je

4/22

ročník 8 [68] 2022

V tomto čísle vám představíme Enrica Fermiho, italského vědce, který před 80 lety provedl první řízenou štěpnou řetězovou reakci. Seznámíme vás se simulací následků dlouhodobé ztráty napájení bloku VVER-1000 Záporožské jaderné elektrárny. Vysvětlíme vám, jak probíhala přeprava vyhořelého paliva z výzkumného reaktoru LVR-15 a co znamená termín zářičová amnestie. Detailně se zaměříme na materiál MAKROCLEAR a jeho využití pro radiochromickou integrující dozimetrii hadronových svazků a také na vývoj a využití zařízení pro ozařování betonových vzorků. Na následujících stránkách mimo jiné najdete i další díl seriálu o vzniku a historii státního dozoru nad jadernou bezpečností, čtvrtou část vědeckopopulárního cyklu o jaderných zdrojích pro vesmír a informace z aktuálního dění.

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 500 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 Tipek, Mgr. Miriam Vachová, Mgr. Ilona Vysoudilová, RNDr. Marek Vyšinka, Ph.D., RNDr. Vladimir 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 enegie/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 4/2022, ročník 3 [68]
Vychází 20. 12. 2022

editorial

Vážení a milí čtenáři,

přijměte prosím mou omluvu, ale přes prodlení s vydáním tohoto čísla se nám nepodařilo zajistit všechny původně avizované příspěvky. Domnívám se, že se nám i tak povedlo vytvořit tematicky velmi zajímavý obsah, který reaguje na aktuální dění v oblasti jaderné energetiky. O slíbená témata rozhodně nebudete ochuzeni, průběžně se jim budeme věnovat v následujících číslech časopisu.

V novém kalendářním roce plánujeme vydat opět čtyři standardní čísla. Ediční plán bude mít však upravený harmonogram, drobných změn dozná i layout časopisu a těšit se můžete také na nové rubriky. Našim cílem pro rok 2023 je udržet vysokou odbornou úroveň publikovaných příspěvků, více se soustředit na aktuální témata a autorskou tvorbu a rozšířit spolupráci se studenty a absolventy technický oborů.

V roce 2022 jsme díky poptávce navýšili počet tištěných čísel na 500 kusů, ještě více nás pak těší přes 500 registrovaných odběratelů elektronické verze časopisu. Váš zájem je pro nás hlavním impulsem dál pracovat na zvyšování úrovně časopisu, posilování jeho jména a historického odkazu a popularizaci jaderné energetiky, která ve světle aktuálního dění nabývá na významu.

Dovolte mi, abych vám jménem redakce, redakční rady a obou vydavatelů poděkoval za vaši přízeň a popřál vám hodně zdraví, štěstí a osobních i pracovních úspěchů v roce 2023.

Michal Šafránek

šéfredaktor

obsah

představujeme

80 let od první řízené štěpné řetězové reakce 04
Ing. Daneš Burket, Ph.D.

medailonek významných osobností

Enrico Fermi 08
Daneš Burket

jaderná bezpečnost a radiační ochrana

Simulace následků dlouhodobé ztráty napájení bloku VVER-1000 Záporožské jaderné elektrárny 10
Ing. Anna Selivanova, Ing. Danilo Ferretto, Ing. Guido Mazzini, PhD., Ing. Miroslav Hrehor

Žiaričová amnestia na Slovensku 16
Ing. Daniel Vašina

výzkum, vývoj a nové technologie

Odolnost materiálů v prostředí AlSi12 pro účely vysokoteplotní akumulace energie 20
Ing. Tomáš Melichar, Ing. Radomír Filip, Ing. Martina Pazderová, Ph.D., Ing. Otakar Frýbort

Využití organického materiálu MAKROCLEAR pro radiochromickou integrující dozimetrii hadronových svazků 26
Mgr. David Zoul, Ing. Markéta Koplová, Ph.D., Ing. Václav Zach

Vývoj a využití zařízení pro ozařování betonových vzorků v jaderném reaktoru LVR-15 38
Ing. Tomáš Melichar, Ing. Zbyněk Hlaváč, Ph.D., Ing. Jaroslav Šoltés, Ing. Petr Hájek, Ing. Karel Dočkal, Ing. Miroslav Vinš

provoz a výstavba jaderných zařízení

Výstavba JE Mochovce a role ŠKODA JS a.s. 44
Ing. Jan Vybulka

zadní část palivového cyklu, odpady a vyřazování

Přepravy jaderného paliva 48
Ing. Ján Milčák

vzdělávání a rozvoj know-how

Jaderná forenzní analýza a její role v jaderně bezpečnostní infrastruktuře státu 52
RNDr. Jan Lorinčík, CSc., prof. Ing. Jan John, CSc.

spolupráce, partnerství a participace

Jules Horowitz Reactor Operation Plan 2040 – JHOP2040 58
Marek Mikloš, Petri Kinnunen, Jean-Pierre Chauvin, Gilles Bignan, Joris Van den Bosh, Victor Esteban Gran

okno do historie

Dvacet let od povodní v Řeži 64
Ing. Alena Rosáková

Z knihy o historii jaderné energetiky (11. část) 68
Ing. Zdeněk Kříž

zajímavosti z domova i ze světa

Jaderné zdroje energie pro vesmír (4. díl – využití fúze) 72
RNDr. Vladimír Wagner, CSc.

aktuality

Unikátní výměna cyklotronu – první v ČR a jedna z mála v Evropě 82
Konference VVER 2022 84
Kontrola a výměna předpínacích lan v kontejnmentu Jaderné elektrárny Temelín 86
Časopis pro fyziku oslavil 150 let 87
Jihočeský jaderný park 88
30 let v CERNu 88
ČEZ dostal tři nabídky na dostavbu Dukovan 89

01

Simulace následků dlouhodobé ztráty napájení bloku VVER-1000 Záporožské jaderné elektrárny

Válka na území Ukrajiny vedla k nárůstu bezpečnostních hrozeb v důsledku možného poškození ukrajinských jaderných zařízení, zejména reaktorů VVER-1000..

Ing. Anna Selivanova, Ing. Danilo Ferretto, Ing. Guido Mazzini, PhD., Ing. Miroslav Hrehor

02

Využití organického materiálu MAKROCLEAR pro radiochromickou integrující dozimetrii hadronových svazků

V roce 2021 byla v Laboratoři cyklotronů a generátorů rychlých neutronů (LC&FNG) provedena série pokusných ozáření radiochromických integrujících dozimetrů MAKROCLEAR protonovými a deuteronovými svazky urychlenými na cyklotronu U-120M.

Mgr. David Zoul, Ing. Markéta Koplová, Ph.D., Ing. Václav Zach

25

Jaderná forenzní analýza a její role v jaderně bezpečnostní infrastruktuře státu

Cílem příspěvku je vysvětlit základní principy oboru jaderně forenzní analýzy a její roli v jaderně bezpečnostní infrastruktuře státu.

RNDr. Jan Lorinčík, CSc., prof. Ing. Jan John, CSc.

27

Jaderné zdroje energie pro vesmír (4. díl - využití fúze)

Cesta k ještě vyšším výkonům ve vesmíru by mohla vést přes termojadernou fúzi. Bez tohoto zdroje se jen velmi těžko dostaneme, byť třeba jen k nejbližším hvězdám.

RNDr. Vladimír Wagner, CSc.

80 let od první řízené štěpné řetězové reakce

Ing. Daneš Burket, Ph.D.
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

V moderní historii bychom nenašli mnoho podobných příkladů tak rychlého průmyslového využití základních objevů, jako tomu bylo v případě štěpení jader atomů.

Pojem atom zavedl už řecký filozof Démokritos z Abdér někdy kolem roku 400 před naším letopočtem. K jeho existenci došel úvahou, že kdybychom dělili hmotu donekonečna, dostali bychom nic a z ničeho nejde zpátky hmotu sestavit. Usoudil proto, že hmota je složena z neviditelných nedělitelných částic, které jsou v neustálém pohybu. Tyto částice nazval atomos (v řečtině nedělitelný).

Samotný začátek atomového věku ale můžeme datovat až na konec 19. století, kdy v roce 1897 experimentální fyzik Joseph John Thomson při studiu elektrické vodivosti plynů objevil elektron a zformuloval vůbec první model atomu, který nazval pudinkový, protože předpokládal, že atom je tvořen homogenní kladně nabitou hmotou, ve které jsou – jako rozinky v pudinku – rozptýleny záporně nabité elektrony. Na jeho teorii potom navázal na začátku minulého století Ernest Rutherford, který na základě experimentů dokázal, že drtivá většina hmoty je v atomu soustředěna v kladně nabitém středu atomu (jádře), kolem kterého dle jeho modelu obíhají elektrony. Následovaly další modely vylepšující popis atomu, jako byl Bohrův-Sommerfeldův model až po dnešní kvantové modely. Zpočátku se předpokládalo, že atom je složen jen z protonů a elektronů, ale už záhy Rutherford předpověděl existenci neutronu jako nenabité částice, kterou na základě experimentů potvrdil a popsal v roce 1932 James Chadwick.

Štěpení atomového jádra poprvé pozorovali v roce 1938 chemici Otto Hahn a Fritz Strassmann u izotopu uranu 235. K realizaci štěpné řetězové reakce pak už zbýval jen krůček, který ale musel být podložen několika dalšími důležitými objevy. Zasloužil se o ně především teoretický a experimentální fyzik Enrico Fermi (více o něm v našem medailonku), který už od roku 1934 realizoval experimenty zaměřené na štěpení jader atomů a zjistil, že se neutrony při srážkách s lehkými jádry zpomalují,

Obr. 1: Chicago Pile-1 (autor: Melvin A. Miller, Argonne National Laboratory)

což byl jeden z nutných předpokladů pro realizaci řízené štěpné řetězové reakce. Tu Fermi provedl v roce 1942 na jaderném reaktoru nazvaném Chicago Pile-1 pod tribunou fotbalového stadionu Stagg Field Chicagské univerzity. Označení „pile", tedy milíř, bylo zvoleno proto, že tyto experimenty už byly realizovány v rámci utajovaného projektu Manhattan, jehož cílem byl vývoj a otestování jaderné bomby. To je důvod, že z této významné události neexistuje žádná fotografie a je zaznamenána pouze na několika kresbách.

Reaktor byl sestaven z několika vrstev grafitových cihel (připomínal tedy skutečně milíř), které zajišťovaly zpomalování neutronů, uprostřed reaktoru byly lisované koule z oxidu uranu, které byly umísťovány střídavě s vrstvami grafitu. Reaktor měl být podle výpočtů vysoký sedm metrů, ale měření v rámci experimentu a postupného sestavování reaktoru ukázala, že k dosažení kritického stavu stačí méně vrstev a reaktor dosáhl štěpení při výšce šest metrů. Jeho velmi důležitou součástí byly kadmiové tyče, které se ručně vysouvaly a zasouvaly z a do reaktoru na základě měření neutronového toku a sloužily tak k řízení štěpné řetězové reakce. Už tehdy byl reaktor vybaven něčím, co bychom mohli nazvat automatický bezpečnostní systém – byla to havarijní tyč napojená na měření neutronového toku, která by se v případě dosažení velkého výkonu sama spustila (spadla) do středu reaktoru a zastavila reakci. Také bezpečnostní systém byl vícenásobně zálohovaný – první zálohou bylo přeseknutí lana sekerou v případě selhání automatiky, druhou zálohu potom tvořila skupina dobrovolníků s nádobami s roztokem kadmia, ti stáli nad reaktorem a v případě selhání popsaných systémů byli

připraveni roztok vlít do reaktoru. Reaktor neměl žádné stínění, protože experiment trval jen několik minut a tehdy ještě nebyly příliš popsány účinky záření na lidský organismus.

Samotný experiment byl zahájen 2. prosince 1942 pět minut po půl desáté hodině ráno. Nejprve byla z reaktoru vytažena havarijní tyč a po ní se po malých krocích, mezi kterými byl měřen neutronový tok, vytahovala tyč regulační. Stačilo jen pár kroků a výkon reaktoru se zvýšil natolik, že automatický systém shodil havarijní tyč do reaktoru a reakce se zastavila. Experiment pokračoval odpoledne, kdy bylo v 15:36 dosaženo kritického stavu, reaktor zvyšoval svůj tepelný výkon na odhadovanou hodnotu 0,5 W a následně byl v 15:53 znovu automaticky odstaven. Experiment byl potom opakován ještě 12. prosince, kdy bylo během půlhodinového provozu dosaženo výkonu cca 200 W. Reaktor splnil svoji historickou úlohu a hned v únoru následujícího roku byl rozebrán.

Od objevu štěpení atomového jádra v roce 1938 tak stačilo pouhých šest let k postavení reaktoru, na kterém byla realizována první řízená štěpná řetězová reakce. Za dalších devět let, 20. prosince 1951, byl v poušti nedaleko města Arco v Idaho spuštěn experimentální reaktor EBR-1 (Experimental Breeder Reactor), který byl prvním jaderným zařízením na světě, které rozsvítilo tehdy čtyři 200 W žárovky. První jadernou elektrárnou, která byla 27. června 1954 připojena k síti, byla Jaderná elektrárna Obninsk, jež se nachází 100 km jihozápadně od Moskvy – tedy dnes neuvěřitelných 16 let od základního objevu štěpení k vybudování a zprovoznění jaderné elektrárny.

Připomeňme si v této souvislosti, že v tehdejším Československu byl už v září roku 1957 spuštěn v Řeži reaktor VVR-S (předchůdce dnešního reaktoru LVR-15 provozovaného Centrem výzkumu Řež), díky čemuž jsme se stali devátou zemí na světě, která spustila řízenou štěpnou řetězovou reakci. Naši vzpomínku na výročí Fermiho významného experimentu uzavřeme posledním historickým milníkem – díky Jaderné elektrárně A1, která byla připojena k síti v prosinci roku 1972 se Československo stalo osmou zemí na světě, která dokázala vlastními silami a prostředky naprojektovat, postavit a provozovat jadernou elektrárnu.

