.

Ing. Daneš Burket, Ph.D.



danes.burket@cvrez.cz

Po absolvování Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze v roce 1994 pracoval v Jaderné elektrárně Dukovany, kde prošel různými pozicemi až po vedoucího oddělení Reaktorová fyzika. V roce 2007 přešel na centrálu společnosti ČEZ, kde působil jako ředitel sekce Technická podpora a byl kromě jiného zodpovědný za zavádění programů řízení životnosti na jaderných i klasických elektrárnách a přípravu dokumentace pro prodloužení životnosti Jaderné elektrárny Dukovany. Od roku 2016 je ředitelem sekce Výzkum a vývoj v Centru výzkumu Řež. Daneš Burket získal titul Ph.D. v oboru jaderné inženýrství, působil ve vědecké radě Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze a dozorčí a vědecké radě Výzkumného a zkušebního ústavu Plzeň. Byl členem týmů WANO (World Association of Nuclear Operators) Peer Review v japonské společnosti TEPCO a jaderných elektrárnách Fukushima Daiichi a Kashiwazaki Kariwa a v čínské jaderné elektrárně Tianwan. Od roku 2010 je prezidentem České nukleární společnosti.

Partneři projektu Národní centrum pro energetiku |



SKUPINA ČEZ

DISTRIBUCE



Významné vědecko-výzkumné spolupráce se zahraničními partnery

Ing. Marek Mikloš, Ph.D.

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

66

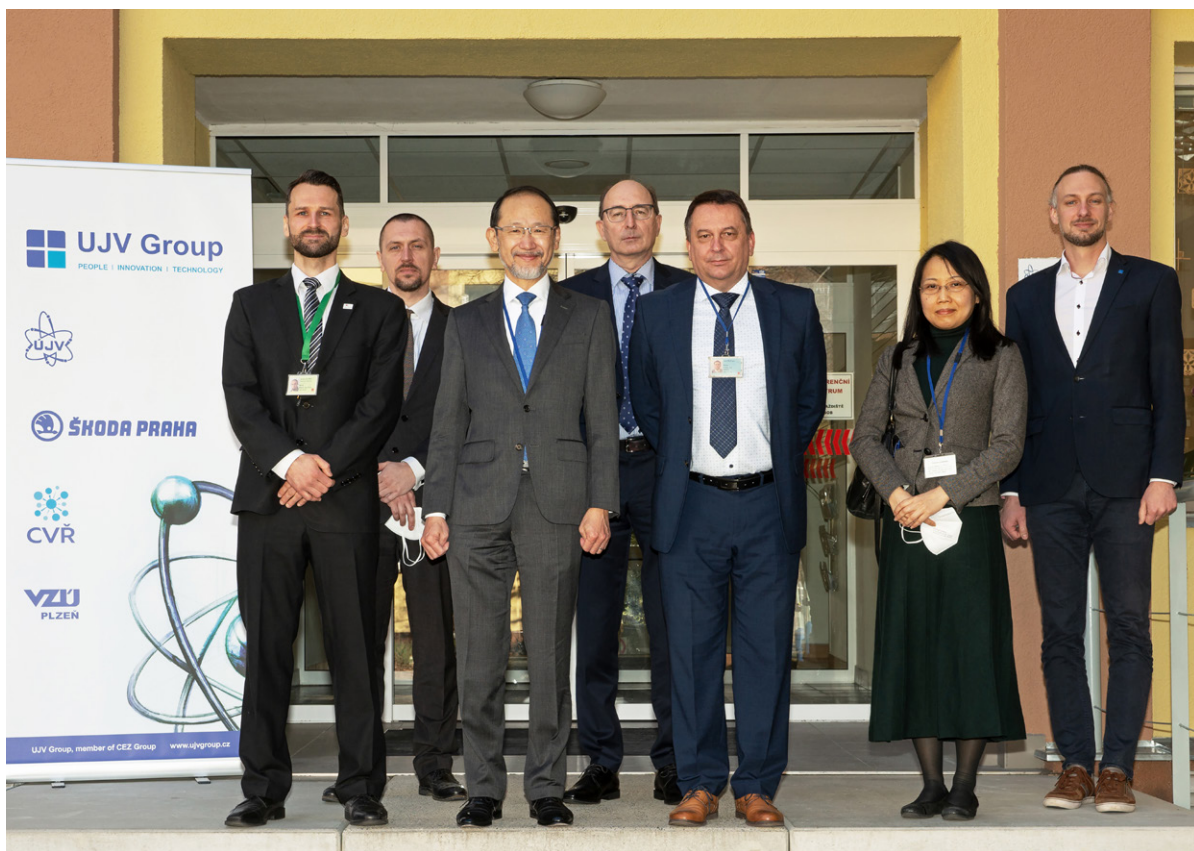
Tento článek popisuje dlouhodobou vědecko-výzkumnou spolupráci mezi Centrem výzkumu Řež a významnými partnery z celého světa v různých oblastech, jako např. studií radiační degradace betonových konstrukcí, studií chování roztaveného koria, studií věnovaných separačním procesům těkavých štěpných produktů z vyhořelého jaderného paliva nebo výzkumu a vývoji reaktorů s roztavenou solí. Také jsou krátce představeny nejdůležitější projekty pro studium paliv odolných vůči nehodám, tzv. Accident Tolerant Fuel.

This paper describes long term research collaboration between Research Centre Řež and important partners from all around the world in the areas of radiation degradation studies of concrete structures, corium behavioural studies, studies dedicated to separation processes of volatile fission products from spent nuclear fuels or research and development of Molten Salt Reactors. Also, most important projects for Accident Tolerant Fuel studies are shortly introduced.

ÚVOD

Sdílená historie s ÚJV Řež a zařazení do Skupiny ÚJV v kombinaci s výstavbou rozsáhlé vědecké infrastruktury SUSEN v letech 2012–2017 [1] umožnilo Centru výzkumu Řež rozvíjet spolupráci na mezinárodní úrovni a zapojit se do různých mezinárodních projektů, sdružení a konsorcií, které přináší společnosti důležité vědecko-výzkumné propojení s jadernou komunitou. Pro rozšíření spolupráce s japonskými partnery, navázalo vedení CVŘ v roce 2015 na historickou spolupráci mezi ÚJV Řež a společnostmi, jako jsou např. Hitachi-GE, JAEA nebo CRIEPI. V listopadu 2018 zorganizovalo CVŘ ve spolupráci s Velvyslanectvím České republiky v Tokiu česko-japon-

ský seminář, který byl primárně zaměřen na představení společnosti a oblastí výzkumu v jaderné energetice, s důrazem na ozařovací služby a poradiační hodnocení materiálů. Tato jednání přešla záhy do technických diskusí na společná výzkumná témata v oblasti jaderné energetiky [2]. V září 2021 zorganizovalo CVŘ ve spolupráci s Ministerstvem průmyslu a obchodu České republiky a JAIF International Cooperation Center online seminář Nuclear Energy in Japan and Czech Republic a již dnes se připravuje jeho hybridní pokračování v Praze na přelomu roku 2022/2023. Následující kapitoly popisují nejvýznamnější partnerství a bilaterální projekty CVŘ v různých oblastech jaderné energetiky.



Obř. 1: Jeho excelence Hideo Suzuki (třetı zleva), velvyslanec Japonska v České republice při oficiální návštěvě Centra výzkumu Řeř a UJV Řeř

RADIAČNÍ DEGRADACE BETONŮ

Spolupráce s partnery Kajima Corporation, Mitsubishi Research Institute a Nagoya University započala již v roce 2018 a od té doby CVŘ vybudovalo v České republice patřičné kompetence, včetně technologií (speciální ozařovací sondy pro ozařování na nízkých teplotách, možnosti XRD analýz apod.), vědecko-výzkumného týmu a vědecké národní spolupráce (Katedra betonových a zděných konstrukcí Fakulty stavební ČVUT), schopné provádět a publikovat tyto práce. Studie jsou zaměřeny primárně na podporu programu dlouhodobého provozu japonských jaderných elektráren [3].

Tato spolupráce byla v roce 2020 rozšířena o dalšího partnera, Oak Ridge National Laboratory (ORNL), kdy CVŘ využilo svých zkušeností z předchozích projektů [4] pro návrh,

výrobu a ověření speciální ozařovací sondy pro ozařování velkých betonových vzorků. Ozařování započalo již v roce 2020 a letos se jedná o dalším prodloužení až do roku 2023. Součástí spolupráce je i vývoj a aplikace metodiky vytahování ocelových výztuží z ozařovaného betonu v horkých komorách.

CHOVÁNÍ ROZTAVENÉHO KORIA V PODMÍNKÁCH TĚŽKÝCH HAVÁRIÍ

V roce 2017 CVŘ odstartovalo spolupráci s hlavními hráči, jako jsou Mitsubishi Heavy Industries, Japan Atomic Energy Agency (JAEA), JAEA Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS) a Tokyo Institute of Technology na podporu programu pro zvyšování bezpečnosti jaderných elektráren v Japonsku. Tyto projekty začaly využívat nově vybudovanou infrastrukturu [1], zejména laboratoř Stude-



Obr.2: Jeho excelence Alexis Duterre (druhý zleva), velvyslanec Francie v České republice při oficiální návštěvě Centra výzkumu Řež

ného kelímku a Centrum vysoce citlivých analytických přístrojů. V průběhu posledních pěti let se v CVŘ podařilo vyvinout nejenom metodiky pro měření teploty solidu a likvidu nebo viskozity roztaveného koria, ale také provádět experimenty pro studium interakce koria a ostatních materiálů, jako např. betonů nebo ocelí. Pro podporu dlouhodobé spolupráce v této oblasti podepsalo v roce 2018 CVŘ Memorandum of Understanding s Tokyo Institute of Technology.

MOŽNOSTI SEPARACE TĚKAVÝCH PRODUKTŮ ŠTĚPENÍ U VYHOŘELÉHO PALIVA

V roce 2016 byla podepsána první smlouva s japonskými partnery Marubeni Utilities a Hitachi-GE, pro experimentální ověření fluorační separace těkavých produktů štěpení z vyhořelého paliva [5], pro podporu programu vyřazování jaderných elektráren a zpracování radioaktivních odpadů. Cílem japonských partnerů bylo ověřit možnost

zpracování roztaveného koria z odstavené elektrárny Fukušima Daiči. Dnes vedení CVŘ projednává pokračování tohoto úspěšného programu.

VÝVOJ V OBLASTI MOLTEN SALT REACTORS

Spolupráce s ORNL v oblasti výzkumu Molten Salt Reactors (MSR) je blíže popsána v [6], ale již od počátku 90. let vedla k nespočetnému množství společných projektů, experimentálních i teoretických studií a publikací. Tato spolupráce stále přetrvává.

Úspěchy vědeckého týmu pod vedením Jana Uhlíře, který se dlouhodobě věnuje problematice MSR, se dostaly i do povědomí japonských expertů, a tak v roce 2020 začala vědecká spolupráce s Thorium Tech Solution a International Thorium Molten-Salt Forum v oblasti možného přepracování vyhořelého jaderného paliva z jaderné elektrárny Fukušima Daiči pro budoucí potřeby palivového cyklu MSR.