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.

Enrico Fermi

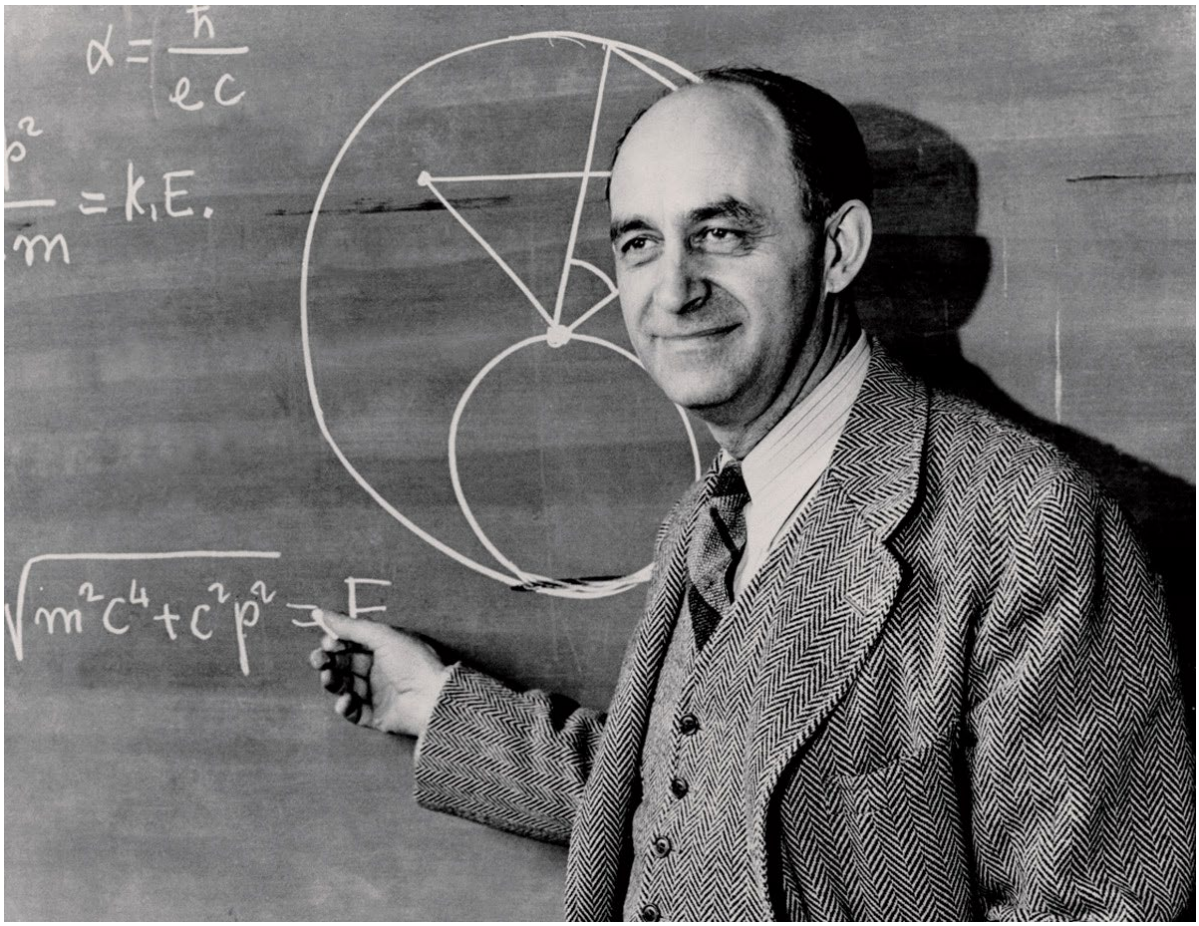
Enrico Fermi

Obr. 1: Enrico Fermi ve 40. letech 20. století (zdroj: United States Department of Energy)

V článku věnovaném 80. výročí realizace první řízené štěpné řetězové reakce byla popsána klíčová role Enrica Fermiho v objevech, které k tomuto milníku vedly.

Enrico Fermi se narodil 29. září 1901 v Římě jako nejmladší ze tří dětí Alberta Fermiho – hlavního inspektora ministerstva komunikací. Už od dětství ho zajímala technika a fyzika, se svým starším bratrem sestavovali elektrické motory a jeho zájem o fyziku podpořil kolega jeho otce, který Enricovi věnoval několik tematických knih, což zřejmě rozhodlo o tom, že se Fermi rozhodl studovat fyziku na univerzitě v Pise. Už v průběhu studia publikoval svoji první vědeckou práci nazvanou *Dynamika tuhého systému elektrických nábojů v translačním pohybu*. Promoval už v 21 letech v roce 1922, doktorát z fyziky získal na základě svých prací v oblasti experimentů s rentgenovými paprsky. Díky svému nadání získal stipendium na univerzitě v Göttingenu u profesora Maxe Borna, pozdějšího nositele Nobelovy ceny za výzkum v oblasti kvantové mechaniky. Už v roce 1926 se podílel na objevu zákonů statistické fyziky, které jsou dnes označovány jako Fermiho-Diracovo rozdělení a popisují chování volných elektronů v kovech. V roce 1929 se stal členem Královské italské akademie.

Od roku 1932 se zabýval radioaktivními rozpady, zavedl název neutrino jako jeden z produktů rozpadu beta a v roce 1934 realizoval sérii experimentů v oblasti štěpení atomu. Díky tomu obdržel v roce 1938 Nobelovu



Obr. 2: Enrico Fermi (zdroj: Atomic Heritage Foundation)

cenu za fyziku za potvrzení existence nových radioaktivních izotopů a objev jaderných reakcí štěpení tepelnými neutrony. Z přebírání Nobelovy ceny ve Stockholmu se už do Itálie nevrátil a s celou rodinou emigroval do Spojených států amerických, aby se vyhnul pronásledování fašisty. V letech 1939–1942 působil jako profesor na Kolumbijské univerzitě v New Yorku, v roce 1941 se zapojil do národního jaderného výzkumu vyhlášeného vládou – projektu Manhattan – a v prosinci roku 1942 v Chicagu jeho tým provedl první řízenou štěpnou řetězovou reakci, kterou popisujeme na jiném místě v tomto čísle. Pojmy jako Fermiho stáří neutronů patří dnes mezi základní termíny všech reaktorových fyziků. Po válce se jako profesor na univerzitě v Chicagu věnoval fyzice elementárních částic, především jejich vzájemným interakcím a vlastnostem kosmického záření. V roce 1947 se projekt Manhattan přetransformoval na Atomic Energy Commission a Fermi se stal členem jejího generálního poradního výboru.

Enrico Fermi zemřel 28. listopadu 1954 v Chicagu. Byl po něm pojmenován stý prvek periodické soustavy prvků – fermium, označení fermi se používá – především v jaderné fyzice – jako délková jednotka (10^{-15} metru). Na jeho počest se ve Spojených státech amerických od roku 1956 uděluje Fermiho cena za významné vědecké přínosy v oblasti energetiky a podobnou cenu uděluje od roku 2001 i Italská fyzikální společnost.

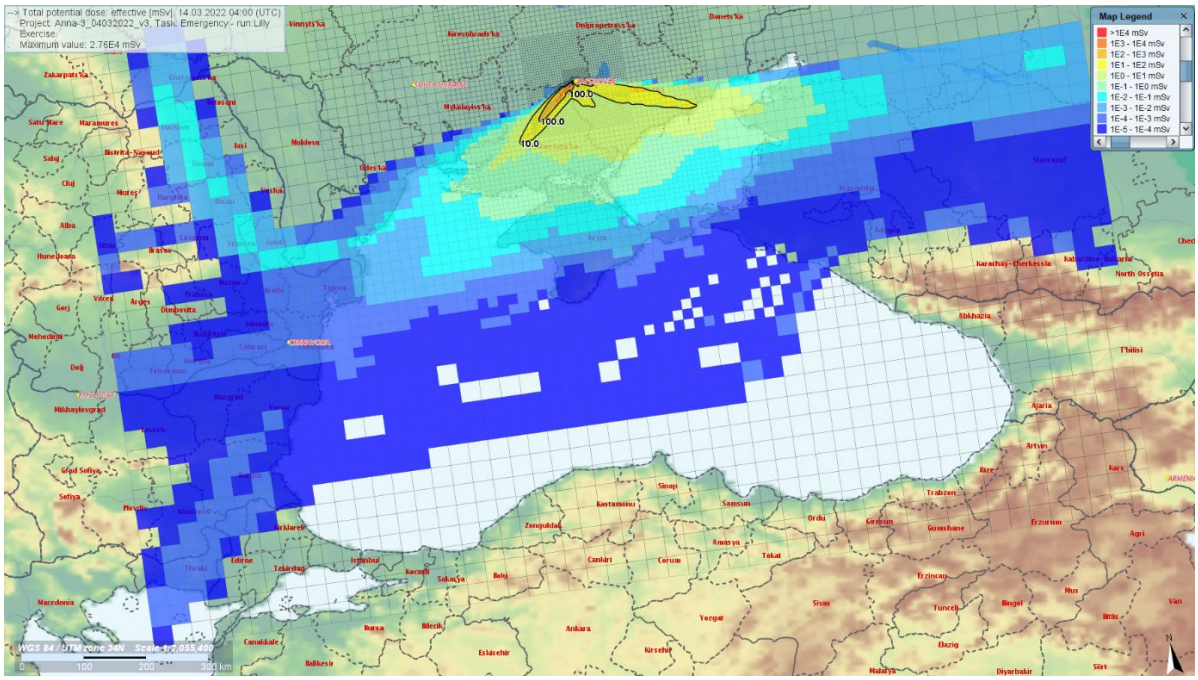
Daneš Burket

Simulace následků dlouhodobé ztráty napájení bloku VVER-1000 Záporožské jaderné elektrárny

Ing. Anna Selivanova, Ing. Danilo Ferretto, Ing. Guido Mazzini, PhD., Ing. Miroslav Hrehor
Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.

Válka na území Ukrajiny vedla k nárůstu bezpečnostních hrozeb v důsledku možného poškození ukrajinských jaderných zařízení, zejména reaktorů VVER-1000. Kvůli opakovanému ostřelování Záporožské jaderné elektrárny byl proveden odhad možných následků dlouhodobé ztráty napájení (long term station blackout – SBO) bloku VVER-1000. K simulaci byla využita podobnost záporožských bloků VVER-1000 s bloky jaderné elektrárny Temelín. Scénář SBO patří mezi nadprojektové havárie – tzv. Design Extension Conditions – level B. Simulace představovala dlouhodobou ztrátu napájení jednoho bloku VVER-1000 s odtlakováním primárního okruhu. K výpočtu zdrojového členu byl využit kód MELCOR 2.2. Štěpné produkty uvolněné do kontejnmentu byly považovány za zdrojový člen pro simulaci úniku do atmosféry. Atmosférický transport radionuklidů byl simulován pomocí kódu JRODOS. S využitím reálných meteorologických dat ze serveru NOAA Operational Model Archive and Distribution System (NOMADS) byly analyzovány dopady uvolněných aktivit na evropské území. Článek představuje zkrácenou českou verzi referátu zaslaného na ocenění v rámci programu Junior Staff Programme ETSON Award v říjnu 2022 v Mnichově.

The war on the territory of Ukraine has led to an increase in security threats due to possible damage to Ukrainian nuclear facilities, in particular the VVER-1000 reactors. Due to the repeated shelling of the Zaporozhye Nuclear Power Plant, an estimate of the possible consequences of a long-term station blackout (SBO) of the VVER-1000 unit was made. The similarity of the Zaporozhye VVER-1000 units with the units of the Temelín nuclear power plant was used for the simulation. The SBO scenario belongs to the beyond-design basis accidents – the so-called Design Extension Conditions – level B. The simulation represented a long-term loss of power of one VVER-1000 unit with depressurization of the primary circuit. The MELCOR 2.2 code was used to calculate the source term. The fission products released into the containment were considered as the source term for the simulation of the release to the atmosphere. Atmospheric transport of radionuclides was simulated using the JRODOS code. Using real meteorological data from the NOAA Operational Model Archive and Distribution System (NOMADS) server, the impacts of the released activities on the European territory were analysed. The paper is an abridged Czech version of a paper submitted for the Junior Staff Programme ETSON Award in Munich in October 2022.