Reference:

- [1] <http://susen2020.cz/>
- [2] <https://www.japantimes.co.jp/country-report/2019/10/25/czech-republic-report-2019/contributing-valuable-research-japans-nuclear-industry/#.XbwFHVlKiUk>
- [3] Maruyama, I., Kontani, O., Takizawa, M., Sawada, S., Ishikawao, S. Development of soundness assessment procedure for concrete members affected by neutron and gamma-ray irradiation. Journal of Advanced Concrete Technology, 2017, 15 (9), strany 440-523
- [4] Hlaváč, Z.; Patera, J.; Halodová, P. Jak a proč se v Řeži zkouší beton?. Jaderná energie 2020, 66 (SI) , 106-111
- [5] Uhlíř, J., Mareček, M. Fluoride volatility method for reprocessing of LWR and FR fuels, January 2009, Journal of Fluorine Chemistry 130(1): 89-93
- [6] Uhlíř, J. Historie programu výzkumu a vývoje solných reaktorů v České republice, Jaderná energie 2020, 1 (1/4 2020), 18-24
- [7] Mikloš, M. Research Centre Řež activities within JHR consortium, Jaderná energie 2022, 3 (2/4 2022), 68-71
- [8] Hrehor, M. Participation of the Czech Republic in OECD/Nuclear Energy Agency activities, Jaderná energie 2022, 3 (2/4 2022), 42-46

STUDIUM INOVATIVNÍCH POKRYTÍ JADERNÝCH PALIV

Výše uvedené mezinárodní spolupráce jsou ukázkou portfolia vědecko-výzkumných prací, do kterých je CVŘ zapojeno. Jednou z kritických oblastí studia, kterým se CVŘ také věnuje, jsou i experimentální činnosti zaměřené na podporu vývoje pokrytí tzv. Accident Tolerant Fuel (ATF). Studium těchto materiálů je podpořeno mimo jiné i působením vědeckých pracovníků v konsorciu JHR [7], kde CVŘ vede pracovní skupinu pro jaderné palivo a připravuje nebo řeší projekty s renomovanými partnery, jako jsou EDF, CEA, NNL, VTT, Fortum, Framatome, TechnicAtome nebo Ciemat.

Jedním z takových projektů je projekt INCA (In-pile Creep Studies of ATF Claddings), který byl podpořen jako jeden z prvních experimentálních programů Frameworku FIDES [8]. Hlavními partnery projektu jsou CVŘ, ÚJV Řež, Alvel, CEA a VTT a na plnění se podílí i Westinghouse Sweden. CVŘ pro tento projekt vyvinulo speciální ozařovací sondu, umožňující studium radiačního creepu a radiačního růstu pokrytí současných i budoucích jaderných paliv. Tento úspěch vedl k otevření nových diskusí CVŘ s předními dodavateli jaderného paliva.

INCA
In-pile Creep Studies of ATF claddings

SLOVO ZÁVĚREM

Jak jsem zmínil v úvodu tohoto příspěvku, Centrum výzkumu Řež je z dlouhodobého hlediska mladá společnost. Tato společnost ale dokázala využít historický potenciál Skupiny ÚJV k vytvoření experimentálního a vědecko-technického portfolia, a tím si zajistit dlouhodobě přední pozice v oblasti studia materiálů v jaderné energetice na mezinárodní úrovni.

Ing. Marek Mikloš, Ph.D.

marek.miklos@cvrez.cz



Marek Mikloš ukončil své Ph.D. studium v roce 2008 na Slovenské technické univerzitě v Bratislavě v oblasti Jaderné energetiky se zaměřením na zjišťování příčin vzniku netěsností jaderného paliva za provozu. Poté nastoupil do Ústavu jaderného výzkumu Řež, kde jako vědecký pracovník pokračoval ve výzkumu pokrytí jaderného paliva. V letech 2013–2017 byl součástí výstavbového a vývojového týmu v rámci projektu SUSEN (Sustainable Energy), zaměřeného na výstavbu rozsáhlé výzkumné infrastruktury. V současnosti pracuje v Centru výzkumu Řež jako manažer pro rozvoj podnikání, zde rozvíjí spolupráci převážně se zahraničními partnery z Japonska a USA.

Projekt LEU-FOREVER vývoj alternativního paliva pro reaktor LVR-15

**Ing. Michaela Žabčíková¹, Ing. Miroslav Hrehor^{2,3},
Ing. Vincenzo Romanello, Ph.D.^{2,3}, Ing. Miloš Kyněl³,**

¹Elektrárna Dukovany II, a. s.

²Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.

³Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Jednou z největších výzev pro současné evropské výzkumné reaktory je udržitelnost jejich provozu a s tím související potřeba zajištění dodávek jaderného paliva. Na tuto problematiku reagovala Evropská komise v roce 2016 zařazením palivově orientovaného tématu do svého výzkumného programu. Český výzkumný reaktor LVR-15 ležící kousek od Prahy je jedním z potenciálně ohrožených reaktorů. Z tohoto důvodu Centrum výzkumu Řež navázalo spolupráci se zahraničními V&V institucemi a podílelo se na vývoji nového paliva.

One of the greatest challenges for current European research reactors is the sustainability of the operation and the related needs to secure nuclear fuel supplies. The European Commission responded to this issue in 2016 by including a fuel-oriented topic in its research programme. The Czech's research reactor LVR-15, which is located near Prague, is one of the concerned reactors. Due to this, Research Centre Řež established cooperation with foreign R&D institutions and participated in the development of the new nuclear fuel.

Problematika dodávek jaderného paliva se vztahuje především na dvě skupiny výzkumných reaktorů:

- na tzv. vysoce výkonné výzkumné reaktory (HPRR), jako je např. reaktor BR2 v Belgickém jaderném výzkumném centru (SCK-CEN), reaktor RHF v Institutu Laue-Langevin v Grenoblu (Francie), reaktor FRM II na půdě Technické univerzity v Mnichově (Německo) a také na rozestavěný výzkumný reaktor JHR v Cadarache (Francie)
- výzkumné reaktory středních výkonů (MPRR), pro které je charakteristický jejich originální sovětský design, a které jsou i v současnosti závislé na monopol-

ním dodavateli paliva od ruského výrobce TVEL: patří mezi ně reaktor LVR-15 v Centru výzkumu Řež, reaktor MARIA ve Swierku v Polsku, reaktor BRR v ústavu MTA v Budapešti, aj.

Evropská komise s vědomím důležitosti udržení provozu výzkumných reaktorů v EU a rizik, kterým tyto reaktory čelí, zařadila v roce 2016 do svého výzkumného programu H2020 EURATOM pro léta 2016–2017 téma NFRP 11: EU podpora zajištění dodávek jaderného paliva pro výzkumné reaktory. Klíčovým motivem tohoto výzkumného záměru bylo posílení bezpečnosti dodávek

lékařských radioizotopů, jako je Molybden-99, a dostupnost odpovídající kapacity neutronového ozáření v EU pro testování materiálů a dalších aplikací.

V reakci na tuto výzvu provozovatelé čtyř západoevropských výzkumných reaktorů, jež jsou sdruženi ve skupině HERACLES, společně s francouzským Komisaríátem pro jadernou energii (CEA), francouzskou společností AREVA (dnes rozdělenou na Framatome a Technicatome) a Centrem výzkumu Řež připravili návrh projektu LEU – FOREVER (Fuel FOR REsearch Reactors), který obsahoval tři strategické cíle:

- zajištění pokroku ve vývoji paliva na bázi molybdenu (UMO).
- ověření možnosti alternativního paliva na bázi U_3Si_2 s vyšší hustotou uranu, tzv. „high-loaded U_3Si_2 “.
- kvalifikovat evropského dodavatele paliva pro evropské MPRR závislé na palivu TVEL.

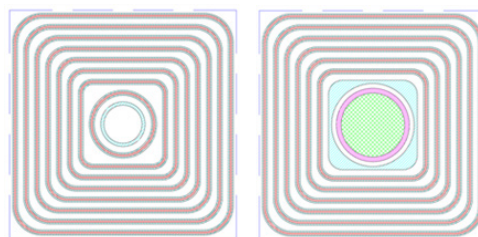
Projekt byl schválen a zahájen v říjnu 2017. Jeho řešení má dva základní směry:

- pro reaktory HPRR je to vývoj paliva UMO (dispersní nebo monolitický typ) a jako alternativu high-loaded U_3Si_2 ,
- pro reaktory MPRR je to vývoj, výroba a ověření v provozu deskového paliva na bázi standardního, kvalifikovaného U_3Si_2 ($4,8 \text{ g U/cm}^3$).

Vývoj pokročilých paliv pro výzkumné reaktory HPRR souvisí s nutností snížení obohacení paliva v rámci všeobecného mezinárodního úsilí o nešíření jaderných zbraní. Záměrem tohoto společného celosvětového projektu je odstranit palivo z vysoce obohaceného uranu (HEU) z civilního jaderného palivového cyklu a nahradit jej novými jadernými palivy s nízko-oboženým uranem (LEU), tj. $^{235}\text{U}/\text{U}$ pod 20 %. Přímé použití paliv LEU v reaktorech HPRR na bázi současných standardních, kvalifikovaných desek U_3Si_2 s náplní uranu $4,8 \text{ g U/cm}^3$ při obohacení <20 % není bohužel možné, neboť toto palivo neumožňuje udržovat vysoký výkon těchto reaktorů s dostupnými a kvalifikovanými konfiguracemi aktivních zón.

Reaktory MPRR s původním sovětským designem používají palivo vyrobené ruskou společností TVEL. Tato paliva mají obvykle zvláštní, tj. nezaměnitelnou konstrukci koncentrických trubek čtvercového průřezu (viz Obr. 1), která v současné době vytváří monopolní postavení výrobní společnosti TVEL se všemi možnými důsledky takového postavení jako je cena paliva, podmínky dodavatele a stejně tak nejistota, resp. nezaručenost jeho dodávek z dlouhodobého hlediska. Projekt FOREVER si klade za cíl vyvinout evropskou alternativu k aktuálně používaným typům paliv. Pro ověření vývoje a kvalifikaci nového paliva na bázi standardních desek U_3Si_2 byl v projektu zvolen výzkumný reaktor LVR-15, protože je reprezentativní pro několik dalších MPRR v Evropě a má velmi dobrou provozní historii. Nedílnou součástí projektu FOREVER je experiment „4EVERTEST“, tedy ozáření prototypové deskové palivové kazety U_3Si_2 v reaktoru LVR-15.

Reaktor LVR-15 je bazénovým typem, chlazen a moderován lehkou vodou. Jeho maximální tepelný výkon je 10 MW. Reaktor je provozován s ruskými palivovými soubory IRT-4M, jejichž obohacení činí 19,7 %. Konstrukce je realizována z hliníkové slitiny, samotné palivo je ve formě disperze UO_2 v hliníkové matici a s hliníkovým pokrytím. V reaktoru se používá osmitrubková verze jako standardní palivový soubor a šestitrubková verze, která slouží pro aplikaci řídicích tyčí a ozařovacích sond. Pro ilustraci je přibližná geometrie palivového souboru uvedena v řezu na následujícím obr. 1. Palivový soubor je symetrický v rámci dvou rovin, což je nesmírně přínosné pro celou aktivní zónu a zjednodušuje tak návrh konkrétní palivové vsázky.



■ | Obr. 1: Geometrie palivového souboru IRT-4M |



Obr. 2: Prototypová kazeta FPFA |

Mezi konkrétní úkoly pro Centrum výzkumu Řež v rámci projektu FOREVER patřil sběr informací spojený s dosavadním provozem reaktoru. Jednalo se především o data související s požadavky na aktivní zónu pro zachování fyzikálních parametrů, chladicím systémem a provozními požadavky. Paralelně s tím se CVŘ podílelo i na samotném návrhu prototypového palivového souboru, a to ve spolupráci s výrobcem Framatome – CERCA a organizací TechnicAtome, která je hlavním projektantem paliva. CVŘ na sebe vzalo odpovědnost za provedení licenčního řízení a za získání souhlasu SÚJB s provedením ozařovacího experimentu s prototypovou palivovou kazetou. S tímto procesem byla spojena řada termo-hydraulických a neutronových výpočtů dokazujících bezpečnost daného testu. Pro tyto účely byl také plánován a proveden hydraulický test makety palivového souboru, která je identická s prototypovou kazetou.