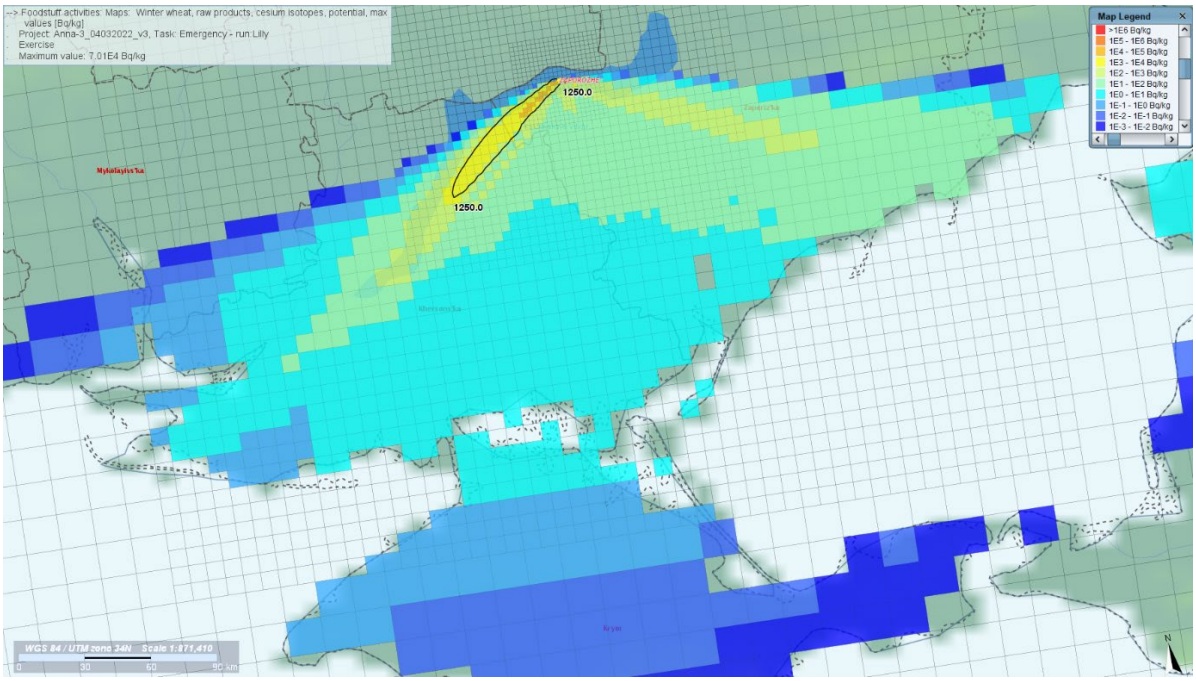
Obr. 1: Mapa efektivních dávek po 10 dnech od začátku úniku

ÚVOD

Aktuální válka na Ukrajině upozorňuje na nové hrozby, které mohou vést k vážné havárii jaderné elektrárny (JE) a k velkému úniku štěpných produktů do životního prostředí. Taková „nová" nebezpečí představují člověkem vyvolanou počáteční událost vedoucí k ohrožení bezpečnosti JE v důsledku poškození elektrické sítě nebo přímého zasažení jaderného bloku. Z tohoto důvodu je v Evropě věnována zvýšená pozornost k situaci kolem jaderných elektráren nacházejících se na území Ukrajiny, kde se zdá, že konflikt každým dnem narůstá.

Podle Mezinárodní agentury pro atomovou energii (MAAE) došlo k ostřelování Záporožské jaderné elektrárny (ZNPP) ruskými silami poprvé na začátku března 2022, což způsobilo požár ve výcvikové budově v těsné blízkosti JE [1]. V srpnu 2022 byla ZNPP a její okolí ostřelována znovu [2]. Ostřelování vedlo k poškození elektrické rozvodny vnějšího napájecího vedení (750 kV) a elektrického transformátoru. V důsledku ostřelování byla poškozena také dusíko-kyslíková stanice [3]. Vzhledem k možnému poškození areálu JE v důsledku ostřelování může dojít k úplné ztrátě všech zdrojů elektrické energie, což je jeden ze scénářů vedoucích k těžké havárii [4, 5]. Tento scénář předpokládá roztavení aktivní zóny, následné uvolnění radionuklidů do kontejnmentu a poté i do atmosféry [5, 6].

Cílem této práce bylo proto odhadnout možné radiační následky po těžké havárii v ZNPP. Provedené hodnocení se zaměřuje na posouzení rozsahu navržení případných ochranných opatření a na dopady kontaminace zemědělských oblastí v okolí ZNPP. Předložené analýzy byly využity Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (SÚJB) k odhadu možných následků na území Evropy, se zřetelem na Českou republiku. Práce byla mj. pozitivně hodnocena odbornou komunitou na konferenci ETSON 2022 v rámci programu Junior Staff Programme ETSON Award v Mnichově [7].



Obr. 2: Mapa hmotnostních aktivit v pšenici

METODOLOGIE

Scénář dlouhodobého výpadků s odtlakováním primárního okruhu

V případě ztráty elektrického napájení a záložních zdrojů elektrické energie (např. dieselových generátorů) může u tlakovodních reaktorů nastat scénář dlouhodobého výpadků s odtlakováním primárního okruhu (long-term station blackout, LT SBO) [8]. Kvůli ostřelování ukrajinského území a zejména oblasti ZNPP může být iniciační událostí takového scénáře poškození vedení vysokého napětí a dalších vnějších zdrojů. ZNPP provozuje šest bloků VVER-1000/320. S využitím zkušeností s provozem JE Temelín (dva bloky VVER-1000/320) a známého hmotnostního inventáře VVER-1000/320 byl pomocí kódu MELCOR 2.2 [9] simulován scénář LT SBO s odtlakováním pro jeden blok VVER-1000 ZNPP. V simulacích byl uvažován pouze transport štěpných produktů, zatímco produkty koroze, aktivace vody a stavebních materiálů nebyly zahrnuty do výpočtů.

Ve scénáři LT SBO teplota aktivní zóny překročila 650 °C přibližně po 2,2 hod od začátku výpadku, což způsobilo následné poškození paliva s uvolněním štěpných produktů a jejich transport do prostoru kontejnmentu [10].

Simulace atmosférického transportu

Simulace scénáře LT SBO v kódu MELCOR 2.2 umožnila odhadnout množství štěpných produktů, které se dostaly do ochranné obálky. Následně se předpokládalo uvolnění radionuklidů do atmosféry. Simulace atmosférického transportu uvolněných radionuklidů byla provedena pomocí kódu JRODOS, verze 2019 [11]. S ohledem na zvolený scénář (těžká havárie s roztavením aktivní zóny) a poškození kontejnmentu byl navržen příslušný zdrojový člen. U tlakovodních reaktorů je typická míra úniku 0,1 % objemu kontejnmentu za den [12]. Vzhledem k aktuální situaci však lze očekávat poškození ochranné obálky způsobené jeho vojenským poškozením. Proto byla možná míra atmosférického úniku

odhadnuta na 10 % celkového objemu kontejnmentu za den. Celková aktivita zdrojového členu byla 2,9E19 Bq. Výška úniku se měnila: během prvních 12 hodin se radionuklidy v důsledku odtlakování primárního okruhu dostaly do výšky 366 m nad zemí. Po zbytek prognózy byla výška nastavena na 66,25 m (výška vrchlíku kontejnmentu).

Iniciační čas uvolnění radionuklidů do atmosféry byl nastaven na 4. 3. 2022, 4:00 UTC. Přestože k ostřelování došlo i např. v srpnu 2022, počátek potenciálního uvolnění byl zvolen tak, aby byl před sklizní zemědělských plodin. Software JRODOS byl mj. také použit k posouzení možné kontaminace zemědělských oblastí. Doba trvání úniku byla odhadnuta na 10 dní. Doba trvání prognózy byla rovněž 10 dní (tj. do 14. 3. 2022, 4:00 UTC). Výpočty byly realizovány do vzdáleností 800 km od ZNPP. Simulace byly zaměřeny na odhad potenciálních dávek (integrace po dobu 10 dní) a hmotnostních aktivit v pšenici. Údaje o počasí byly převzaty ze serveru NOMADS [13].

VÝSLEDKY A DISKUSE

Efektivní dávky

Obr. 1 ukazuje mapu celkových efektivních dávek integrovaných po dobu trvání prognózy (10 dní). Na mapě byly pro demonstrační účely zobrazeny izolinie 10 mSv a 100 mSv. Tyto úrovně se vyskytovaly v oblastech vzdálených 200 km a 85 km od ZNPP. Úrovně 10 mSv a 100 mSv byly zvoleny pro konzervativní odhad rozsahu oblastí, kde mohou být nutná taková ochranná opatření, jako je ukrytí nebo evakuace obyvatelstva. Nicméně předložené prognózy silně závisí na počasí – povětrnostních podmínkách a srážkách [14]. Proto se u jiných meteorologických datasetů budou zasažené oblasti a jejich rozsah lišit, stejně jako rozsah ochranných opatření. Za reálných podmínek pro posouzení ukrytí/evakuace budou ovšem také použity kratší integrační doby efektivních dávek [15]. Například kritérium pro ukrytí používané v České republice je odvrácená dávka 10 mSv za 48 hodin. Pro evakuaci se používá odvrácená dávka 100 mSv za 7 dní [16]. Odvrácené efektivní dávky integrované po dobu 2 dnů a 7 dnů poté by byly vyhodnocovány opakovaně s využitím aktuálních údajů o počasí.

Na základě výsledků simulací a použitých předpokladů (zdrojový člen, meteorologické podmínky atd.) budou nejvýznamněji zasažena ukrajinská území do stovek kilometrů od ZNPP. Oblasti v okolí ZNPP budou vyžadovat ukrytí a evakuaci (nebo i jódovou profylaxi) po velkém úniku radionuklidů do atmosféry. Vezmeme-li v úvahu vzdálenější oblasti (např. tisíce kilometrů od ZNPP), lze očekávat podstatně nižší dávky, od stovek nSv až po desítky μSv, které jsou pod kritérii pro ochranná opatření [15].

Hmotnostní aktivity v pšenici

Ukrajina je jedním z nejvýznamnějších vývozců zemědělských plodin na světě, zejména pšenice [17]. Nejdůležitějšími regiony pro produkci této komodity jsou např. Charkovská, Dněpropetrovská, Záporožská a Chersonská oblast [18]. ZNPP leží mezi Záporožskou, Dněpropetrovskou a Chersonskou oblastí. Obr. 2 ukazuje mapu hmotnostních aktivit izotopů cesia v pšenici po uvolnění radionuklidů do atmosféry, včetně izolinie 1 250 $Bq \cdot kg^{-1}$ (nejvyšší přípustná úroveň radioaktivní kontaminace potravin) [18]. Simulované hmotnostní aktivity ≥ 1 250 $Bq \cdot kg^{-1}$ lze pozorovat na územích vzdálených do 70 km od ZNPP (Záporožská a Chersonská oblast). Pšenice a další zemědělské komodity pocházející z těchto regionů proto mohou podléhat omezením při distribuci, vývozu a spotřebě a budou vyžadovat další opatření v případě kontaminace těchto oblastí. Na základě odlišných meteorologických údajů však mohou být zasaženy i další zemědělské regiony, včetně vzdálenějšího území. Proto mohou následky těžké havárie v ZNPP způsobené ostřelováním/výbuchy negativně ovlivnit zemědělský sektor Ukrajiny a vést ke dlouhodobému snížení zemědělské produkce v zasažených oblastech.

ZÁVĚR

Aktuální situace v ZNPP je neustále sledována v evropském společenství. Vzhledem k řadě podobností mezi českými a ukrajinskými JE se Česko snaží, ve spolupráci TSO organizací sdružených v asociaci ETSON, simulovat možné následky způsobené těžkou havárií v ZNPP. Ve studii byly provedeny simulace nejhoršího scénáře v ZNPP, a to od počátku úplné ztráty napájení elektrickou energií až

Reference:
[1] IAEA 2022 Update 11 – IAEA Director General Statement on Situation in Ukraine (Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency)
[2] IAEA 2022 Update 88 – IAEA Director General Statement on Situation in Ukraine (Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency)
[3] State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine 2022 Report Event – Notice Form (Version 32)
[4] IAEA 2015 The Fukushima Daiichi Accident. Report by the Director General (Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency)
[5] Mazzini G, Kynčl M and Ruščák M 2016 Analyses of feedwater trip with SBO sequence of VVER1000 reactor J. Nucl. Eng. Radiat. Sci. 2 1–6
[6] Ruščák M, Mazzini G, Kynčl M, Savanyuk S, Hrehor M, Musa A and Flores Y Flores A 2019 VVER 1000 severe accident analyses using MELCOR code J. Nucl. Eng. Radiat. Sci. 5 1–9
[7] ETSON 2022 European Technical Safety Organisations Network (ETSON)
[8] Prošek A and Cizelj L 2013 Long-Term Station Blackout Accident Analyses of a PWR with RELAP5/MOD3.3 Sci. Technol. Nucl. Install. 2013 1–15
[9] Humphries L L, Beeny B A, Gelbard F, Louie D L and Phillips J 2017 MELCOR Computer Code Manuals. Vol.2: Reference Manual, Version 2.2.9541. SAND2017-0876 O 897
[10] Mazzini G and Ruščák M 2022 Progress Report on the analyses of ETE Severe Accidents Long Term Station BlackOut using MELCOR 2.2 (Prague, Czech Republic)
[11] Ievdin I, Trybushnyi D, Staudt C and Landman C 2019 JRODOS User Guide
[12] Nijhawan S 2016 Challenges in Multi-Unit CANDU Reactor Severe Accident Mitigation Strategies Volume 4: Computational Fluid Dynamics (CFD) and Coupled Codes; Decontamination and Decommissioning, Radiation Protection, Shielding, and Waste Management (American Society of Mechanical Engineers)
[13] Rutledge G K, Alpert J, Stouffer R and Lawrence B 2003 The NOAA Operational Model Archive and Distribution System (NOMADS) Realizing Teracomputing (World Scientific) pp 106–29
[14] Mattsson S and Vesanen R 1988 Patterns of Chernobyl fallout in relation to local weather conditions Environ. Int. 14 177–80
[15] Montero M, Trueba C, García-Puerta B, Sala R, Andresz S, Schneider T, Maître M, Croüail P, Durand V and Charron S 2018 Addressing the uncertainties in agricultural scenarios. Technical Deliverable D9.21 of the HORIZON 2020 EJP-CONCERT, EC GA 662287. CONFIDENCE-WP4/D4.4 v1.0 Final (Madrid, Spain)
[16] SUJB 2019 The Czech Republic National Report under the Convention on Nuclear Safety (Prague, Czech Republic)
[17] USDA 2022 Ukraine Agricultural Production and Trade (Foreign Agricultural Service (FAS))
[18] EURATOM 2016 Council Regulation (Euratom) 2016/52 of 15 January 2016 laying down maximum permitted levels of radioactive contamination of food and feed following a nuclear accident or any other case of radiological emergency, and repealing Regulation (Euratom) No 3954 (Official Journal of the European Union)

po transport atmosférického úniku štěpných produktů. Na základě výsledků simulací lze očekávat, že po těžké havárii v ZNPP bude nejvíce postiženo ukrajinské území (řádově stovky kilometrů). Tyto oblasti budou vyžadovat ochranná opatření pro obyvatelstvo. Vzhledem k umístění ZNPP budou potenciálně zasažena zemědělská pole v blízkosti JE, přičemž na vypěstované plodiny se mohou vztahovat omezení spotřeby a vývozu. Metody předložených výpočtů se neustále zdokonalují s využitím integrace mezi kódy MELCOR a JRODOS. Navazující práce bude pokračovat ve zpřesnění zdrojového členu a zlepšování celkové metodologie.