Geometrie navrhovaného palivového souboru vychází z typu paliva, se kterým má společnost CERCA dlouholeté výrobní zkušenosti. Jedná se o deskový typ paliva, v němž je zachována geometrie horní a spodní koncovky z paliva IRT-4M. Tyto koncovky musely být zachovány vzhledem ke geometrii nosné desky aktivní zóny a technologii manipulačního přístroje. Desky jsou zajištěny ve svých polohách pomocí dvou postranních nosných desek. Rozměr palivových desek a jejich celkový počet odpovídá požadovaným hydraulickým a neutronovým vlastnostem. Formou paliva je disperze U_3Si_2 v hliníkové matici, pokrytí palivových desek je stejně jako zbytek konstrukce paliva navrženo z hliníkové slitiny. Prototypová kazeta je dokumentována na Obr. 2.

Pro projekční výpočty byla využita řada neutronových a termo-hydraulických kódů. Mezi ně patří například francouzský kód CATHARE. Aplikován byl ze strany TechnicAtome pro stanovení parametrů, jako je maximální výkon, či hydraulická charakteristika paliva, které by odpovídaly zóně sestavené čistě z palivových souborů CERCA. Ze strany CVŘ byl využit finský kód SERPENT a kód NODER, který byl vyvinut v CVŘ pro neutronové výpočty aktivní zóny reaktoru LVR-15. V tomto projektu byly oba kódy použity pro simulaci aktivní zóny osazené palivovými soubory IRT-4M a jedním palivovým souborem CERCA, tedy pro konfiguraci ozařovacího experimentu. Pro termo-hydraulické výpočty byl pro stejnou konfiguraci využit americký kód RELAP 5. Aplikován byl i CFD kód Ansys Fluent, a to pro hydraulickou analýzu navrženého prototypového souboru, tvorbu axiálního profilu tlakové ztráty i pro porovnání charakteristik s IRT-4M. Výsledky těchto analýz představovaly klíčové vstupy pro tvorbu bezpečnostní zprávy, která byla připravována pro SÚJB za účelem získání souhlasu s provedením ozařovacího experimentu prototypové kazety v reaktoru LVR-15.

Vlastní bezpečnostní rozbory v rámci přípravy dodatku bezpečnostní zprávy reaktoru LVR-15 zahrnovaly analýzy vybraných havarijních scénářů s využitím kódu RELAP 5. S ohledem na zvolený konzervativní přístup byl pro analýzy zvolen výkon reaktoru 10 MW_t (místo 9,7), průtok vody byl nastaven na $1 \text{ 350 m}^3/\text{h}$ (místo nominálních $1 \text{ 500 m}^3/\text{h}$). Konzervativně byl rovněž zvolen maximální výkon kazety, který byl historicky dosažen během všech kampaní s kazetami IRT-4M: pro 8trubkovou

kazetu to bylo 565,10 kW a pro 6trubkovou 514,24 kW; pro prototypovou kazetu FPFA byl použit maximální výkon 506,74 kW.

Postulované iniciační události, které byly brány do úvahy, zahrnovaly různé scénáře, jako jsou havárie iniciované reaktivitou (RIA), ztráta vnějšího elektrického napájení (LOOP) a ztráta průtoku (LOFA). Analyzované události byly rozděleny do 4 kategorií:

- kategorie I: normální provoz a přechodné provozní jevy,
- kategorie II: abnormální provoz, vysokofrekvenční události,
- kategorie III: projektové havárie (DBA) se střední až nízkou četností výskytu,
- kategorie IV: projektové rozšířené podmínky (DEC A), havárie bez vážného selhání paliva s velmi nízkou četností.

Pro účely tohoto článku je v další části ilustrativně prezentován jeden scénář pro kategorii II, III a IV. V následujících grafech začíná iniciační událost po prvních 5 sekundách.

A. ZTRÁTA PRACOVNÍCH ZDROJŮ ELEKTRICKÉHO NAPÁJENÍ - PORUCHA NÁBĚHU HCČ Č. 1

Je analyzována událost ztráty vnějších zdrojů elektrického napájení, která vede k vypnutí elektromotorů tří pracujících hlavních cirkulačních čerpadel. Havarijní čerpadlo (HCČ č. 6) napájené ze systému zajištěného napájení pracuje normálně. HCČ č. 1 nenaběhne. Dojde k zásahu havarijní ochrany reaktoru. Předpokládá se, že dojde k vypnutí elektromotorů čerpadel zajišťujících nucenou cirkulaci chladiva v sekundárním okruhu. Specifické kritérium přijatelnosti pro kategorii II je, že povrchový var v aktivní zóně reaktoru není přípustný. To znamená, že maximální teplota vnějšího povrchu paliva musí být nižší než 98 °C (aktivní zóna je pod vodním sloupcem o výšce 4 m a teplota varu je přibližně 109 °C), tj. poměr ONBR (Onset of Nucleate Boiling Ratio) musí být vyšší než 1,3.

Iniciační událost je v programu RELAP-5 modelována vypnutím elektromotorů HCČ 1, 2 a 3, zatímco HCČ 6 pracuje normálně dál. Současně s výpadkem HCČ se spustí signál

pro odstavení reaktoru. Modeluje se zpoždění začátku pádu havarijních tyčí 1,2 s a doba pádu 0,8 s. Výpadek čerpadel sekundárního chladiva je modelován současně s poruchou selhání HCČ. Průtok sekundárního chladiva na vstupu obou výměníků klesne na nulu během 1 s. Hlavní výsledky této simulace jsou shrnuty na Obr. 3 a 4.

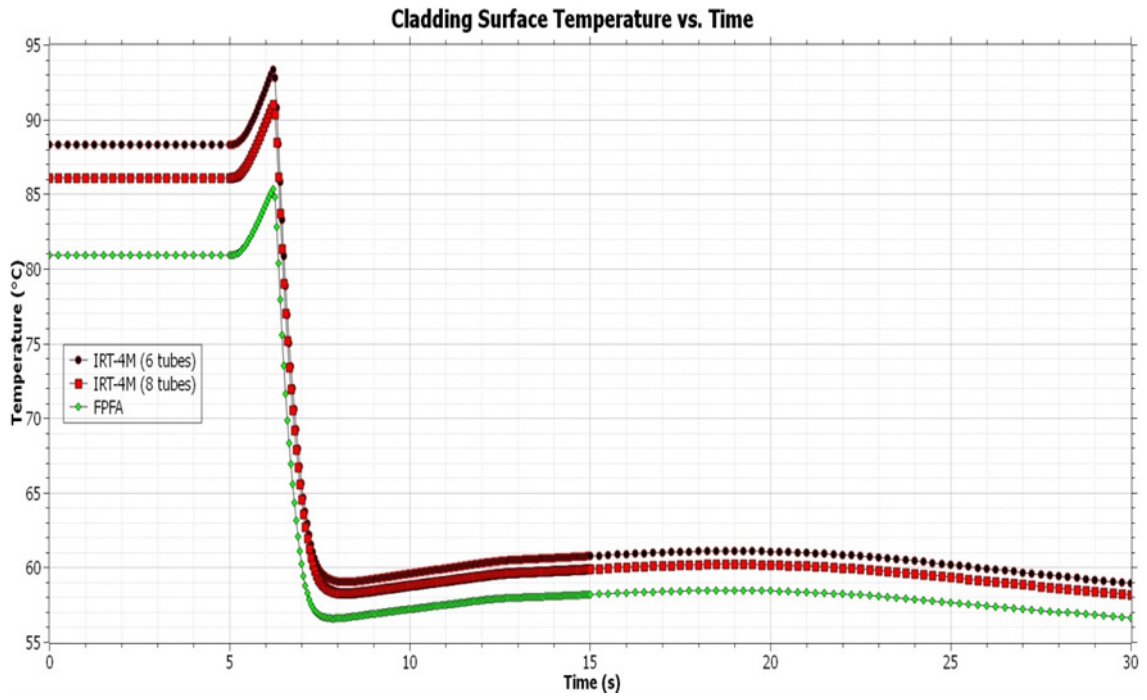
B. NEKONTROLOVANÉ VYTAHOVÁNÍ ABSORPČNÍ TYČE SE ZÁSAHEM HAVARIJNÍ OCHRANY - VNOS REAKTIVITY 2.8 β / 30 s

Je analyzována událost nekontrolovaného vytahování absorpční tyče při provozu reaktoru na výkonu. Operátor tlačítkem na pultu vydá pokyn k vytahování regulační tyče nahoru a ta se bude pohybovat nahoru i po zrušení povelu operátora až do horní krajní polohy. Předpokládá se, že k samovolnému vytahování dojde pouze u jedné regulační tyče, protože současný pohyb dvou regulačních tyčí nahoru je blokováno. Regulační tyč může vnést maximálně 2.8 β. Při rychlosti 20 mm/s (maximální rychlost) a při 60 cm délce aktivní zóny vnese reaktivitu 2.8 β / 30 s. Dojde k zásahu havarijní ochrany reaktoru.

Pro danou událost kategorie III se uplatňuje specifické kritérium přijatelnosti SK2: U událostí kategorie III nesmí být teplota pokrytí palivových elementů větší než 500 °C. Průtok chladiva v primárním okruhu nutný pro chlazení aktivní zóny a odvod zbytkového tepla je zajišťován nucenou cirkulací, v provozu jsou HCČ č. 1-3 a HČ (HCČ č. 6). Hlavní výsledky této simulace jsou shrnuty na Obr. 5 a 6.

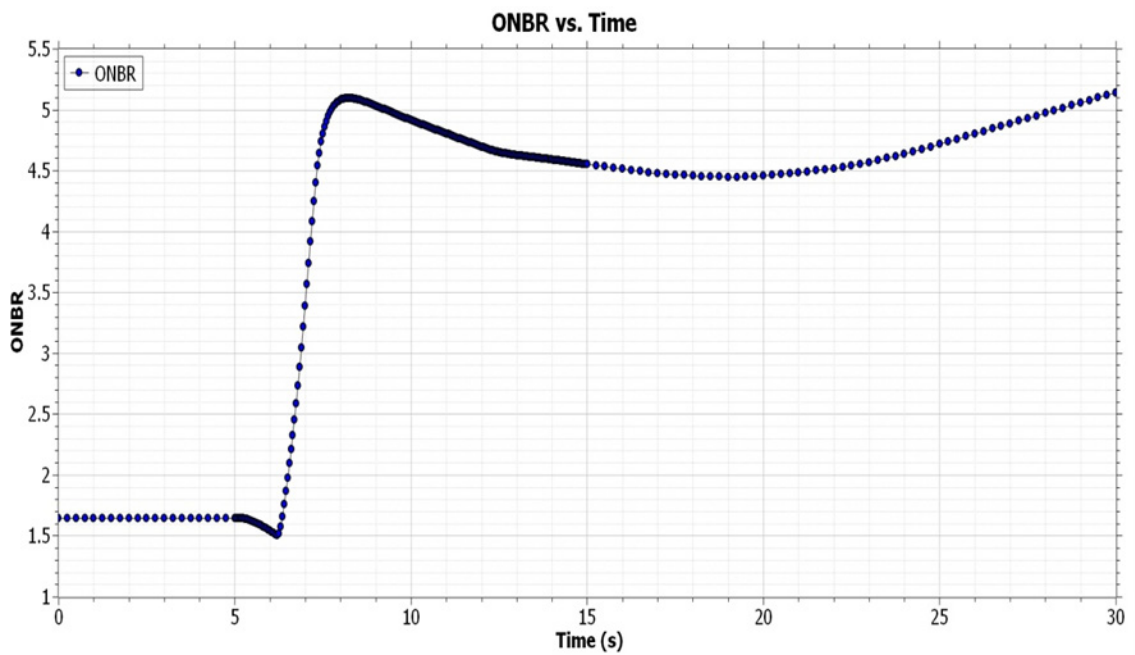
C. ZTRÁTA PRACOVNÍCH ZDROJŮ ELEKTRICKÉHO NAPÁJENÍ - PORUCHA NÁBĚHU HCČ Č. 1 A PORUCHA HČ

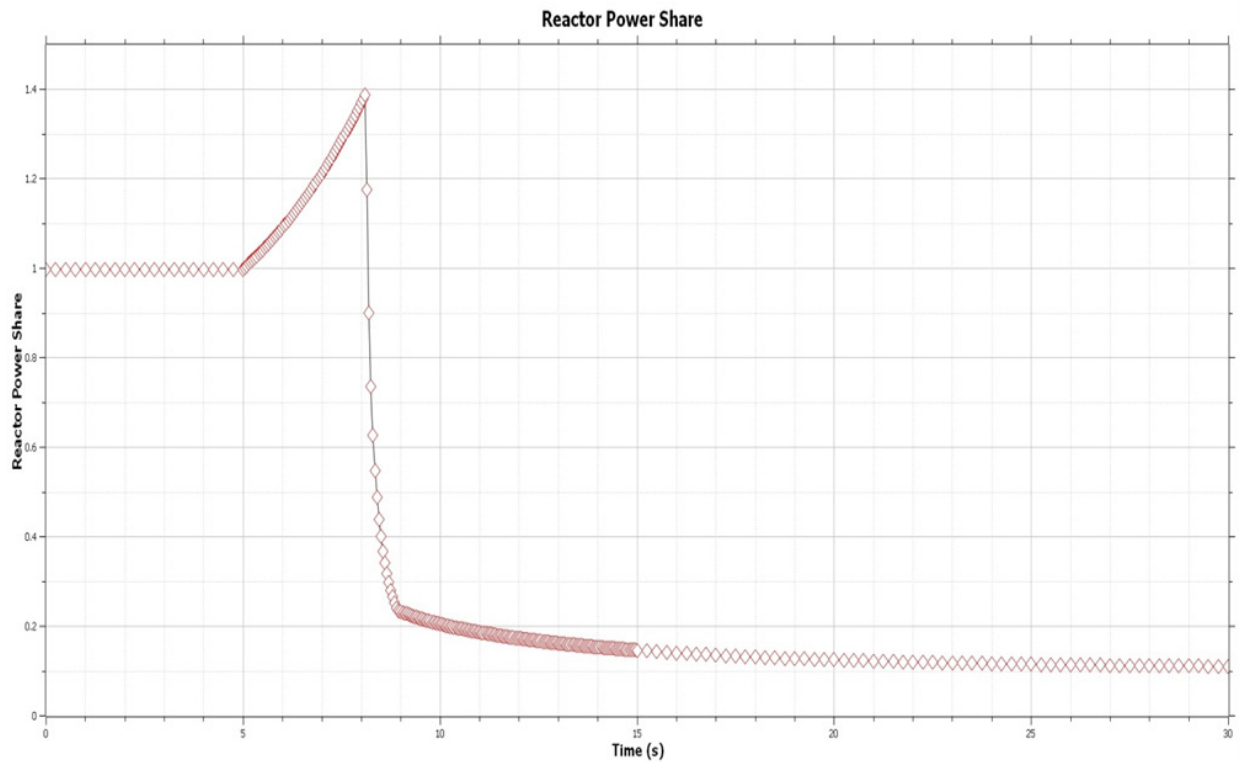
Je analyzována událost ztráty vnějších zdrojů elektrického napájení, která vede k vypnutí elektromotorů tří pracujících hlavních cirkulačních čerpadel. Zároveň vypadáva havarijní čerpadlo (HCČ č. 6). Dojde k zásahu havarijní ochrany reaktoru. Předpokládá se, že dojde k vypnutí elektromotorů čerpadel zajišťujících nucenou cirkulaci chladiva v sekundárním okruhu.



Obr. 3: Ztráta pracovních zdrojů elektrického napájení – Porucha náběhu HCČ č. 1: Palivové elementy IRT-4M a FPFA LTA: Maximální teplota na povrchu

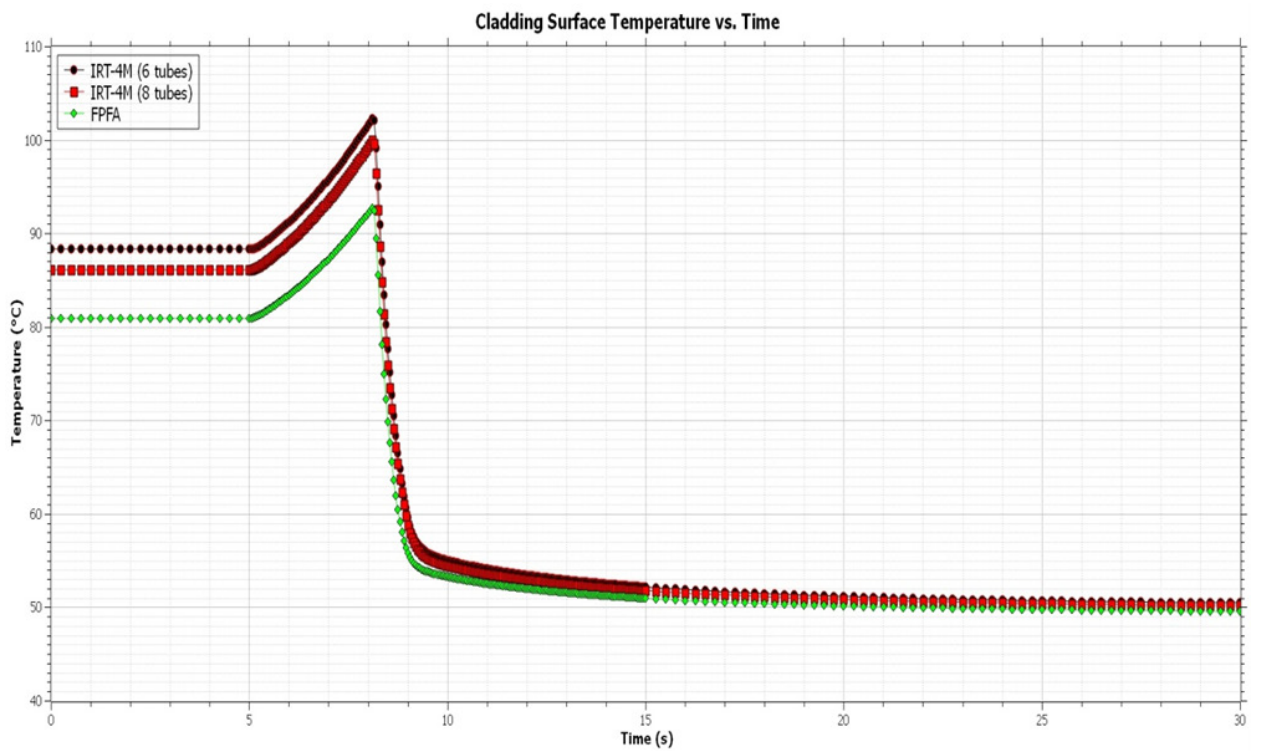
Obr. 4: Ztráta pracovních zdrojů elektrického napájení – Porucha náběhu HCČ č. 1: Palivové trubky IRT-4M-8t: Minimální rezerva do vzniku povrchového varu



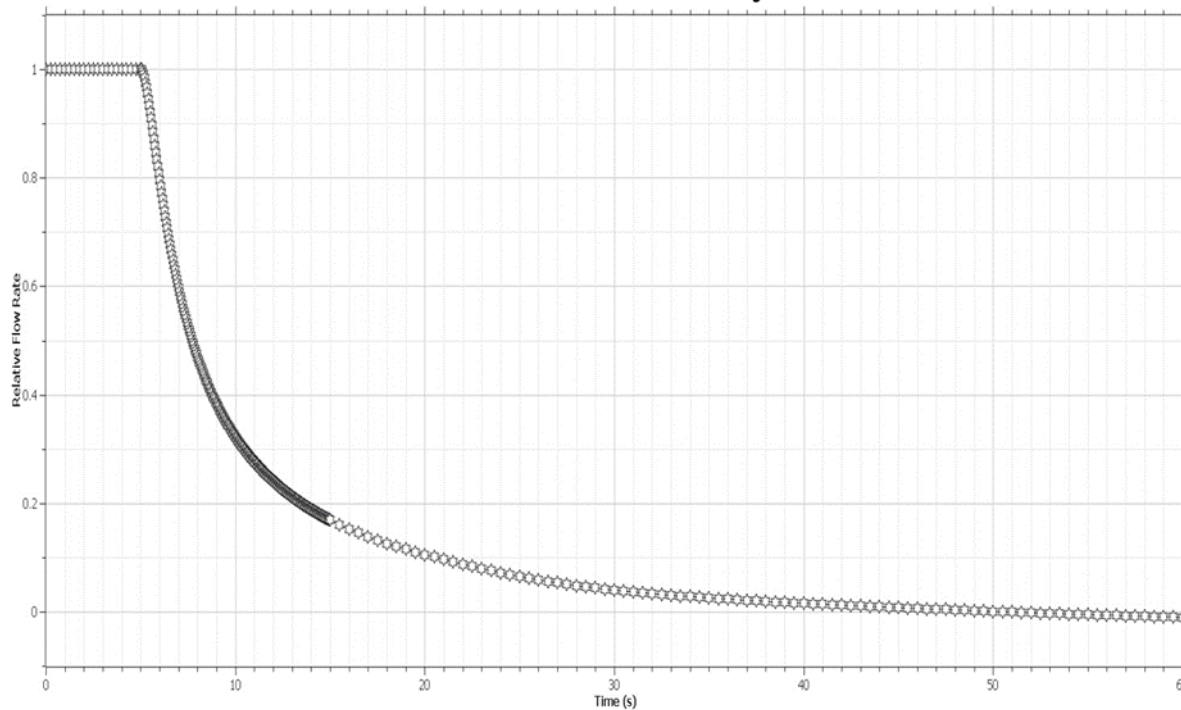


Obr. 5: Nekontrolované vytahování absorpční tyče se zásahem havarijní ochrany - vnos reaktivity 2.8β / 30 s: Celkový poměrný výkon reaktoru

Obr. 6: Nekontrolované vytahování absorpční tyče se zásahem havarijní ochrany - vnos reaktivity 2.8β / 30 s: Palivové elementy IRT-4M a FPFA LTA: Maximální teplota na povrchu



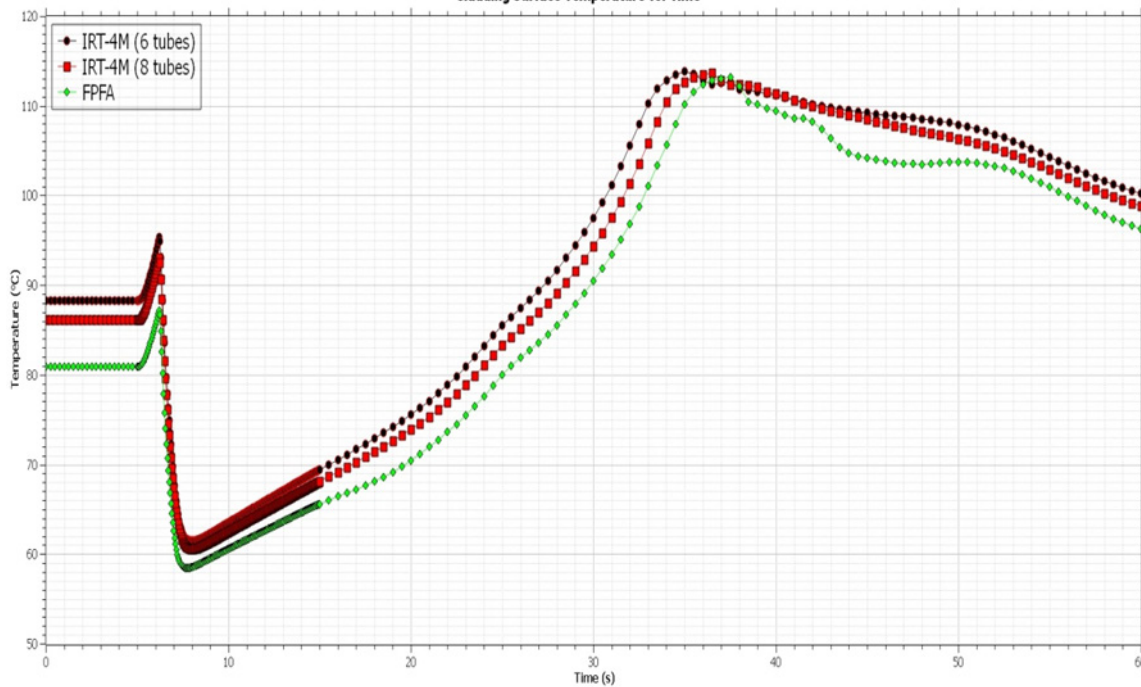
Total Relative Flow Rate of the Coolant in Discharge Lines