PODĚKOVÁNÍ

Rádi bychom poděkovali kolegům z Úradu jadrového dozoru Slovenskej republiky, zejména Adrianě Sokolíkové, Ivanu Klenovičovi a Peteru Jurkovi, a také Ireně Češpírové ze Státního ústavu radiační ochrany za jejich laskavost, doporučení a poskytnutí technických prostředků při realizace této studie. Autoři by také rádi poděkovali Matěji Rzehulkovi za jeho podporu pro post-processing v kódu MELCOR.

Ing. Anna Selivanova

anna.selivanova@suro.cz

je zaměstnankyní Odboru havarijní připravenosti (oddělení SVZ a analytické expertní skupiny) ve Státním ústavu radiační ochrany (SÚRO). V roce 2017 absolvovala Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze, obor Dozimetrie a aplikace ionizujícího záření. V roce 2019 absolvovala Provozně ekonomickou fakultu ČZU v Praze. Jejími odbornými zájmy jsou Monte Carlo simulace transportu záření, simulace atmosférického transportu radionuklidů a dynamické simulace nápravy kontaminovaného území.

Obr. 3: Záporožská jaderná elektrárna

Žiaričová amnestia na Slovensku

Ing. Daniel Vašina
JAVYS, a.s.

Jadrová a vyraďovacia spoločnosť, (JAVYS) so sídlom v Jaslovských Bohuniciach (Slovenská republika) dlhodobo plní celospoločenskú úlohu v oblasti záchytu, identifikácie a ďalšieho nakladania s opustenými žiaričmi, rádioaktívnymi odpadmi neznámeho pôvodu, nepoužívanými žiaričmi a inými rádioaktívnymi materiálmi.

Nakoľko sú na území SR aj subjekty, ktoré v minulom období nevyužili možnosť odovzdania IRAO po rozdelení ČSFR, alebo ktoré ich zdedili, prípadne také, ktoré pri zmenách vlastníckych vzťahov ani netušili, že IRAO, resp. nepoužívané žiariče vlastnia, sú tieto v súčasnosti dlhodobo skladované v niektorých zdravotníckych zariadeniach a laboratóriách, výskumných ústavoch, vedeckých pracoviskách, v školstve, priemyselnom odvetví a podobne.

Na základe vzájomných konzultácií Ministerstva hospodárstva SR (jediný akcionár spoločnosti JAVYS), Úradu verejného zdravotníctva SR (ÚVZ SR) a Ministerstva zdravotníctva SR (MZ SR) bolo dohodnuté, že v rámci dosiahnutia zaistenia bezpečnosti a ochrany občanov, životného prostredia a zníženia rizika prípadného zneužitia alebo nelegálneho nakladania s historickými rádioaktívnymi materiálmi, JAVYS zabezpečí na vlastné náklady ďalšie nakladanie s nimi.

Jadrová a vyraďovacia spoločnost, (JAVYS) with its headquarters in Jaslovské Bohunice (Slovak Republic) has long been fulfilling an important role in society by capturing, identification and further management of abandoned radioactive emitters, radioactive waste of unknown origin, unused radioactive emitters and other radioactive materials.

There are entities in the Slovak Republic that in the past did not take advantage of the possibility of handing over IRAW after the division of the ČSFR, entities that inherited them or did not even suspect that they own IRAW or unused radioactive emitters. Such radioactive materials are currently held in long-term storage in various medical facilities, laboratories, research institutes, scientific workplaces, educational facilities, industrial facilities etc.

Based on mutual consultations of the Ministry of the Economy of the Slovak Republic (the sole shareholder of JAVYS), the Office of Public Health of the Slovak Republic (ÚVZ SR) and the Ministry of Health of the Slovak Republic (MZ SR), it was agreed that in order to ensure the safety and protection of citizens, the environment and the reduction of risk of possible misuse or illegal handling of historical radioactive materials, JAVYS will ensure further disposal of them at its own expense.

Obr. 1: Sonda meracieho prístroja

Obr. 2: Etalón

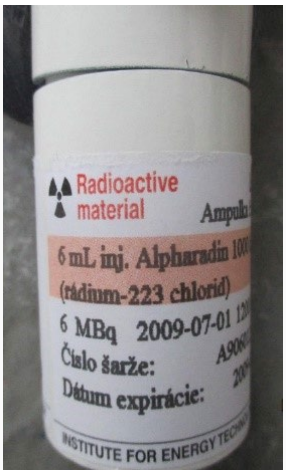
Jadrová a vyraďovacia spoločnosť dlhodobo plní celospoločenskú úlohu v oblasti záchytu, identifikácie a ďalšieho nakladania s opustenými žiaričmi, rádioaktívnymi materiálmi neznámeho pôvodu, nepoužívanými žiaričmi a inými rádioaktívnymi materiálmi. Zodpovednosť pri dlhodobom plnení tejto úlohy spočíva predovšetkým v ochrane životného prostredia a zdravia obyvateľov Slovenska. V zmysle platnej legislatívy, predpisov a rozhodnutí dozorných orgánov je JAVYS, a.s. oprávnenou organizáciou na výkon týchto činností a disponuje odborným personálom, všetkými potrebnými technickými a technologickými zariadeniami na identifikáciu, prepravu, dlhodobé skladovanie, spracovanie, úpravu a uloženie inštitucionálnych rádioaktívnych odpadov (IRAO) a rádioaktívnych materiálov neznámeho pôvodu (RMNP). V minulosti sa pre túto skupinu materiálov používal výraz zachytený rádioaktívny materiál (ZRAM). Po rozdelení ČSFR v SR neexistoval ucelený a systematický postup pre riešenie zberu, triedenia, spracovania a skladovania inštitucionálnych rádioaktívnych odpadov a zachytených rádioaktívnych materiálov. JAVYS, a.s. vypracovala a predložila Ministerstvu hospodárstva Slovenskej republiky (MHSR) dokument: „Návrh postupu pre nakladanie s IRAO a ZRAM v SR“ v rámci SR. Na jeho základe bol následne Uznesením vlády SR č.610/2009 schválený „Návrh postupu pre nakladanie s IRAO a ZRAM v SR“. Na jeho základe boli stanovené nasledovné súvisiace úlohy:

- vypracovať novelu zákona č. 238/2006 Z.z. o NJF,
- vypracovať novelu zákona č. 541/2004 Z.z. (atómový zákon),
- vypracovať novelu nariadenia vlády SR č.348/2006 Z.z. o požiadavkách na zabezpečenie kontroly vysokoaktívnych žiaričov a opustených žiaričov,
- vybudovať nejadrové zariadenie na dlhodobé skladovanie a nakladanie s IRAO a ZRAM.

Obr. 3: IRAO z prevádzky laboratórií

Obr. 4: Požiarne hlásiče

Všetky uvedené úlohy boli splnené a taktiež začiatkom roku 2016 bolo uvedené do prevádzky nejadrové zariadenie, ktoré umožňuje optimálnym spôsobom dlhodobé bezpečné a spoľahlivé nakladanie s IRAO a RMNP v SR. V súčasnom období je nakladanie s IRAO, podobne ako nakladanie s akýmkoľvek iným RAO alebo nepoužívaným žiaričom legislatívne ošetrené. Pri riešení návrhu nakladania s IRAO v SR bola prijatá celosvetovo uznávaná filozofia „polluter pays", teda za likvidáciu platí ten, kto RAO vyprodukuje. Žiaľ, na území SR sú aj subjekty, ktoré v minulom období nevyužili možnosť ich odovzdania po rozdelení ČSFR, alebo ktoré ich zdedili, prípadne také, ktoré pri zmenách vlastníckych vzťahov ani netušili, že IRAO, resp. nepoužívané žiariče vlastnia. Tieto sú v súčasnosti dlhodobo skladované v niektorých zdravotníckych zariadeniach a laboratóriách, výskumných ústavoch, vedeckých pracoviskách, v školstve, priemyselnom odvetví a podobne. Nazývame ich „historické" a nakladanie s nimi (likvidáciu) musí niekto uhradiť. Pre spoločnosť JAVYS je dlhodobo dôležitá ochrana životného prostredia a minimalizácia vplyvov ionizujúceho žiarenia na zamestnancov a obyvateľov, čo dokazuje aj svojim postojom pri riešení problematiky nakladania s historickými IRAO. Na základe vzájomných konzultácií Ministerstva hospodárstva SR (jediný akcionár spoločnosti JAVYS, a.s.), Úradu verejného zdravotníctva SR (ÚVZ SR) a Ministerstva zdravotníctva SR (MZ SR) bolo dohodnuté, že v rámci dosiahnutia zaistenia bezpečnosti a ochrany občanov, životného prostredia a zníženia rizika prípadného zneužitia alebo nelegálneho nakladania s historickými rádioaktívnymi materiálmi, JAVYS zabezpečí ďalšie nakladanie s nimi. V rámci plnenia tohto záväzku koncom decembra 2021 oslovil generálny riaditeľ JAVYS hlavného hygienika SR s informáciou o súhlase Ministerstva hospodárstva SR na odstránenie historických environmentálnych záťaží na náklady JAVYS a zároveň ho požiadal o nomináciu zástupcu ÚVZ SR do Koordinačnej a riadiacej pracovnej skupiny pre odstránenie historických environmentálnych záťaží z pohľadu radiačnej ochrany obyvateľstva",



Obr. 5: Aplikačný roztok

Obr. 6: Sklad IRAO a ZRAM

ktorá bola v JAVYS vytvorená. V priebehu prvého polroka 2022 táto skupina v súčinnosti s držiteľmi historických IRAO aktualizovala databázu spoločností a ich IRAO, zabezpečila fyzickú obhliadku a identifikáciu jednotlivých IRAO odbornými pracovníkmi JAVYS za účasti zástupcov ÚVZ SR v dotknutých subjektoch. Následne JAVYS spracoval technické podklady potrebné pre úpravu obchodného plánu a finančného rozpočtu spoločnosti, vypracoval zoznam subjektov – držiteľov IRAO s plánovaným odberom IRAO v roku 2022 a zaslal tieto dokumenty na schválenie jedinému akcionárovi. V súčasnej dobe JAVYS zabezpečuje zmluvné vzťahy s dotknutými subjektami a je pripravený realizovať odber a ďalšie nakladanie s historickými IRAO v zmysle vypracovaného zoznamu subjektov – držiteľov IRAO s plánovaným odberom IRAO v roku 2022.

Ing. Daniel Vašina

vasina.daniel@javys.sk

Po maturite v odboru Prístrojová a prevádzková technika jadrových zariadení na Strednej priemyselnej škole strojníckej v Trnave pracoval ako strojník energetických zariadení v Slovenskom energetickom podniku – Atómové elektrárne Bohunice, potom v spoločnosti Slovenské elektrárne, a. s. ako technik prevádzky MSVP, resp. vedúci oddelenia paliva VVER. Na Slovenskej technickej univerzite v Bratislave absolvoval odbor Technológie strojárskej výroby (2001, Materiálovo-technologická fakulta) a odbor Bezpečnostné aspekty prevádzky jadrových zariadení (2003, Fakulta elektrotechniky a informatiky). Od roku 2006 pracuje v spoločnosti JAVYS, a.s. v rôznych manažérskych pozíciách, od roku 2021 ako manažér odboru nakladania s VJP a úložísk.

Odolnost materiálů v prostředí AlSi12 pro účely vysokoteplotní akumulace energie

Ing. Tomáš Melichar, Ing. Radomír Filip, Ing. Martina Pazderová, Ph.D., Ing. Otakar Frýbort
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Eutektická slitina hliníku a křemíku (AlSi12) byla identifikována jako vhodný akumulační materiál pro akumulaci vysokopotenciálního tepla ve velkokapacitním systému akumulace pracujícím na principu „thermal energy storage" (TES) s využitím skupenského tepla. Koncept takového akumulačního systému vyvíjeného v Centru výzkumu Řež uvažuje akumulační nádobu s AlSi12, ve které jsou přímo umístěny teplosměnné komponenty pro nabíjení v době přebytku energie a pro odvod tepla a následnou zpětnou konverzi tepla na elektřinu v době zvýšené poptávky. Ačkoliv má zvolený akumulační materiál významné výhody (především díky vhodným tepelně-fyzikálním vlastnostem a možností propojení s různými zdroji energie včetně pokročilých jaderných systémů), značné překážky v realizaci takového systému se očekávají kvůli degradaci konstrukčních materiálů v prostředí vysokoteplotního AlSi12. Z toho důvodu byla provedena řada experimentů, založených na expozici potenciálně vhodných materiálů v prostředí AlSi12 při relevantních podmínkách. Článek stručně popisuje koncept akumulace energie s využitím AlSi12, použité experimentální zařízení, výsledky provedených testů a diskutuje vhodnost testovaných matriálů pro účely vysokokapacitní akumulace energie.