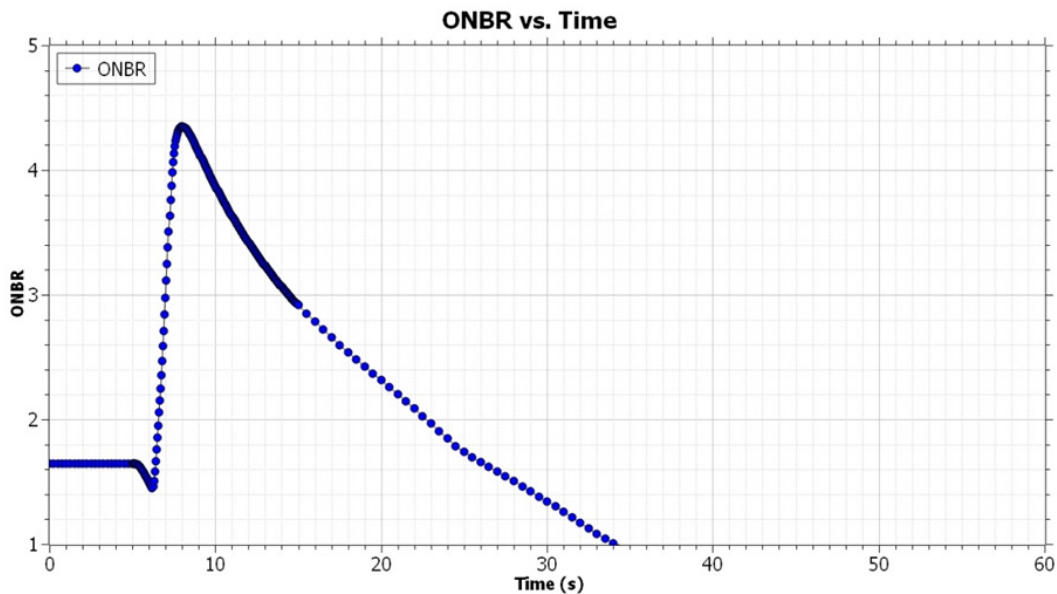


Obr. 7: Ztráta pracovních zdrojů elektrického napájení – Porucha náběhu HCČ č. 1 a porucha HC: Celkový poměrný průtok chladiva ve výtlačných větvích primárního okruhu

Obr. 8: Ztráta pracovních zdrojů elektrického napájení – Porucha náběhu HCČ č. 1 a porucha HC: Palivové elementy IRT-4M a FPFA LTA: Maximální teplota na povrchu

Cladding Surface Temperature vs. Time





Obr. 9: Ztráta pracovních zdrojů elektrického napájení – Porucha náběhu HCČ č. 1 a porucha HC: Palivové trubky IRT-4M-8t: Minimální rezerva do vzniku povrchového varu

Pro danou událost kategorie IV se uplatňuje specifické kritérium přijatelnosti SK2: U událostí kategorie IV nesmí být teplota pokrytí palivových elementů větší než 500 °C. Průtok chladiva v primárním okruhu nutný pro chlazení aktivní zóny a odvod zbytkového tepla je zajišťován přirozenou cirkulací. Hlavní výsledky této simulace jsou shrnuty na Obr. 7 až 9.

ZÁVĚR

Navržená prototypová kazeta FPFA byla vyrobena ve výrobním závodě Framatome – CERCA v rámci projektu LEU-FOREVER a poté převezena do CVŘ. Souhlas SÚJB s provedením ozařovacího experimentu v reaktoru LVR-15 byl získán koncem roku 2021.

Kazeta byla zavezena do reaktoru počátkem března 2022. Její stav v aktivní zóně reaktoru je kontrolován jednak průběžným sledováním parametrů chladiva, jednak vizuální kontrolou pomocí kamer v průběhu odstávek reaktoru. Chování kazety dosud nevykazuje žádné anomálie. Závěrečným krokem projektu bude základní kontrola kazety po ozaření koncem září 2022.

Cíl projektu – vytvoření evropské alternativy pro výrobu paliva pro výzkumné reaktory středního výkonu – je tak naplněn. Centrum výzkumu Řež a autoři děkují Evropské komisi a programu Euratomu za finanční podporu projektu LEU-FOREVER. Presentovaná práce byla rovněž realizována v rámci Institucionální podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR.

Ing. Michaela Žabčíková



michaela.zabcikova@cez.cz

Na projektu FOREVER se podílela během svého magisterského studia na Ústavu energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze se zaměřením na Jaderná energetická zařízení. Po úspěšném ukončení studia v roce 2020 nastoupila do společnosti Elektrárna Dukovany II, která je vyčleněna ze společnosti ČEZ pro účel výstavby Nového jaderného zdroje v Dukovanech. Zde zastává pozici strojního inženýra se zaměřením na technologie primárního okruhu.

Z knihy „Vznik a historie státního dozoru nad jadernou bezpečností“

10. část

Ze vzpomínek Zdeňka Kříže

Tak jak se vyvíjely od poloviny padesátých let jaderné technologie, vyvíjel se i názor na bezpečnost a zejména pravidla v tomto novém odvětví. Prvotní linie byla zaměřena především na nešíření jaderných zbraní, vznikla Mezinárodní atomová agentura (MAAE), ale začínaly se formovat i národní dozory. V Československu vznikla Československá atomová komise (ČSKAE) a skupinka jaderných inženýrů kolem Ing. Jiřího Beránka a Ing. Zdeňka Kříže začala formulovat první pravidla jaderné bezpečnosti.

O počátcích jaderného dozoru v Československu poutavě píše Ing. Zdeněk Kříž, z jehož knihy „Vznik a historie státního dozoru nad jadernou bezpečností Československé komise pro atomovou energii (1970–1992)“ vám přinášíme některé vzpomínky na začátky tohoto mladého, ale dynamicky se rozvíjejícího odvětví.

PŘÍPRAVA A VYDÁNÍ ZÁKONA Č. 28/1984 SB., O STÁTNÍM DOZORU NAD JADERNOU BEZPEČNOSTÍ JADERNÝCH ZAŘÍZENÍ (ČÁST III.)

Paragraf 9 zavedl kontrolní (inspekční) činnost dozoru a stanovil, že

„tuto činnost provádějí inspektoři jaderné bezpečnosti, které řídí hlavní inspektor. Hlavní inspektor je jmenován předsedou ČSKAE a je jeho náměstkem. Inspektoři musí mít vysokoškolské vzdělání a přiměřenou praxi v oboru.“ Fakt, že inspektoři jaderné bezpečnosti byli v zákoně explicitně zmíněni, podstatně zvýšil jejich prestiž a respekt. Pozice dozoru se vydáním zákona v rámci ČSKAE posílila, neboť se stal úsekem ČSKAE (úsek hlavního inspektora – ÚHI) a hlavní inspektor J. Beránek náměstkem předsedy ČSKAE. Tento paragraf zákona nahradil usnesení PV č. 195/1977 Sb., které oblast kontrol řešilo usnesením předsednictva vlády.

Paragraf 10 řeší oprávnění inspektorů jaderné bezpečnosti. Podle tohoto paragrafu byli inspektoři oprávněni

- a) uložit oprávněné organizaci zpracovat opatření k odstranění zjištěných nedostatků*
- b) v případě odchylek od schválených Limitů a podmínek, které bezprostředně ohrožují jadernou bezpečnost, zpracovat bezodkladně nezbytná opatření*
- c) uložit provedení kontrol, revizí a zkoušek zařízení JE, pokud to inspektor považuje za nezbytné*
- d) ověřovat zvláštní odbornou způsobilost vybraných pracovníků, zejména Limitů a podmínek v případě závažných neznalostí*
- e) odebrat oprávnění k činnosti a předat je k vyřízení tomu, kdo oprávnění vydal*
- f) vstupovat do objektů, kde se jaderná zařízení nebo jejich části navrhuji, projektují, vyrábějí, staví, uvádějí do provozu, provozují, opravují, rekonstruují a vyřazují z provozu, a vyžadovat potřebné doklady a informace*

Z uvedeného je patrné, že inspektoři jaderné bezpečnosti dostali silné pravomoci a odpovědnost. Inspektory jaderné bezpečnosti byli nejen inspektoři na lokalitách, ale i pracovníci centra v Praze. Noví inspektoři se museli seznámit s platnou legislativou, bezpečnostní dokumentací a účastnit se několika

inspekci jako pozorovatelé (nyní se používá „české“ slovo trainee). Na základě úspěšného složení inspektorské zkoušky jim byl vydán průkaz inspektora jaderné bezpečnosti ČSKAE. Skupina mladých pracovníků vedená Vladimírem Vanclem a Květou Pamánkovou v té době zpracovala iniciativně na základě zahraničních materiálů interní návod pro chování inspektorů z hlediska komunikace a psychologie. Noví inspektori totiž zjistili, že tato oblast je při provádění inspekci důležitá. Udělení silné pravomoci i odpovědnosti se ukázalo jako správná volba a inspektori díky tomu rychle rostli a získávali u odpovědné organizace potřebný respekt, a to nejen díky dikci zákona, ale i jejich odborné kvalifikaci, důslednému vyžadování plnění zákona a podpoře centra v Praze.

Paragraf 11 stanovil, že „inspektori kontrolují dodržování požadavků (stanovených v předpisech) a podmínek (stanovených v rozhodnutích dozoru), aktuální stav jaderného zařízení, dodržování limitů a podmínek a vybraných provozních předpisů a dále připravenost jaderného zařízení k různým etapám spouštění a opatření k zajištění jaderné bezpečnosti při provádění změn“.

Tento paragraf ukazuje, že inspektori mohli kontrolovat prakticky vše, co jadernou bezpečnost ovlivňuje nebo s ní souvisí.

Paragraf 12 stanovil „povinnost pro inspektora zpracovávat protokol o provedené kontrole a projednat jej s vedoucím odpovědné organizace“.

V případě závažných zjištění a naléhavosti jejich nápravy informoval inspektor neprodleně hlavního inspektora. Povinnost inspektora zpracovat protokol a projednat ho s vedoucím odpovědné organizace formou podpisu se ukázala jako náročná nejen z hlediska věcného obsahu, ale i z hlediska toho, že odpovědná organizace tím potvrzuje, že s nálezy inspektora souhlasí, v opačném případě musí uvést důvod, proč se závěry inspektora nesouhlasí. Kromě toho inspektori měli někdy problém napsat protokol na psacím stroji, než byla jejich pracoviště dostatečně vybavena. To se jeví dnes v době notebooků a internetu jako úsměvné! Před 25 lety to byla realita.

Paragraf 13 stanovil, že „předseda Komise a v jeho nepřítomnosti hlavní inspektor může nařídít v případě nebezpečí z prodlení při vzniku závažných skutečností z hlediska jaderné bezpečnosti nezbytná opatření včetně snížení výkonu nebo zastavení provozu jaderného zařízení“.

Formulaci tohoto paragrafu byla věnována velká pozornost, i když ho nebylo nutné v praxi uplatnit. Na druhé straně text tohoto paragrafu byl považován za velmi důležitý, protože dokládá silnou pozici dozoru a jeho nezávislost. Po vydání zákona se nás řada odborníků ze západních dozorů ptala právě na to, zda dozor takovouto pravomocí disponuje.

Paragraf 14 stanovuje povinnosti odpovědné organizace, jmenovitě

- předkládat dokumentaci k vydání rozhodnutí dozoru
- vytvářet inspektorům podmínky pro výkon dozoru (např. pronájem místnosti, základní vybavení, telefonní linka)
- prokazovat inspektorům plnění stanovených povinností
- informovat neprodleně inspektora a Komise o závažných zkušenostech a mimořádných událostech v případě nutnosti snížit výkon nebo zastavit provoz jaderného zařízení.

Na závěr tohoto paragrafu je stanoveno, že „odpovědnost za jadernou bezpečnost jaderného zařízení jako celku má odpovědná organizace“. To také znamená, že je jediným partnerem dozoru ve schvalovacím procesu a není možné, aby ji někdo zastupoval. Odpovědná organizace si může další organizace (např. projektanta, výrobce zařízení) k jednáním s orgánem dozoru přizvat, ale to z ní v žádném případě primární odpovědnost za jadernou bezpečnost nesnímá. Nedílná a primární odpovědnost investora a provozovatele za jadernou bezpečnost je jedním z klíčových ustanovení zákona.

Paragraf 15 stanovil, že

- všechny organizace a orgány, které vykonávají činnost pro odpovědnou organizaci, jsou povinny dodržovat požadavky jaderné bezpečnosti stanovené v předpisech a podmínky stanovené v rozhodnutích komise

- všechny tyto organizace, které plní činnosti ve smyslu předchozího odstavce, jsou povinny poskytovat odpovědné organizaci úplné podklady potřebné pro dokumentaci, které předkládá na Komisi.

Dosavadní zkušenost ukazovala, že text tohoto paragrafu je nutný, neboť znamená určitou pomoc pro odpovědnou organizaci vymáhat plnění požadavků jaderné bezpečnosti od dodavatelů a dalších organizací. To jí umožňuje plnit svou odpovědnost a zároveň dává možnost případný postih Komise přenést na dodavatelské a jiné organizace.

Paragraf 16 stanovil pro odpovědnou organizaci povinnost vypracovat pro jaderná zařízení havarijní plány (vnitřní a vnější) a havarijní řády pro přepravu.

Komise tyto havarijní plány a řády posuzovala, ale neschvalovala, protože to bylo povinností vedoucího odpovědné organizace v případě vnitřního havarijního plánu, resp. představitele příslušného územního celku (kraje nebo okresu) v případě vnějšího havarijního plánu. Paragraf o havarijních plánech se dostal do zákona až ke konci jeho zpracování, protože hovořit o havarijních opatřeních nebylo v té době příliš populární. Význam tohoto paragrafu je o tom, že bez schválených havarijních plánů, resp. řádů, není možné uvést jaderné zařízení do provozu nebo zahájit přepravu. Ve spolupráci se složkami civilní obrany (CO) byl vydán předpis pro havarijní plánování a byla ustavena Vládní havarijní komise v čele s místopředsedou vlády. Požadavky havarijních plánů a kritéria pro uplatnění jednotlivých ochranných opatření připravovala tzv. Centrální poradní skupina složená z expertů Komise a Centra hygieny záření. Byl to dobrý začátek, ale na své řešení ještě čekalo v této oblasti mnoho práce. Po černobylské havárii v roce 1986 Vládní havarijní komise pracovala v reálné havarijní situaci, kdy na naše území pronikly radioaktivní látky z této havárie. S ohledem na politické důvody však svoji roli nespĺnila, zejména z hlediska informovanosti obyvatelstva. Rozhodnutí, kdy není třeba havarijní plány zpracovávat, ale stačí mít přímý kontakt na policii, bylo poprvé přijato na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT při spuštění školního reaktoru VR-1. Důvodem bylo, že výkon reaktoru je velmi malý a množ-

ství radioaktivních látek ve vyhořelém palivu je rovněž velmi malé.

Paragraf 17. Podle tohoto paragrafu mohla dostat „odpovědná organizace i její pracovníci pokuty jak za ohrožení nebo porušení jaderné bezpečnosti, tak za zatajení informací významných pro výkon dozoru nebo jejich včasné neoznámení“.

Je známo, že zákon, který nemá sankční opatření za nedodržování, je bezzubý, a proto byla sankční část v zákoně nutná. Tento paragraf vzbudil poměrně velkou pozornost jaderné komunity u nás. V realitě uplatňování zákona se ukázalo, že zatajení nebo včasné neoznámení důležitých informací bylo častější než porušení jaderné bezpečnosti. Počet případů udělení pokut provozovatelům za cca deset let uplatňování zákona nepřesáhl jeden případ na rok. Bylo jasné a praxe to potvrdila, že samo uplatňování pokut situaci neřeší, a v některých případech je účinnější, když dozor při nespĺnění požadavku nepovolí najetí bloku, což je pro provozovatele citelnější finanční ztráta než pokuta. Odstupňovanou politiku dozoru v případě ukládání pokut vyjadřuje odstavec toho paragrafu, který stanovuje potřebu „zvážení závažnosti porušení, míry zavinění, případně zda se jedná o první, nebo opakovaný případ“.

Paragraf 18 stanovil „lhůty pro ukládání pokut a dále, že výnos pokut je příjmem státního rozpočtu“. Tímto opatřením se vylučuje možnost, že pokuty jdou do rozpočtu ČSKAE. Tento paragraf potvrzuje, že ČSKAE nemá ekonomický zájem na udělování pokut a nemůže dojít ke střetu zájmů.

Paragraf 19 stanovil, že „s výjimkou řízení o pokutách se na něj nevztahuje správní řád“, tj. že proti rozhodnutím Komise se nelze odvolat.

To bylo právně velmi nestandardní ustanovení, které v dnešní době právního státu není možné, protože možnost odvolání v právním státě musí existovat. Nevzniklo však z popudu tvůrců zákona, ale „někde nahoře“. Vední dozoru si hned na počátku uvědomilo, že tato „výhoda“ je jen zdánlivá, neboť chybná rozhodnutí dozoru, proti kterým není odvolání, by mohla být na škodu ekonomice pro-

vozovatele a prestiže dozoru. Proto to vedlo k větší odpovědnosti a prakticky k závažným chybám ve výkonu dozoru nedošlo. Na druhé straně nový, poměrně malý orgán dozoru ušetřilo řešení odvolání v právních sporech s odpovědnou organizací a nutnost mít právní útvar. Za těchto podmínek dozor vystačil stále s jedním právníkem.

Paragraf 20 konstatoval, že „působnost jiných orgánů státní správy není tímto zákonem dotčena“, a současně předpokládal, že tyto orgány „budou spolupracovat a vyměřovat si informace o rozhodnutí týkající se bezpečnosti jaderných zařízení“.

Tento paragraf vyzývá příslušné orgány ke spolupráci a uzavírání příslušných dohod. V praxi se totiž zpočátku několikrát stalo, že rozhodnutí dvou různých orgánů dozoru byla ve svém uplatnění částečně protichůdná, což nebylo dobré z faktického hlediska ani z hlediska prestiže dozorů.

Paragraf 21 doplňuje zmocnění kompetenčního zákona z roku 1970 o „vydávání dalších obecně závazných právních předpisů, a to

- umístování jaderných zařízení
- zajištění jakosti vybraných zařízení
- skladování, zpracování a ukládání jaderných materiálů
- dopravu jaderných materiálů
- fyzickou ochranu jaderných zařízení a materiálů
- vyřazování jaderných zařízení z provozu
- pro výzkumná jaderná zařízení“.

První dva předpisy byly vydány již před rokem 1984 díky „širšímu“ výkladu pojmů výstavby a provozu v kompetenčním zákonu. Ostatní předpisy byly vydány v průběhu několika let po vydání zákona, jak bude patrné z dalších kapitol této knížky.

Paragraf 22 stanovil, že „zákon nabyl účinnosti dnem vyhlášení tj. 22. března 1984“, tedy okamžitě po jeho schválení v parlamentu. Zákon podepsali tři nejvyšší ústavní činitelé ČSSR – prezident, předseda Národního shromáždění a předseda vlády.

Kdybychom chtěli parafrázovat výrok Neila Armstronga při prvním kroku na Měsíci, zněl by po vydání zákona o státním dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení asi

takto: „Je to útlá právní úprava, ale s velkým významem pro jadernou energetiku a jadernou bezpečnost v Československu.“

Vydání zákona o státním dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení bylo první zákonnou úpravou v zemích provozujících reaktory VVER včetně Sovětského svazu. V ostatních zemích byly vydány obdobné právní úpravy zhruba o 10 let později. Byl to velký úspěch a zadostiučinění pro všechny pracovníky dozoru i pro další, kteří tomuto úsilí fandili. Bylo to zřejmě i maximum, kterého bylo možné v té době dosáhnout. Některé oblasti nebylo reálné právně pokrýt, a proto tato úprava neměla a ani nemohla mít charakter komplexního atomového zákona, který byl vydán až v roce 1997.

Ing. Zdeněk Kříž



Ukončil s vyznamenáním v roce 1964 studium na Fakultě technické a jaderné fyziky ČVUT jako jaderný inženýr. Po ukončení studia nastoupil do Ústavu jaderného výzkumu v Řeži (ÚJV), kde pracoval jako výzkumný pracovník v úseku jaderné energetiky. V roce 1970 přešel do nově vzniklého oddělení jaderné bezpečnosti a záruk Československé komise pro atomovou energii (ČSKAE). Zde se aktivně podílel na rozvoji a prosazování státního dozoru nad jadernou bezpečností. Postupně prošel různými funkcemi až po funkci hlavního inspektora jaderné bezpečnosti (1989–1992). V roce 1993 přijal nabídku pracovat v Mezinárodní agentuře pro atomovou energii (MAAE) ve Vídni. Zde jeho hlavními úkoly bylo využívání provozních zkušeností prostřednictvím systému IRS a podpora činnosti orgánů dozoru v jaderné energetice. Podílel se na přípravě několika doporučení a účastnil se řady misí MAAE. Kromě několika výzkumných zpráv je autorem asi čtyřiceti prezentací, článků a publikací věnovaných dozorcí činnosti. Po návratu z MAAE v roce 2001 nastoupil opět do ÚJV Řež jako vedoucí vědeckého sekretariátu. V období 2001–2011 byl předsedou Poradního výboru pro jadernou bezpečnost předsedkyně SÚJB Dany Drábové a od roku 2004 externím členem Výboru pro bezpečnost jaderných zařízení ČEZ, a. s.