AlSi12 eutectic alloy was identified as a suitable material for high-temperature bulk energy storage based on the thermal energy storage (TES) principle with a phase change storage material. A concept of such a system that is being developed at Research Centre Řež considers a storage vessel filled with AlSi12. The heat transfer components such as heat exchangers for charging and discharging are directly immersed in the storage vessel. The concept has significant advantages, due to the suitable physical properties of the storage material and due to the potential of coupling with various power sources including advanced nuclear energy systems. However, challenges are expected especially due to the degradation of the structural materials in the high temperature eutectic alloy. For this reason, experiments were carried out based on exposure of selected materials in AlSi12 at relevant conditions. The paper briefly describes the energy storage concept, used experimental facility, and the results of the tests. The suitability of the tested materials for bulk energy storage purposes is also discussed.

ÚVOD

Akumulace energie je nezbytným prvkem v energetickém mixu s ohledem na stabilizaci přenosové soustavy a zvýšené využitelnosti zdrojů energie. S předpokládaným nárůstem využití nestabilních obnovitelných zdrojů a poklesem produkce energie z fosilních bloků bude potřeba velkokapacitní akumulace stále důležitější. Velkokapacitní akumulační systémy jsou rovněž považovány za vhodný doplněk pokročilých jaderných elektráren a malých modulárních reaktorů s omezenou možností regulace výkonu. Aktuálně je vyvíjeno a energeticky využíváno velké množství akumulačních systémů pracujících na různých principech. Jedním z principů je tzv. „thermal energy storage" (TES). Zde je energie ukládána ve formě tepla a následně využívána

v době zvýšené poptávky. Na vstupu do systému může být teplo nebo přebytková elektrická energie, která je následně na teplo konvertována. Teplo je ukládáno do akumulačního materiálu uloženého v zásobníku. V případě potřeby lze akumulované teplo konvertovat zpět na elektrickou energii, nebo pro teplárenské využití. Výhodou principu TES je možnost akumulace velkých kapacit (až jednotky GWh_e) při vysokých výkonech v řádu až stovek MW_e. Takové jednotky, využívající roztavené soli jako akumulační materiál, jsou již po světě provozovány, převážně v kombinaci se solárními CSP jednotkami. Jedná se o řešení, které je geologicky nezávislé a lze je realizovat v místě potřeby (na rozdíl od např. přečerpávacích elektráren). Vzhledem k tomu, že jde o relativně jednouchý princip, lze u TES předpokládat nižší investiční náklady a zároveň delší životnost než třeba u elektrochemických úložišť. Nevýhodou je ale nižší účinnost, především pak v případě konverze ukládaného tepla na elektřinu prostřednictvím tepelných oběhů.

V samotné kategorii TES existuje řada konceptů akumulačních systémů pracujících v různých konfiguracích při různých technických parametrech. V současné době jsou nejrozšířenější již zmíněné systémy využívající akumulační materiál v tekutém skupenství (roztavené soli) a s parním oběhem pro konverzi tepla na elektrickou energii. V různých stupních vývoje jsou však i koncepty využívající akumulační materiál v pevném skupenství nebo materiály se změnou fáze, jejich výhodou oproti solným systémům mohou být například vyšší provozní teploty.

Následující text je zaměřen na popis dílčích výsledků vývoje akumulačního konceptu TES, který předpokládá akumulaci tepla s využitím skupenské změny akumulačního materiálu. Koncept, který byl navržen a je rozvíjen v Centru výzkumu Řež, je tvořen zásobníkem s akumulačním materiálem [1, 2]. Přímo v zásobníku jsou v akumulačním materiálu ponořeny teplosměnné prvky pro nabíjení a vybíjení akumulátoru. Jako vhodný akumulační materiál byla zvolena eutektická slitina hliníku a křemíku AlSi12. Výhodou tohoto materiálu je příznivá teplota tavení (přibližně 577 ˚C), která stanovuje provozní teplotu akumulátoru. Akumulace tepla na relativně vysoké teplotě je výhodná při následném využití pro konverzi na elektřinu nebo pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla prostřednictvím tepelného oběhu. Zároveň může být systém vhodný pro propojení s koncepty pokročilých jaderných energetických systémů pracujících s chladivem na vysokých teplotách (např. plynem chlazené reaktory). Výhodou slitiny AlSi12 jsou i další tepelně fyzikální vlastnosti, jako je vysoké skupenské teplo (520 kJ/kg) a vysoká tepelná vodivost. Tyto vlastnosti vedou ke kompaktnímu řešení s vysokou hustotou akumulace a bez nutnosti použití aktivních prvků (např. čerpadel) v prostředí akumulačního materiálu. Nevýhodou jsou pak především nároky na konstrukční materiály interagující s akumulačním materiálem. Jedná se o materiály samotné akumulační nádoby a také o materiály komponent ponořených přímo v akumulačním materiálu. V případě nabíjení přebytkovou elektrickou energií jsou to odporové topné tyče, v případě nabíjení vysokopotenciálním teplem jsou to teplosměnné elementy tepelného výměníku. Integrovaný tepelný výměník je použit i pro vybíjení zásobníku prostřednictvím média tepelného oběhu. Tyto komponenty jsou pak vystaveny degradaci vlivem koroze intenzifikované relativně vysokou provozní teplotou. Rovněž musí odolat termomechanickému namáhání vlivem nerovnoměrného teplotního pole, objemovým změnám akumulačního materiálu při změně fáze a u tepelných výměníků i vnitřnímu přetlaku, v závislosti na zvolené konfiguraci systému. Volba vhodných materiálů ovlivní životnost, spolehlivost, a tedy i technicko-ekonomické parametry systému.

Za účelem identifikace vhodných materiálů byly v rámci projektu Národní centrum pro energetiku podpořeného TA ČR provedeny experimentální analýzy degradace vybraných materiálů. Na základě dostupných informací i prvních testů bylo zjištěno, že běžně používané kovové materiály jsou nevhodné kvůli vysoké míře koroze. Jako korozně odolné se naopak jeví keramické materiály (např. Al_2O_3) [3], které mohou být na naneseny na základní kovový materiál. V další sekci budou popsány výsledky prvních materiálových testů provedených při podmínkách odpovídajících

Obr. 1: Vzorek s povlakem z Al_2O_3

provozním parametrům akumulátoru. Zmíněny budou testy s metalickými materiály bez povlaku (austenitická ocel 316, titan, hliník) a s materiály s ochrannou vrstvou z Al_2O_3 (Obr. 1) a $ZrSiO_4$. Dále byla hodnocena celistvost povlaku při deformaci způsobené vnitřním přetlakem. V závěru pak budou výsledky hodnoceny s ohledem na další vývoj inovativního konceptu akumulace energie.

EXPERIMENTÁLNÍ HODNOCENÍ

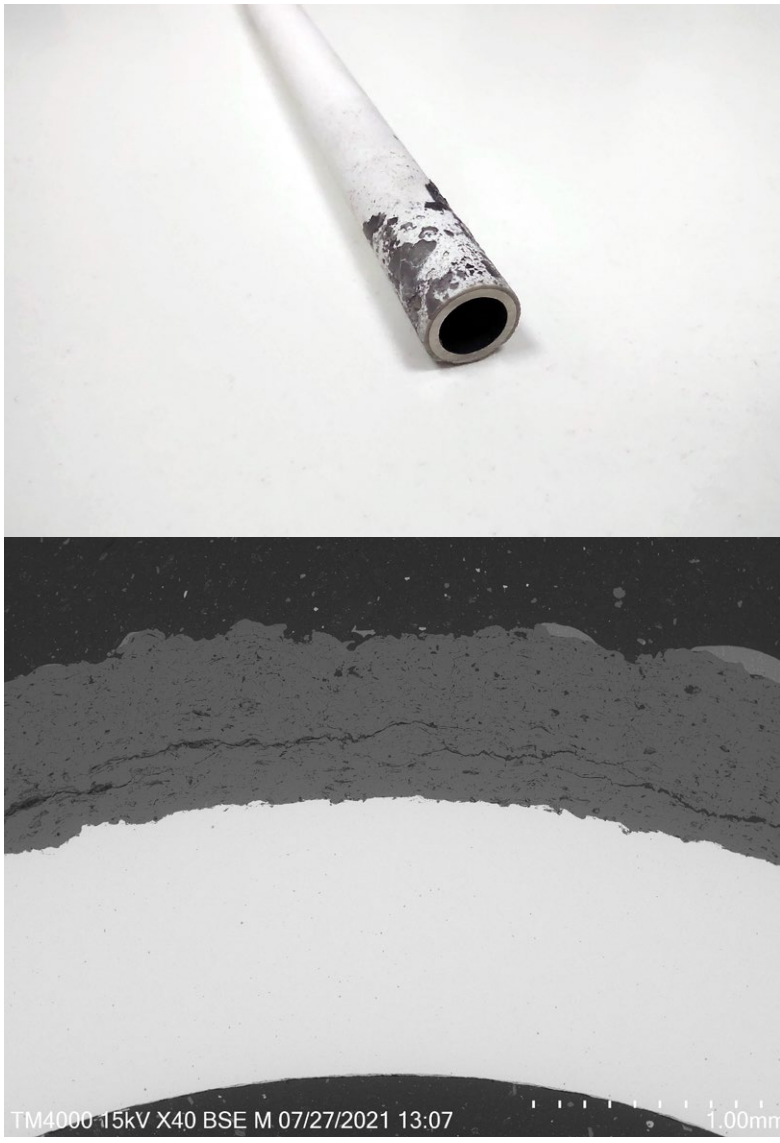
Vzorky testovaných materiálů byly ve formě trubiček o vnějším průměru 10 mm a tloušťce stěny 1 mm. Hlavní částí experimentálního zařízení byl autokláv s topnou soustavou o výkonu 6 kW s možností dosažení až 700 °C v testovací sekci. Testovací sekce byla tvořena keramickou kyvetou o vnitřním průměru 20 mm, umístěnou uvnitř autoklávu. Kyveta byla vyplněna 50 ml AlSi12 v průmyslové čistotě, která je kvůli nižší ceně předpokládána i u případného energetického využití. Kromě hliníku slitina obsahuje 11,6 % Si, dále pak příměsi Fe (0,6 %), Mn (0,24 %), Cu (0,035 %), Zn (0,07 %), Mg (0,02 %), Ti (0,02 %) a další příměsi s podílem menším než 0,01 %. Po roztavení slitiny byl do kyvety zasunut vzorek testovaného materiálu a inertní atmosféra byla v autoklávu udržována prostřednictvím kontinuálního proplachu argonem. Příruba autoklávu byla chlazena vodním okruhem. Uvnitř testovaného vzorku byl umístěn termočlánek pro kontinuální měření teploty v testovací sekci. Expozice vzorků byla provedena při teplotě 600 °C, což je považováno za horní limit provozu akumulačního zařízení.

V první fázi byly testovány metalické vzorky bez povlaku. Vzorek z materiálu AW6060 (AlMgSi, přibližně 99 % hliníku) s oxidickou (eloxovou) vrstvou na povrchu byl zvolen na základě předpokladu nízké rozpustnosti materiálu v prostředí hliníkové slitiny. Ačkoliv po vyjmutí a rozřezu nebylo po 200hodinové expozici na povrchu vzorku vizuálně pozorováno výraznější korozní poškození, u materiálu došlo k významné ztrátě pevnosti vlivem vyžíhání a vzorek bylo možné deformovat vyvinutím velmi malé síly. Vzhledem k potřebě zajištění potřebných mechanických vlastností tak nebyl materiál dále testován.

Dalším z testovaných materiálů byl titan, s ohledem na jeho nižší rozpustnosti v hliníku než u materiálů obsahujících železo [4]. Vzorek byl exponován po dobu 1 000 hodin. Po vyjmutí byla v řezu vidět značná deformace vzorku a došlo k jeho protavení s následným vnikem slitiny AlSi12 dovnitř vzorku. Na základě toho bylo použití titanu pro daný účel vyhodnoceno jako nevhodné. Během experimentu navíc došlo k zatuhnutí testovací slitiny i při provozu na 600 °C, což znamená změnu chemického složení slitiny. Podobný výsledek byl pozorován i při expozici vzorku z austenitické oceli 316. Vzhledem k vysoké rozpustnosti železa ve slitině AlSi12 došlo v průběhu expozice k výraznému úbytku materiálu vzorku a následně i k jeho deformaci (Obr. 2). Opět bylo pozorováno zvýšení teploty tavení testovací slitiny.

Další fáze se věnovala experimentům vzorků s keramickými ochrannými vrstvami. Zvoleny byly materiály Al_2O_3 a $ZrSiO_4$. Povlaky o tloušťce přibližně 0,5 mm byly naneseny metodou plazmového nástřiku. Vzorky ve tvaru trubičky o vnějším průměru 10 mm byly připraveny z nerezového oceli 316. Expozice obou vzorků trvala opět 1 000 hodin při teplotě 600 °C.