Jaderné zdroje energie pro vesmír

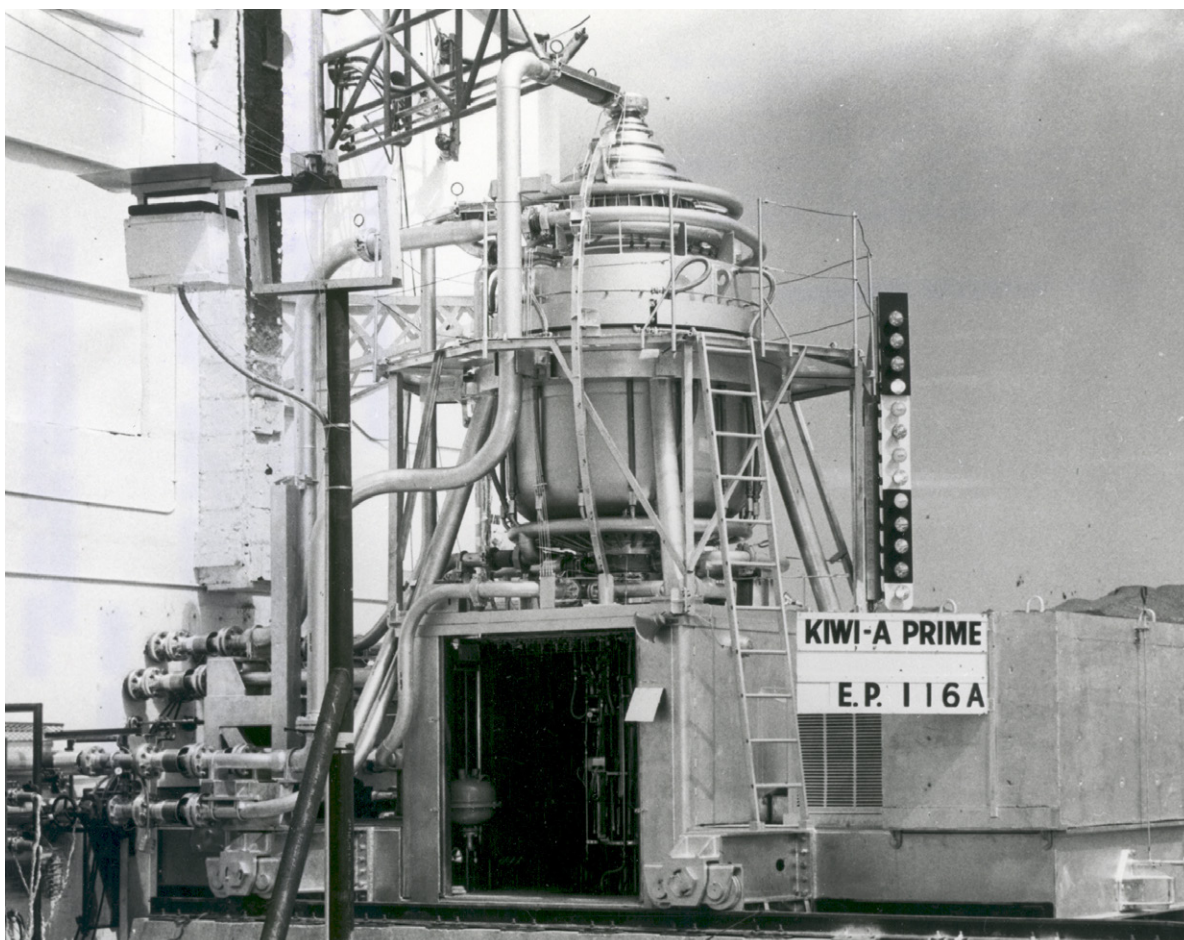
(3. díl - jaderné reaktory jako pohonný systém)

RNDr. Vladimír Wagner, CSc.

Ústav jaderné fyziky AV ČR, v. v. i.

Pokud jsou potřeba při vesmírné misi větší výkony, radioizotopové zdroje už nemusí stačit. V takovém případě je třeba využít jaderné reaktory. Zatímco radionuklidové zdroje dodávají stovky wattů, jaderné reaktory jsou schopné dodávat kilowatty až megawatty. Velmi intenzivní vývoj reaktorů pro vesmírné aplikace probíhal na počátku jaderné a kosmické éry. Znovu se pak zintenzivňuje nyní, kdy se očekává návrat člověka na Měsíc a jeho první cesta na Mars.

Obr. 1: Příprava reaktoru Kiwi-A pro testování v Národní laboratoři Los Alamos v listopadu 1959 (zdroj: Los Alamos National Laboratory)



V předchozí části jsme se věnovali historii využití jaderných reaktorů jako zdrojů elektrické energie a tepla. Nyní se podíváme na historii a současnost reaktorů určených pro pohonné systémy.

POHON NA BÁZI JADERNÝCH ZDROJŮ

Jaderné reaktory lze využít i pro pohon kosmických lodí. V tom případě máme dvě možnosti. První je využití elektrické energie produkované jaderným reaktorem pro napájení iontového motoru. V tomto případě lze využít reaktory popisované v předchozím případě, ty dodávají elektřinu pro iontový motor, který urychluje vhodné ionty. Většinou se jedná o xenon. Takové motory se v současné době využívají, ale zatím je u realizovaných vesmírných aplikací napájely solární panely. Jako příklad může sloužit sonda Dawn, která měla dva iontové motory NSTAR. Pro ně měla celkově 425 kg xenonu. Jejich ionty jsou urychlovány na výtokovou rychlost 30 km/s. To je 7 až 10× více, než je střední výtoková rychlost daná dosaženou teplotou chemických raketových motorů. Dokončuje se vývoj pokročilejšího iontového motoru NEXT, jehož výtoková rychlost je 240 km/s.

HISTORIE VÝVOJE JADERNÝCH TEPELNÝCH RAKETOVÝCH MOTORŮ

Druhou možností je využití tepla produkovaného reaktorem k ohřevu plynu tryskového raketového motoru. V tomto případě reaktor dodává teplo k ohřevu media, které zajišťuje tryskový pohon. Vývoj takových motorů začal také na konci padesátých a v šedesátých letech. Velmi známý je projekt NERVA (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application), v rámci kterého vyvíjeli Američané raketový motor na bázi jaderného reaktoru. Použitý reaktor byl typu Kiwi vyvíjený spolu s dalšími systémy (Phoebus, Peewee-1 a Nuclear Furnace 1) právě pro tyto účely v předchozím programu Rover. Předpokládalo se jeho využití jako třetího stupně raket. Vedoucím projektu byl H. Finger a vývoj probíhal za spolupráce Komise pro atomovou energii AEC (Atomic Energy Commission) a NASA.

Obr. 2: Technici z Lewisova výzkumného centra NASA připravují trysku Kiwi B-1 pro testování ve vakuové peci. 8. května 1964 (zdroj: NASA)



Obr. 3: Testování jaderného tepelného raketového motoru Phoebus-2A v Národní laboratoři Los Alamos (zdroj: Los Alamos National Laboratory).



Reaktor zakomponovaný do tepelného motoru v tomto případě ohřívá vodík a ohřátý plyn expandující tryskou slouží jako pohon. Vodík je tak zároveň využíván pro chlazení reaktoru. Využívalo se grafitové jádro pro moderaci neutronů a jako palivo oxid uraničitý. Tekutý vodík byl skladován ve speciální nádrži.

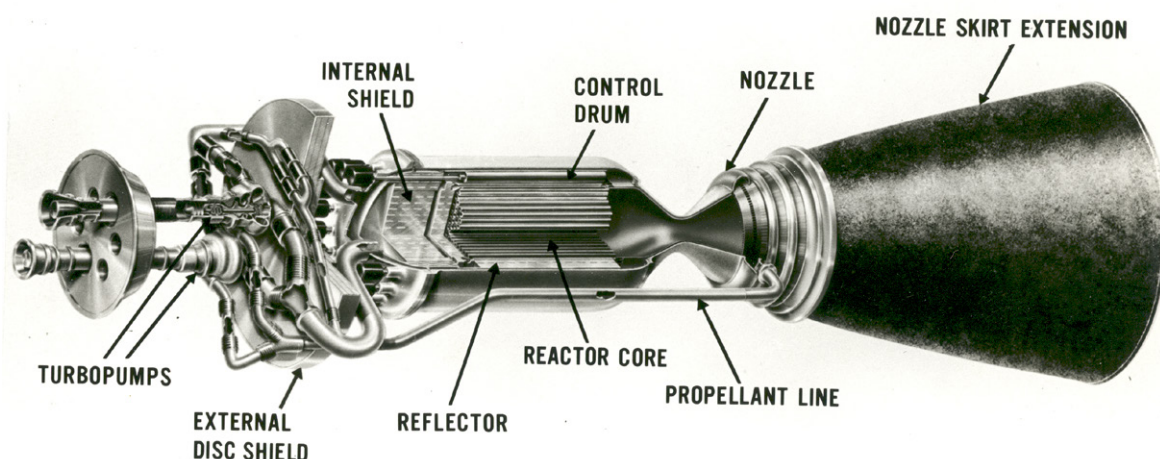
Projekt započal v roce 1959 a do jeho ukončení v roce 1973 bylo v Nevadě zkušeno okolo dvaceti motorů. Při řadě pozemních testů hořely motory až tisíckovky sekund (při testu motoru Peewee na podzim roku 1968 bylo například dosaženo 2 400 s při tepelném výkonu 514 MW_e). Maximální výkony se pro různé typy lišily, dosahovaly ale až 4 000 MW_e. Pozemní zkoušky ukázaly funkčnost takového systému, i když se nepodařilo dosáhnout všech požadovaných parametrů. Připravovaný třetí stupeň rakety měl mít průměr 10,55 m. Prázdný měl mít hmotnost 34 tuny a plný 178 tun, tah měl být 867 kN, dobu hoření 1 200 s a specifický impuls 8,1 kN·s·kg⁻¹. Byl velmi podobný třetímu stupni rakety Saturn V, ve svém výsledku by však byl zhruba dvakrát lepší. Třetí stupeň rakety Saturn V měl průměr 6,6 m, prázdnou hmotnost 13 tun, plný pak 120 tun, tah měl 1 020 kN, dobu hoření třetinovou 470 s a specifický impuls poloviční 4,1 kN·s·kg⁻¹. Hmotnost okysličovačla ve formě tekutého kyslíku byla skoro 85 tun.

Podívejme se na konstrukci tohoto motoru. Aktivní zóna byla tvořena grafitem a palivovými soubory z karbidu uranu. Obohacení uranem 235 bylo velmi vysoké. Byl v ní systém kanálů, kterými protékal vodík. Ten se tak intenzivně ohřívá teplem produkovaným při štěpení. Kanály měly stěny z karbidu niobu, který je velice odolný proti korozi a dalšímu poškození. Bránil tak kontaktu horkého vodíku s grafitem. Aktivní zóna byla obklopena beryliovým zrcadlem, které vracelo neutrony zpět do ní. Reaktor byl opět řízen rotujícími tyčemi v zrcadle (reflektoru). Ty byly z poloviny z berylia a druhá půlka z absorbujícího materiálu (použila se příměs bóru). Kolik neutronů se vracelo do aktivní zóny, záviselo na tom, z jakého materiálu byla část obrácena do aktivní zóny.

Vodík byl skladován v nádrži v kapalném stavu. Napřed proudil potrubím obklopujícím trysku a kanály uvnitř reflektoru. Tímto způsobem se vodík ohřál a zároveň chladil tepelně namáhané části zařízení. Potom byl nasměrován do kanálů procházejících aktivní zónou, kde se ohřál tak, že na výstupu se dosahovalo až 2 200 °C.

Projekt zůstal nedokončen hlavně z finančních důvodů. Jako třetí stupeň raket nepředčil dramaticky klasické chemické motory

Obr. 4: Schéma jaderného tepelného raketového motoru NERVA z roku 1970 (zdroj: NASA)



Obr. 5: Ilustrace bimodální kosmické lodi Copernicus-B s jaderným tepelným pohonem (zdroj: NASA)



Obr. 6: Ilustrace kosmické lodi s jaderným tepelným pohonem od společnosti Ultra Safe Nuclear Technologies (zdroj: USNC-Tech)



a nenašla se mise, kde by takový motor nešel chemickým nahradit. V budoucnu by se takovou misí mohla stát právě cesta lidí na Mars, i v tehdejších plánech to byl jeden z hlavních cílů. V meziplanetárním prostoru panují pro lidi velice nepříznivé podmínky. Radiace a stav beztlíže nastolují nutnost co největšího zkrácení každého vesmírného letu. Chemické raketové motory pracují jen velmi krátce, motory založené na jaderném reaktoru by naopak pracovaly delší dobu a umožnily by dosáhnout vyšších rychlostí, a tím zkrátily letu.