Obr. 2: Řez exponovaného vzorku z austenitické oceli po 1 000 hodinách



Obr. 3: Vzorek s Al_2O_3 povlakem po rozřezání (nahoře), snímek ze SEM (dole)

Po vyjmutí vzorků z testovací slitiny bylo provedeno hodnocení povrchu a následně i řezu pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM). Na rozdíl od expozice čistě metalických vzorků, při expozici Al_2O_3 vrstvy nedošlo k zatuhnutí testovací slitiny během experimentu, došlo tedy k minimální změně chemického složení a teplota tavení zůstala bez výrazných změn. Při prvotním hodnocení povrchu nebylo zřejmé žádné poškození keramické vrstvy. Při následné analýze řezu pomocí SEM nebyla pozorována degradace vnějšího povrchu vrstvy. Rozhraní mezi keramickou vrstvou a základním materiálem bylo spojité, nedošlo tedy k odlupování vrstvy od základní trubičky, přilnavost vrstvy k substrátu byla dobrá. Uvnitř vrstvy byly po obvodu pozorovány mikrotrhliny, které mohou být způsobeny teplotními roztažnostmi během experimentu, nebo při následné přípravě vzorků na hodnocení řezu. Pohled na vzorek po rozřezání a snímek řezu z SEM jsou na Obr. 3. Stejné hodnocení bylo provedeno i na vzorku s vrstvou ze $ZrSiO_4$, u kterého byla předpokládána vyšší houževnatost a nižší smáčivost. Podobně jako u předchozího materiálu nebylo zjištěno korozní poškození povrchu vrstvy. Došlo však k porušení soudržnosti vrstvy se základním materiálem, kdy po řezu bylo prakticky možné vrstvu stáhnout ze základní trubičky. V takovém případě by vrstva

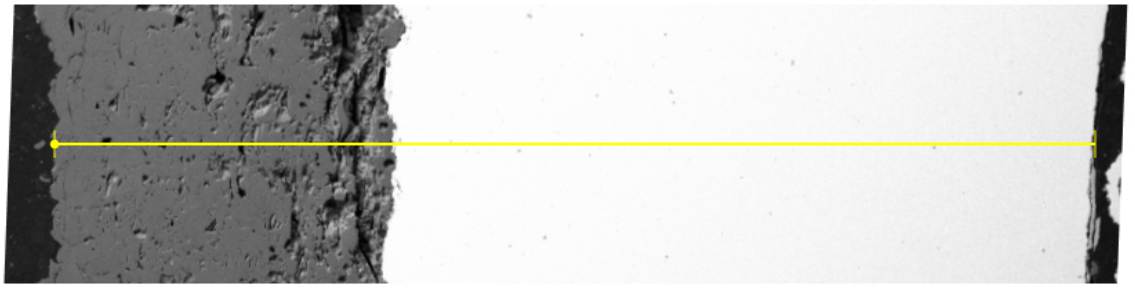
byla pro danou aplikaci nevhodná, existuje však možnost optimalizace procesu nanášení vrstvy pro zlepšení jejich vlastností.

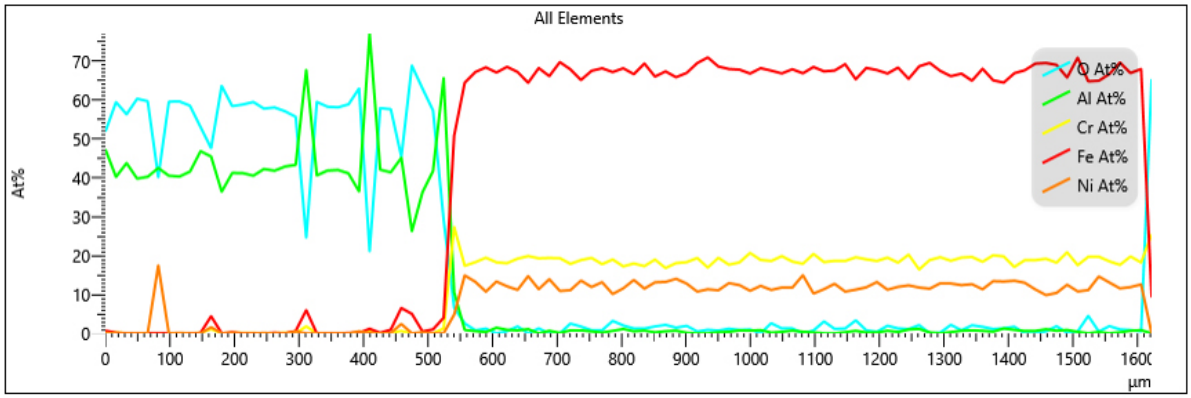
Kromě korozních experimentů byly provedeny i jednoduché testy pro ověření celistvosti vrstvy při deformaci vlivem mechanického napětí. Použity byly stejné vzorky (které nebyly vystaveny korozním testování). Test souvisí především s ověřením aplikace pro elementy tepelných výměníků, u kterých se předpokládá vnitřní přetlak s následnou deformací základního materiálu i nanesené vrstvy. Experiment byl proveden metodou měření akustické emise při případném praskání vrstvy pro oba zvolené keramické materiály (Al_2O_3 a $ZrSiO_4$). Trubička s vrstvou byla postupně tlakována pomocí vodní pumpy v rozmezí přetlaku 0–60 MPa, přičemž přibližně nad hodnotou 50 MPa by měla být překročena mez kluzu základního materiálu. Při provozu reálného akumulačního zařízení s konverzním cyklem se superkritickým CO_2 bez vloženého meziokruhu by se provozní tlaky ve výměníku pohybovaly kolem 25 MPa. Během testu byl zkoumaný povlak osazen širokopásmovou sondou akustické emise připojené na osciloskopický přístroj s vysokou vzorkovací frekvencí a možností dlouhého záznamu signálu. Do její blízkosti byl též umístěn dynamický mikrofon s aparaturou. Záznam byl prováděn nezávisle na dvou počítačích. Po důkladném rozboru všech naměřených dat bylo konstatováno, že nedošlo ani k postupnému ani k náhlému uvolňování akustického tlaku během experimentu a je možné se domnívat, že se žádný z obou nástřiků neoddělil od základního materiálu trubičky ani nepopraskal.

ZÁVĚRY

Provedeno bylo základní hodnocení vybraných materiálů z hlediska jejich odolnosti v prostředí AlSi12 při podmínkách odpovídajících vysokoteplotnímu akumulátoru tepelné energie. Zajištění životnosti konstrukčních materiálů je hlavním úkolem před implementací tohoto konceptu akumulace. Korozní testy ukázaly, že testované kovové materiály (austenitická ocel, titan) nejsou vhodné pro dané prostředí z důvodu vysoké míry koroze a materiály na bázi hliníku

Obr. 4: Analýza chemického složení (SEM/EDS) průřezu vzorku





nevyhověly z důvodu poklesu mechanických vlastností. Dále byly testovány vzorky s ochrannou keramickou vrstvou. U sledovaných vrstev byla při experimentu zjištěna dobrá korozní odolnost. Detekovány však byly mechanické poruchy (vnitřní trhliny u Al_2O_3, které by mohly být způsobeny řezem pro účely mikroskopických analýz) a porušení soudržnosti mezi vrstvou a základním materiálem u $ZrSiO_4$. Dále bylo pomocí akustické emise měřeno porušení vrstev při deformaci vlivem tlakové zkoušky. Při těchto experimentech nebylo zjištěno porušení vrstev. Použití ochranných keramických vrstev se tedy jeví jako slibné řešení pro danou aplikaci, nicméně je nezbytné provedení dalších komplexních testů se simulací provozních podmínek zařízení při dlouhodobém provozu.

Výsledky budou využity při realizaci malé demonstrační jednotky zmíněného konceptu akumulačního systému. Tato demonstrační jednotka bude sloužit k ověření termo-fyzikálních parametrů zařízení, ale vzhledem k předpokládanému provozu v akumulačních cyklech budou získána i data k chování a degradaci konstrukčních materiálů. Získané zkušenosti s provozem pak mohou být využity pro návrh kompaktní akumulační jednotky v energetickém měřítku, která může být provozována v kombinaci s různými energetickými zdroji včetně obnovitelných nebo jaderných.

Článek vznikl v rámci řešení projektu TN01000007 Národní centrum pro energetiku v Programu na podporu aplikovaného výzkumu, experimentálního vývoje a inovací Národního centra kompetence podpořeného Technologickou agenturou ČR.

Reference:
[1] T. Melichar, O. Frýbort, R. Filip, Vývoj velkokapacitní akumulace energie v CVŘ, Jaderná energie číslo 3/2022, ročník 3 [68], 2022
[2] T. Melichar, K. Dočkal, O. Frýbort, P. Hájek, R. Filip, Thermal design of latent heat thermal energy storage facility with supercritical CO_2, 4th European sCO_2 Conference for Energy Systems: March 23–24, 2021, online conference
[3] Y. Zhao, H. Liu a C. Zhao, Experimental study on the cycling stability and corrosive property of Al-Si alloys as phase change materials in high-temperature heat storage, Solar energy Materials and Solar Cells 203 (2019) 110165
[4] F. Wang, X. Wang, Q. Yan, J. Cui, Corrosion Behavior of TC4 Titanium Alloys in Al-Li Alloy Melt, Metals 2021, 11, 794. https:// doi.org/10.3390/met11050794

Ing. Tomáš Melichar

tomas.melichar@cvrez.cz

Na Fakultě strojní ČVUT v Praze absolvoval magisterský obor Jaderná energetické 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.

Využití organického materiálu MAKROCLEAR

pro radiochromickou integrující dozimetrii hadronových svazků

Mgr. David Zoul[1], Ing. Markéta Koplová, Ph.D.,[1] Ing. Václav Zach[2]

[1] Centrum výzkumu Řež s.r.o.

[2] Ústav jaderné fyziky AV ČR, v. v. i.

V roce 2021 byla v Laboratoři cyklotronů a generátorů rychlých neutronů (LC&FNG) provedena série pokusných ozáření radiochromických integrujících dozimetrů MAKROCLEAR protonovými a deuteronovými svazky urychlenými na cyklotronu U-120M. Tyto dozimetry jsou vyvíjeny v Centru výzkumu Řež od roku 2016. Dozimetry připravené ve tvaru drobných kvádrů byly postupně ozářeny protony o energii 15,5 MeV a 34 MeV v dávkách 500 Gy, 2 500 Gy, 5 000 Gy, 7 500 Gy a 10 000 Gy. Další série dozimetrů byla ozářena deuterony o energii 17 MeV v dávkách 5 000 Gy, 10 000 Gy, 15 000 Gy. Výsledky analýz prokázaly, že dozimetry MAKROCLEAR jsou skvěle využitelné jako levné a snadno dostupné integrující dozimetry protonů v oblasti dávek do přibližně 7,5 kGy, kde je jejich odezva v bílém světle prakticky lineární dávce (s prahem detekovatelnosti okolo 100 Gy). Ještě vyšší měřicí rozsah byl zaznamenán v případě deuteronů, kde byla odezva dozimetrů lineární dávce minimálně do 15 kGy. K nesporným výhodám dozimetrů MAKROCLEAR oproti jiným typům patří jejich snadná příprava v požadovaném tvaru a velikosti, jejich jednoduchá dostupnost a velmi nízká pořizovací cena. Rovněž jejich vyhodnocení je levné, snadné a rychlé. Bez potřeby nákladného či objemného laboratorního vybavení lze v řádu minut získat 3D informaci o dávkovém profilu hadronového svazku a hloubkové dávkové křivce. Protože má materiál dozimetru pouze o 8 % vyšší hustotu, než je průměrná hustota lidského těla, lze metodu využít též v hadronové radioterapii onkologických onemocnění.

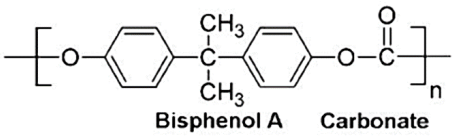
In 2021, the Laboratory of Cyclotrons and Fast Neutron Generators (LC&FNG) performed a series of experimental irradiations of MAKROCLEAR radiochromic integrating dosimeters by proton and deuteron beams accelerated on a U-120M cyclotron. These dosimeters have been developed at the Research Centre Řež since 2016. Dosimeters prepared in the form of small blocks were successively irradiated by protons with an energy of 15.5 MeV and 34 MeV in doses of 500 Gy, 2,500 Gy, 5,000 Gy, 7,500 Gy, 10,000 Gy. Another series of dosimeters was irradiated by 17 MeV deuterons at doses of 5,000 Gy, 10,000 Gy, 15,000 Gy. The results of the analyses showed that MAKROCLEAR dosimeters are very useful as inexpensive and readily available integrating proton dosimeters in the dose range up to about 7.5 kGy, where their response in white light is practically linear with dose (with a detection threshold of about 100 Gy). An even higher measuring range was recorded in the case of deuterons, where the response of dosimeters was linear with dose at least 15 kGy. The undeniable advantages of MAKROCLEAR dosimeters compared to other types include their easy preparation in the required shape and size, their easy availability and very low purchase price. Their evaluation is also cheap, easy and fast. Without the need for expensive or bulky laboratory equipment, 3D information about the hadron beam dose profile and depth dose curve can be obtained in a matter of minutes. Because the dosimeter material has only an 8 % higher density than the average density of the human body, the method can also be used in hadron radiotherapy for oncological diseases.

Obr. 1: Laboratoř cyklotronů a generátorů rychlých neutronů Ústavu jaderné fyziky AV ČR – nahoře centrální velín cyklotronu U-120M, dole výstup svazku z cyklotronu U-120M

ÚVOD

V roce 2021 byla v Laboratoři cyklotronů a generátorů rychlých neutronů (LC&FNG) provedena série pokusných ozáření radiochromických integrujících dozimetrů MAKROCLEAR protonovými a deuteronovými svazky urychlenými na cyklotronu U-120M. LC&FNG je součástí výzkumné infrastruktury CANAM (Center of Accelerators and Nuclear Analytical Methods) Ústavu jaderné fyziky AV ČR (Obr. 1). [1]

Dozimetry MAKROCLEAR jsou vyvíjeny v Centru výzkumu Řež na pracovišti Radiochemie II od roku 2016. Jedná se o pevnolátkový čirý organický polymerní materiál (Obr. 2), reagující na ozáření změnami své optické denzity. Tyto změny pro malé dávky nastávají nejprve v blízké UV oblasti spektra, následně se rozšiřují do světelné oblasti a pro ještě vyšší dávky přecházejí až do infračervené oblasti spektra.



Obr. 2: Polykarbonát (PC) – základní strukturní jednotka organického materiálu MAKROCLEAR

Dozimetry vyhodnocujeme spektrofotometricky, nejjednodušší metodou je skenování na transmisním skeneru Epson Perfection 850-Pro přes sérii barevných filtrů propouštějících jen vybrané vlnové délky světla. Protože má materiál dozimetru pouze o 8 % vyšší hustotu, než je průměrná hustota lidského těla, lze metodu využít též v hadronové terapii onkologických onemocnění. [2] [3] [4] [5] [6] [7]

INTERAKCE TĚŽKÝCH NABITÝCH ČÁSTIC S PROSTŘEDÍM LIDSKÉHO TĚLA A TKÁNI EKVIVALENTNÍMI MATERIÁLY

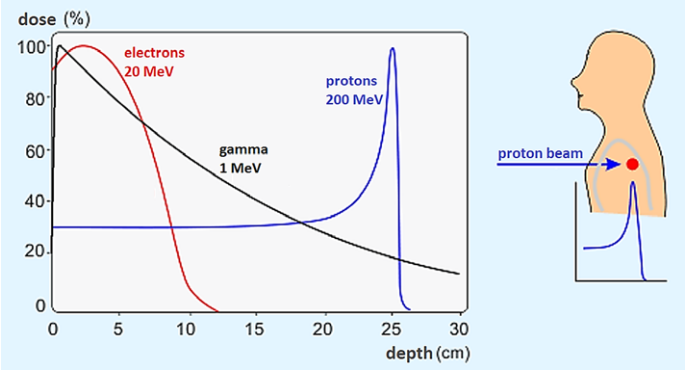
V konvenční radiační onkologii se využívá ozařování pomocí fotonových nebo elektronových svazků, jejichž zdrojem bývají lineární urychlovače. Nejvíce energie je těmito částicemi předáváno tkáním ležícím na povrchu těla nebo těsně pod ním (Obr. 3). S rostoucí hloubkou průniku do tkáně dochází u fotonů po prudkém počátečním nárůstu k exponenciálnímu poklesu předávané energie. Místa ležící před cílovou oblastí mohou být jednotlivými svazky ozářena více než vlastní ložisko. Určité radiační zátěži jsou vystavena i místa ležící za cílovou oblastí. Ozařováním z více polí lze vliv těchto nepříznivých vlivů do značné míry snížit. Pro mnohé nádory ležící v těsné blízkosti kritických orgánů vede radioterapie konvenčními svazky k vyššímu riziku nepřípustného poškození těchto struktur. [8]

Těžké nabité částice (protony, deuterony, tralphiony, alfa částice a další ionty) při průchodu prostředím ztrácejí svoji energii především prostřednictvím srážek s elektrony vázanými v molekulách ozařovaného prostředí. U protonů nemají v terapeuticky využívané oblasti energií (přibližně 50 až 250 MeV) reakce s atomovými jádry významný vliv. Tyto reakce je však zapotřebí vzít v úvahu pro lehké ionty, například ionty uhlíku. Často při nich dochází ke vzniku sekundárních částic, které podstatně ovlivňují proces předávání energie nabitých částic prostředí. Interakce nabitých částic s prostředím je velmi dobře popsána pomocí Betheho-Blochovy teorie. Tato teorie popisuje nejen ztráty energie, ale i boční rozptyl částice a její dolet. [8]

Urychlené těžké nabité částice při průchodu hmotou ionizují atomy podél své dráhy, a tím postupně ztrácejí svoji kinetickou energii, až svoji dráhu ukončí v hloubce, kterou lze vypočítat v závislosti na druhu a počáteční energii částice a druhu látky, v níž je energie předávána. Právě ke konci dráhy doletu těžké nabité částice dochází k prudkému nárůstu ionizace, neboť s ubývající rychlostí rychle roste účinný průřez pro rezonanční záchyt částice. V těchto místech tak dochází ke strmému nárůstu dávky. Spádový graf (Braggova křivka) tak vykazuje ke konci dráhy tzv. Braggův pík. [8]

Tvar Braggovy křivky je hlavní principiální výhodou nabitých částic z pohledu jejich terapeutického využití. Těžké nabité částice odevzdávají během průchodu prostředím relativně velmi malou část své energie a většinu energie předají až těsně před koncem své dráhy. Dolet těchto částic je navíc velmi dob-

Obr. 3: Vlevo hloubkové dávkové křivky fotonů 1 MeV (černě), elektronů 20 MeV (červeně), protonů 200 MeV (modře). Vpravo princip využití Braggova píku pro transport vysoké dávky do nádorového ložiska v hloubce, zdroj: [8]



ře vymezen. Těžké nabité částice dále oproti částicím používaným při konvenčním ozařování téměř nepodléhají bočnímu rozptylu, procházejí tkání prakticky v přímém směru. Dávka v Braggově vrcholu může mít až 2,5× větší hodnotu (pro záporně nabité π mezony), než v oblasti plata Braggovy křivky. Prakticky to znamená, že tkáně, kterými svazek prochází, absorbují 2,5× menší dávku záření než v oblasti Braggova vrcholu, kde se nachází cílový objem. [8]

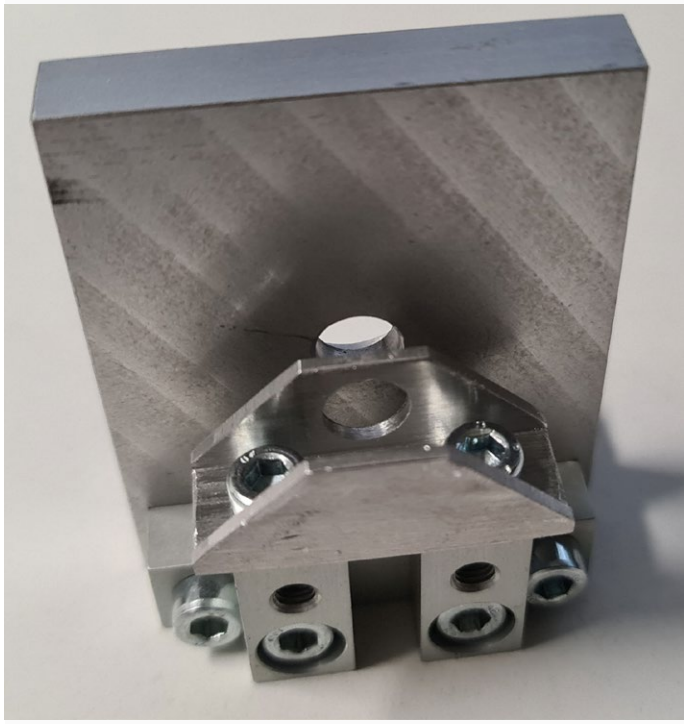
PRŮBĚH EXPERIMENTU

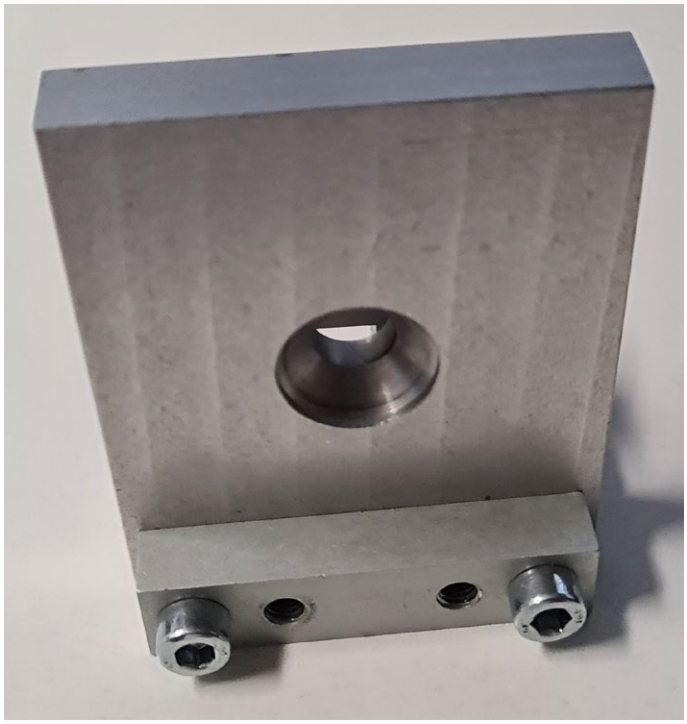
Dozimetry připravené ve tvaru kvádrů o rozměru 10 × 10 × 10 mm, nebo 10 × 10 × 20 mm byly umístěny svým nejdelším rozměrem rovnoběžně s osou hadronového svazku do speciálního hliníkového držáku, za hliníkový kolimátor tloušťky 10 mm s aperturou průměru 9 mm tak, aby osa protonového svazku procházela středem vzorku (Obr. 4 a 5).

Před ozařováním byl hadronový svazek těsně před aperturou kolimátoru dozimetricky monitorován kalibrovaným dozimetrickým systémem tvořeným Farmerovou ionizační komorou připojenou k elektrometru UNIDOS. Dávkový příkon v Braggově maximu byl pro jednotlivé energie hadronů stanoven při proudu 0,04 μA, při kterém byly následně ozářeny též dozimetry MAKROCLEAR. Jednotlivé vzorky byly postupně ozářeny protony o energii 15,5 MeV a 34 MeV v dávkách 500 Gy, 2 500 Gy, 5 000 Gy, 7500 Gy, 10 000 Gy. Další série vzorků byla ozářena deuterony o energii 17 MeV v dávkách 5 000 Gy, 10 000 Gy, 15 000 Gy.

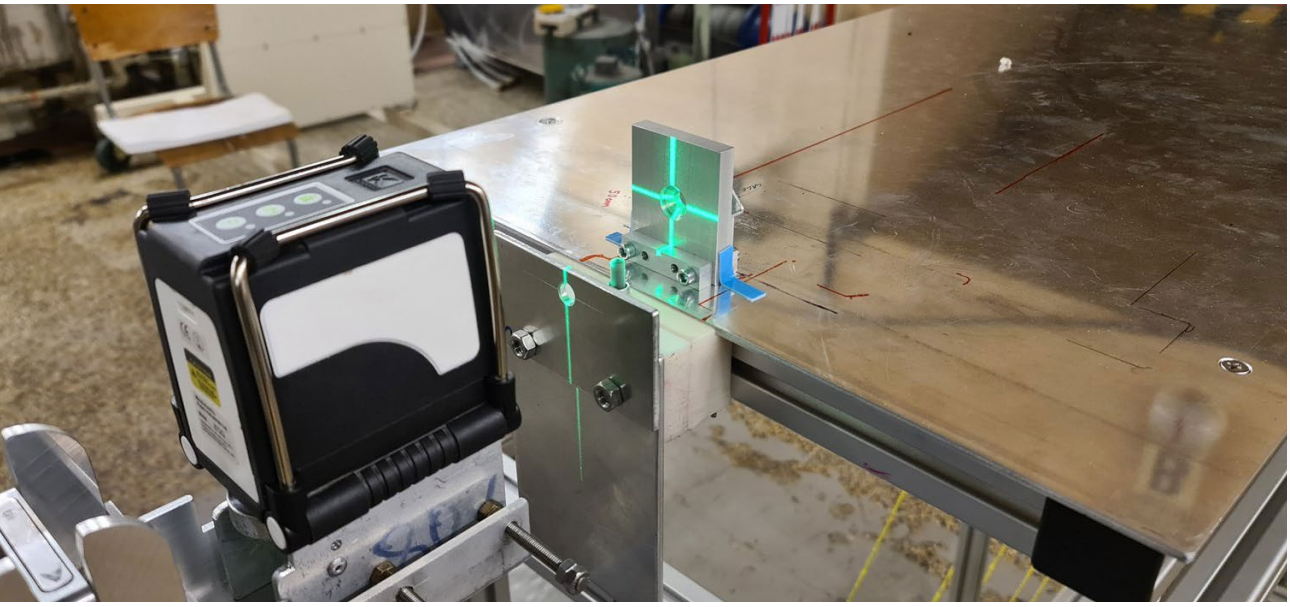
VYHODNOCENÍ DOZIMETRŮ OZÁŘENÝCH PROTONOVÝMI SVAZKY, V POLYCHROMATICKÉM SVĚTLE

Po pečlivém očištění následovalo skenování ozářených dozimetrů na transmisním skeneru Epson Perfection 850-Pro v bílém (polychromatickém) světle se střední vlnovou délkou 550 nm (Obr. 6). Skenování probíhalo podél osy svazku pro získání informace o hloubkové dávkové křivce (tzv. Braggově křivce) příslušného druhu záření.