Podobným projektem byl ruský motor RD-0410, jehož vývoj probíhal v letech 1965 až 1980. I zde šlo o spojení reaktoru, který ohříval vodík tankovaný v tekuté podobě, s raketovým motorem. Došel až do stadia pozemních testů v Semipalatinsku. Také s ním se počítalo pro lidské mise na Mars. I tento projekt skončil, když se jejich plány odložily na neurčito.

SOUČASNÝ STAV V TÉTO OBLASTI

V současné době se díky vyšším nárokům na ochranu životního prostředí uvažuje o využití motoru založeného na jaderném reaktoru vý-

hradně pro práci v meziplanetárním prostoru. Výhody takových motorů se objevují hlavně u výprav kosmonautů do větších vzdáleností od Země. Typicky jde o již několikrát zmiňované lety na Mars. Zde je potřeba dopravit velké hmotnosti. Každé zrychlení letu zároveň snižuje radiační dávku. V dobách, kdy se obnovoval zájem o takové dobrodružství, se obnovoval zájem o vývoj jaderných tepelných raketových motorů.

Většinou koncepce navazovala na dřívější projekty. Jako pokračovatel projektu NERVA může být označen projekt SNTP (Space Nuc-



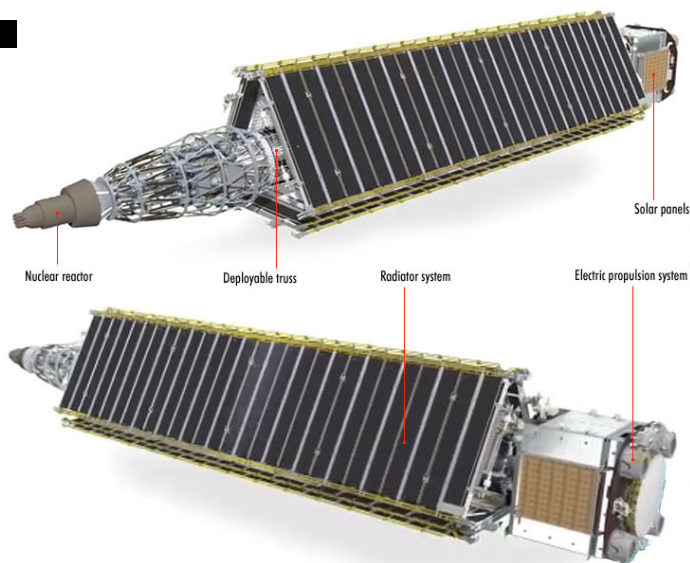
lear Thermal Propulsion) z přelomu století. V té době však poměrně brzy zájem o vesmír opět upadl a vývoj zůstal dominantně v papírové fázi. I tak však došlo k znatelnému pokroku. Díky novým materiálům odolným při vysokých teplotách, lepším počítačovým simulacím a obecně pokroku v jaderném inženýrství se povedlo dramaticky zlepšit kvalitu. Hmotnost klesla oproti motoru NERVA na čtvrtinu, tah převyšuje původní hodnotu o třetinu a specifický impuls má být mezi hodnotami $9,1\text{--}9,8 \text{ kN}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Obnova zájmu o cestu lidí na Mars vedla k restartu vývoje tepelných jaderných raketových motorů. Zájem vede k přípravě většího počtu projektů a k většímu zapojení soukromého sektoru. Kromě projektů, které navazují na předchozí modely reaktorů s vysokým obohacením, se pracuje i na projektech reaktorů s nízkým obohacením do 20 %. V USA se rozvíjí několik projektů různých firem, zmiňme například BWX Technologies a GA-EMS. Hledá se i možnost využití pokročilých technologií s palivem TRISO, zmiňme firmu USNC-Tech. I v tomto případě se snaží NASA zapojit co nejvíce soukromý sektor a podporovat soutěž, vývoj jaderných raketových motorů. Ten podporují i vojáci. Agentura pro obranný výzkum DARPA (The US Defense Advanced Research Projects Agency) udělila kontrakty pro vývoj jaderného tepelného motoru v rámci projektu DRACO (Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations).

Podobná situace je v Rusku, kde spolupracuje Rosatom s firmou KB Arsenal na vesmírném kosmickém tahači Nuklon (Zeus) s jaderným reaktorem o tepelném výkonu 1 MW. V tomto případě je klíčovou vlastností možnost opětovného tankování pohonného média ve vesmíru.

Obr. 7: Vizualizace jaderného tepelného raketového motoru od společnosti BWX Technologies (zdroj: BWXT)

Obr. 8: Schéma kosmického tahače Zeus vyvíjeného ve spolupráci Rosatomu se společností KB Arsenal (zdroj KB Arsenal)



ZÁVĚR

Základny na Měsíci nebo na Marsu či cesty komplexních laboratoří do vzdálenějšího vesmíru se neobejdou bez zdrojů elektřiny a tepla s výkony v řádu desítek kilowattů až megawattů. Nelze tak už vystačit s radionuklidovými generátory, ale musí se využít jaderné reaktory. První z nich se vydaly do vesmíru v polovině šedesátých let. Ukázalo se, že dokážeme taková zařízení připravit a fungují. Po opadnutí počáteční euforie a naděje na rychlou vesmírnou expanzi se přestalo s využíváním reaktorů ve vesmíru počítat. Současná obnova zájmu o návrat na Měsíc, výboje na Mars i do vzdálenějšího vesmíru vedou k nutnosti jejich zavedení. Při vývoji nových typů lze využít předchozí zkušenosti a nové znalosti a materiály. I v současné době je dokončení a reálné využití jaderných reaktorů závislé na tom, jestli se mise s jejich potřebou realizují. Nadějí však je, že vývoj probíhá v několika státech a zapojují se do něj i soukromé firmy. Dá se tak očekávat, že do konce tohoto desetiletí budou vesmírné reaktory ve službě.

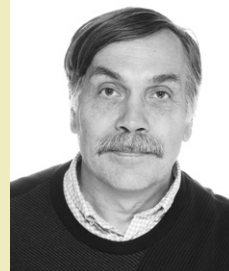
Reference:

David Buden: Space Nuclear Propulsion and Power: Book 1, Space Nuclear Radioisotope Systems, Polaris Books, 2011
David Buden: Space Nuclear Propulsion and Power: Book 2, Nuclear Thermal Propulsion Systems, Polaris Books, 2011
David Buden: Space Nuclear Propulsion and Power: Book 3, Space Nuclear Fission Electric Power Systems, Polaris Books, 2011
Richard R. Furlong a Earl J. Wahlquist: U.S. space missions using radioisotope power systems, Nuclear News, April 1999, str. 26

IAEA: The Role of Nuclear Power and Nuclear Propulsion in the Peaceful Exploration of Space, IAEA, 2005 STI/PUB/1197

<https://www.nasa.gov/>
<https://www.world-nuclear-news.org/>
<https://www.atomic-energy.ru/>

RNDr. Vladimír Wagner, CSc.



wagner@ujf.cas.cz

Vystudoval jadernou fyziku na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy v Praze. Během doktorandského studia se věnoval experimentálnímu studiu struktury deformovaných jader. Pracuje v Ústavu jaderné fyziky AVČR, v.v.i. v Řeži a učí na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze. Mezi hlavní oblasti jeho vědeckého zájmu patří studium velmi horké a husté jaderné hmoty pomocí srážek těžkých iontů. Je zapojen do výzkumu mezinárodních skupin provádějících experimenty v GSI Darmstadt (Německo) a v laboratoři CERN (Švýcarsko). Vede skupinu, která studuje možnosti transmutace jaderného odpadu pomocí urychlovačem řízených transmutorů, a získává potřebná jaderná data pro pokročilé štěpné i fúzní systémy. Využívá k tomu zdroje neutronů v mateřském ústavu a v mezinárodní spolupráci urychlovač Nuklotron ve Spojeném ústavu jaderných výzkumů v Dubně v Rusku. Zajímá se také o energetiku a byl členem druhé nezávislé energetické komise NEK II, která vypracovala doporučení pro aktualizaci Státní energetické koncepce České republiky, podílel se na publikaci Perspektivy české energetiky. Současnost a budoucnost (Novela bohémica 2014) a napsal knihu Fukušima I poté (Novela bohémica 2014). Zabývá se také popularizací vědy a hlavně fyziky. Pravidelně přednáší pro středoškolskou mládež a veřejnost. Píše články pro internetové i klasické časopisy, které se popularizaci vědy věnují.

Kalendář akcí

srpen - říjen 2022

Jaderná energetika a Green Deal

14. 09. 2022 – 15. 09. 2022

Západočeská univerzita v Plzni
Univerzitní 2762/22, Plzeň 3

Celostátní odborná konference pořádaná v rámci zahájení akce Jaderné dny 2020.

Více informací na www.jadernedny.cz

Jaderné dny 2022

14. 09. 2022 – 19. 10. 2022

Západočeská univerzita v Plzni
Univerzitní 2762/22, Plzeň 3

12. ročník akce, která má za cíl přiblížit různé oblasti využívání jaderné energie nejen studentům středních a vysokých škol, ale i široké veřejnosti.

Více informací na www.jadernedny.cz

Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách

18. 10. 2022 – 20. 10. 2022

Hotely Šumava a Srní
Srní 117

17. ročník konference zaměřené na hodnocení životnosti energetických zařízení v klasických a v jaderných elektrárnách s cílem prodloužení životnosti uplatněním moderních diagnostických metod a výsledků materiálového a konstrukčního vývoje.

Více informací na <http://srni.vzuplzen.cz/>

Energetika 2022

21. 09. 2022 – 22. 09. 2022

Hotel Passage
Lidická 23, Brno

Další ročník konference pořádaný společností EGÚ Brno, a.s.

Více informací na www.egubrno.cz/konference/

VVER 2022

10. 10. 2022 – 11. 10. 2022

Konferenční centrum ÚJV Řež, a. s.
Hlavní 130, Řež

8. mezinárodní setkání odborníků z jaderných elektráren s reaktory VVER, zástupců regulačních orgánů a autorů energetických strategií, projektantů, dodavatelů paliva, údržby a dalších služeb.

Více informací na www.vver2022.com

Smart Energy Forum

18. 10. 2022 – 19. 10. 2022

O2 Universum
Českomoravská 2345/17, Praha 9

8. ročník mezinárodní odborné konference a výstavy zaměřené na současnost a budoucnost moderní energetiky s důrazem na fotovoltaiku, akumulaci energie a inovace.

Více informací na <https://www.smartenergyforum.cz/>

Jaderná energetika a Green Deal

14. – 15. září 2022

místo konání
zahájení
účast přislíbili

Západočeská univerzita v Plzni
v 10 hodin

Tomáš Ehler, Petr Závodský, František Krček,
John Roberts, Leon Cizelj, Vladimír Wagner,
Tomáš Čechák

záštitu poskytli

ministr průmyslu a obchodu ČR Jozef Síkela
a rektor Západočeské univerzity v Plzni
Miroslav Holeček

Více informací a registrace na www.jadernedny.cz

**CELOSTÁTNÍ
KONFERENCE**
v rámci zahájení
Jaderných
dnů

JADERNÉ DNY 2022

Kampus ZČU v Plzni – 14. 9. – 19. 10. 2022

Ve dnech 14. září – 19. října 2022 se budou v kampusu Západočeské univerzity v Plzni konat již tradiční Jaderné dny. Akce má za cíl přiblížit různé oblasti využívání jaderné energie zejména studentům středních a vysokých škol, ale také široké veřejnosti. Pořadatelem je Západočeská univerzita ve spolupráci se ŠKODA JS a.s. a CENEN (Czech Nuclear Education Network).

Po celou dobu trvání jsou Jaderné dny 2022 doprovázeny již tradiční expozicí interaktivních modelů zařízení z oblasti využívání jaderné energie a přednáškami a soutěžemi pro studenty středních škol. Podrobné informace k celému průběhu Jaderných dnů je možné získat na webu jadernedny.cz.



JADERNÉ
DNY 2022



all-for **power**

je

Mediální partneři