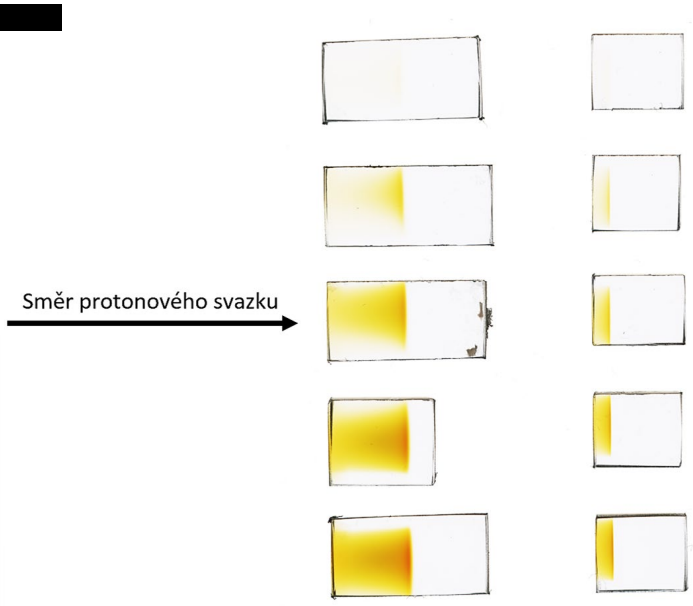




Obr. 4: Hliníkový kolimátor tloušťky 10 mm, s kruhovou aperturou průměru 9 mm a vzorkovnicí



Obr. 5: Přesné nastavování kolimátoru se vzorkovnicí do centrální osy svazku pomocí laserových zaměřovačů

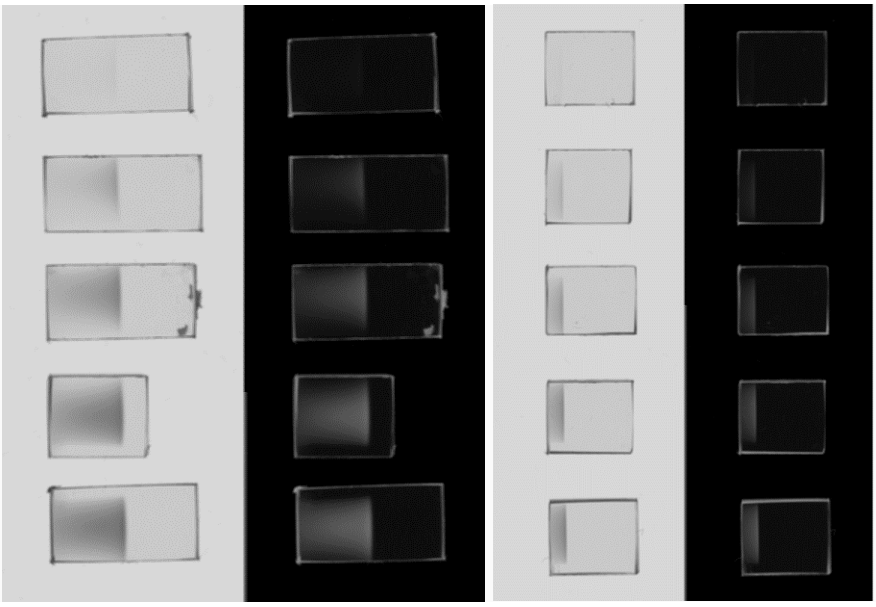


Obr. 6: Transmisní skeny dozimetrů MAKROCLEAR ozářených protonovým svazkem (přicházejícím z levé strany) o energii 34 MeV (vlevo) a 15,5 MeV (vpravo), v dávkách (shora) 500 Gy, 2 500 Gy, 5 000 Gy, 7 500 Gy, 10 000 Gy

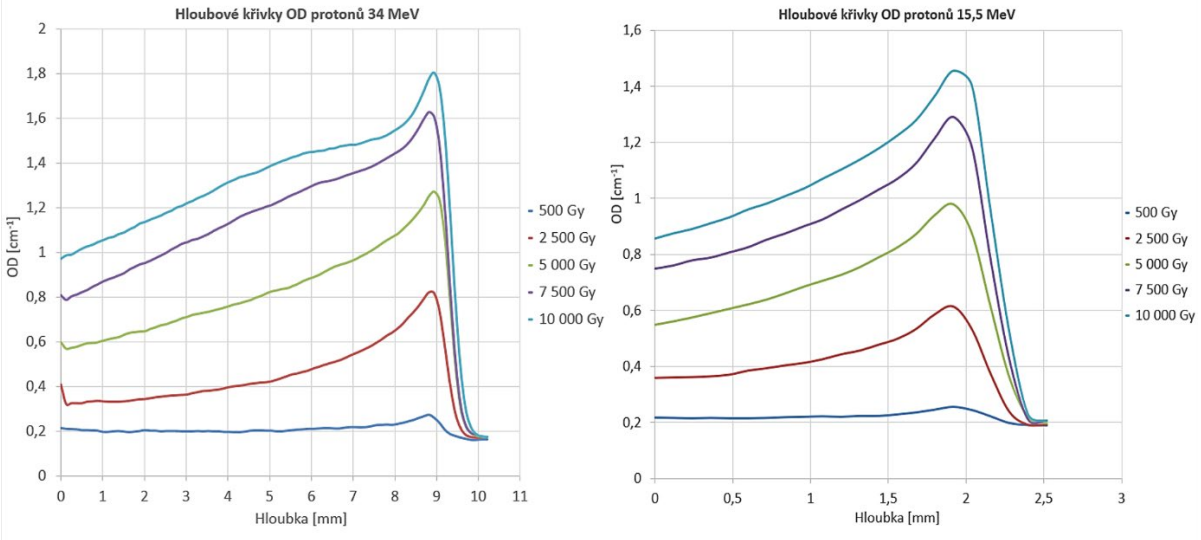
Bitmapy získané skenováním byly následně konvertovány prostřednictvím speciálně vytvořeného kódu v programovacím jazyce Ruby do matice hodnot s osmibitovou hloubkou dle stupně zčernání. Tyto matice byly importovány do tabulkového procesoru Excel, kde byly opětovně zrekonstruovány původní obrazy ve stupních šedi, prostřednictvím podmíněného formátování buněk (Obr. 7). Data byla v dalším kroku zbavena šumu způsobeného mikroskopickými prachovými částicemi a nečistotami, které i přes důkladné očištění dokázaly ulpět na povrchu vzorků. K tomu byla využita konvoluce filtrem s dolní propustností (integrace obrazu). Konvoluční jádro tvořila matice rozměru 3 × 3.

Přesným změřením rozměru každého vzorku mikrometrickým měřidlem a porovnáním s počtem voxelů, které zaujímal obraz vzorku v Excelu, byl stanoven rozměr jednoho voxelu a tím i správná rozměrová škála jednotlivých prvků v obraze. To umožnilo sestrojit grafy hloubkových dávkových křivek a dávkových profilů jednotlivých použitých svazků, v rozměrové škále odpovídající realitě (Obr. 8).

Obr. 7: Rekonstrukce transmisních skenů z Obr. 6 v tabulkovém procesoru Excel, po odstranění šumu konvolučním filtrem s dolní propustností – vlevo pozitiv, vpravo negativ

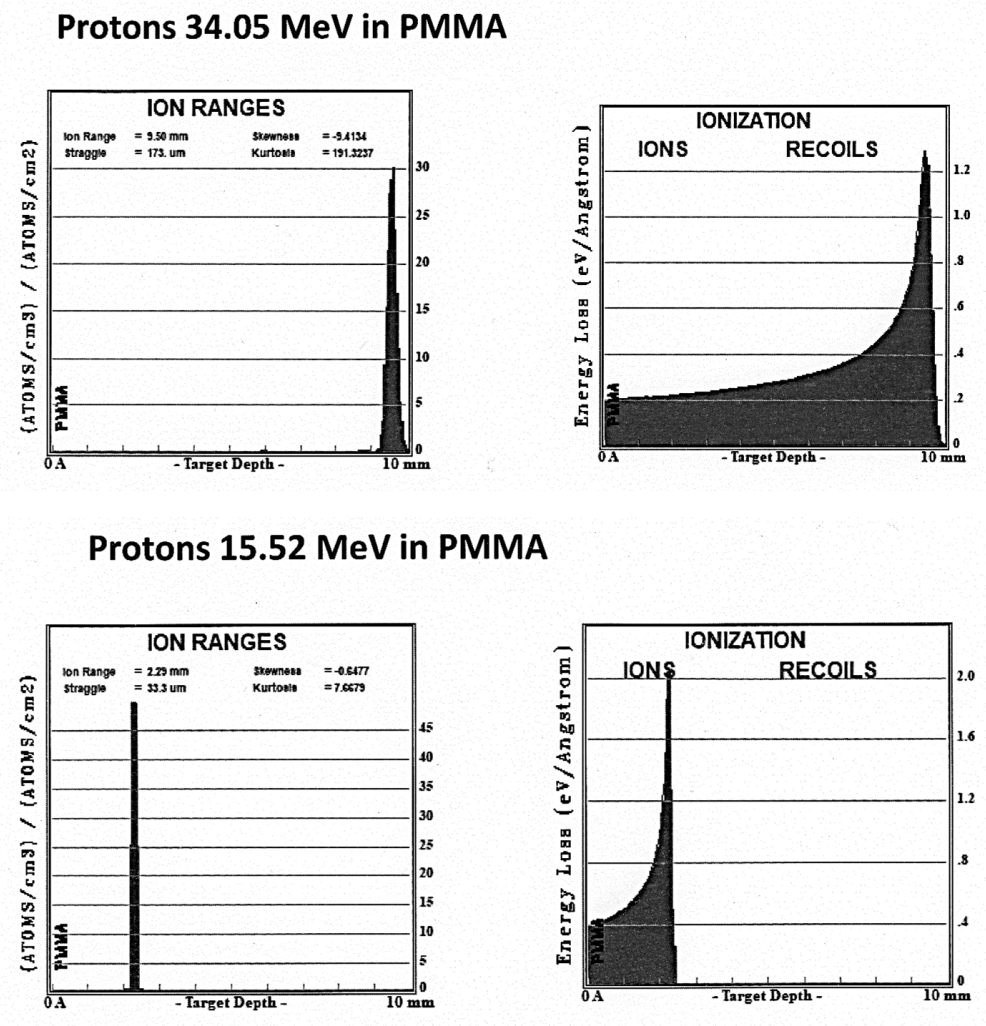


Obr. 8: Grafy hloubkových průběhů optické denzity (OD) odečtené z transmisních skenů dozimetrů MAKROCLEAR – vlevo hloubkové průběhy OD protonového svazku o energii 34 MeV, vpravo hloubkové průběhy OD protonového svazku o energii 15,5 MeV; jednotlivým hloubkovým křivkám odpovídají absorbované dávky, viz legenda napravo



Kontrolní teoretický model doletu protonů výše uvedených energií a polohy Braggových píků byl proveden ve výpočetním programu SRIM pro materiál PMMA (polymethylmetakrylát), který má jen o málo nižší hustotu (1 180 kg/m³) než PC (1 200 kg/m³) (Obr. 9). Zaznamenané odchylky, které lze připsat na vrub mj. několikaprocentnímu rozdílu v hustotě obou materiálů, nepřesahují 0,5 mm.

Optická denzita (OD – svislá osa v grafech) byla stanovena jako podíl absorbance A, tedy

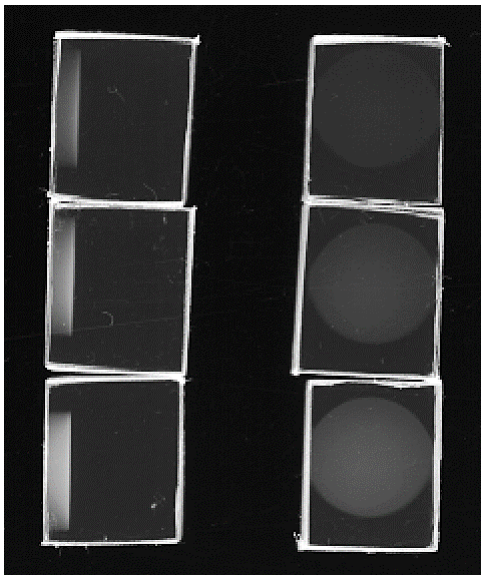


Obr. 9: Teoretický model dosahu protonů uvedených energií v materiálu PMMA

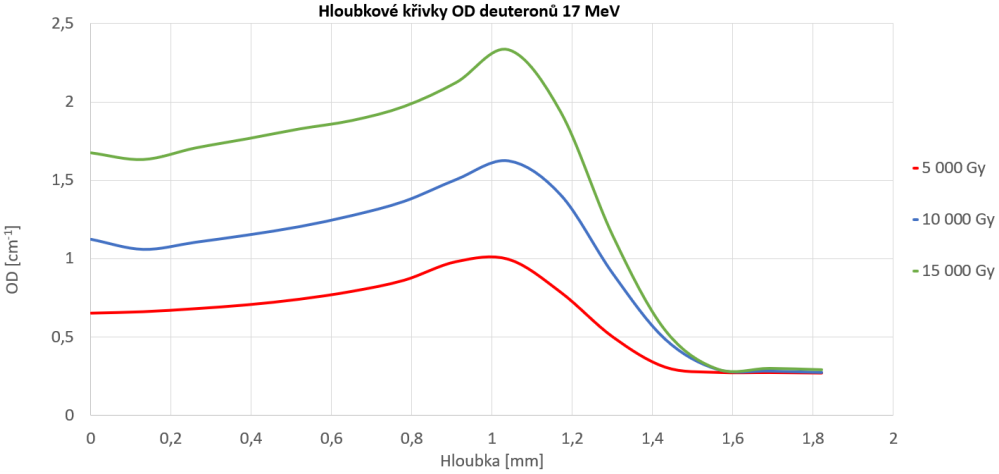
dekadického logaritmu podílu intenzity záření dopadajícího na vzorek I_0 (střední hodnota intenzity světla mimo oblast vzorku) a intenzity záření prošlého vzorkem I, a tloušťky oblasti zčernání d (aby bylo možné absolutní srovnání míry zčernání u vzorků exponovaných i skenovaných různými způsoby). Neboli

$$OD = \frac{A}{d} = \frac{1}{d} \log \frac{I_o}{I}$$

Z Obr. 8 je patrno, že odezva dozimetrů MAKROCLEAR je v bílém světle prakticky lineární dávce v oblasti dávek do přibližně 7,5 kGy, s prahem detekovatelnosti okolo 100 Gy. Nad touto dávkou je již patrná saturace dozimetru a optické zčernání přestává být lineární dávce, ačkoli jsou různé dávky bez problémů opticky rozlišitelné i při hodnotách okolo 10 kGy. To je rozsah přibližně 20× menší, než jaký byl u stejných dozimetrů již dříve pozorován po jejich expozici fotonům gama kobaltu 60. [5] [6] [9] [10] [11] [12] To však odpovídá poměru LET pro fotony a protony použitých energií, což ukazuje na skutečnost, že dozimetry



Obr. 10: Excelovská rekonstrukce bočních (vlevo) a čelních (vpravo) transmisních skenů dozimetrů MAKROCLEAR ozářených deuteronovým svazkem o energii 17 MeV dávkami v Braggově maximu (shora) 5 000 Gy, 10 000 Gy, 15 000 Gy



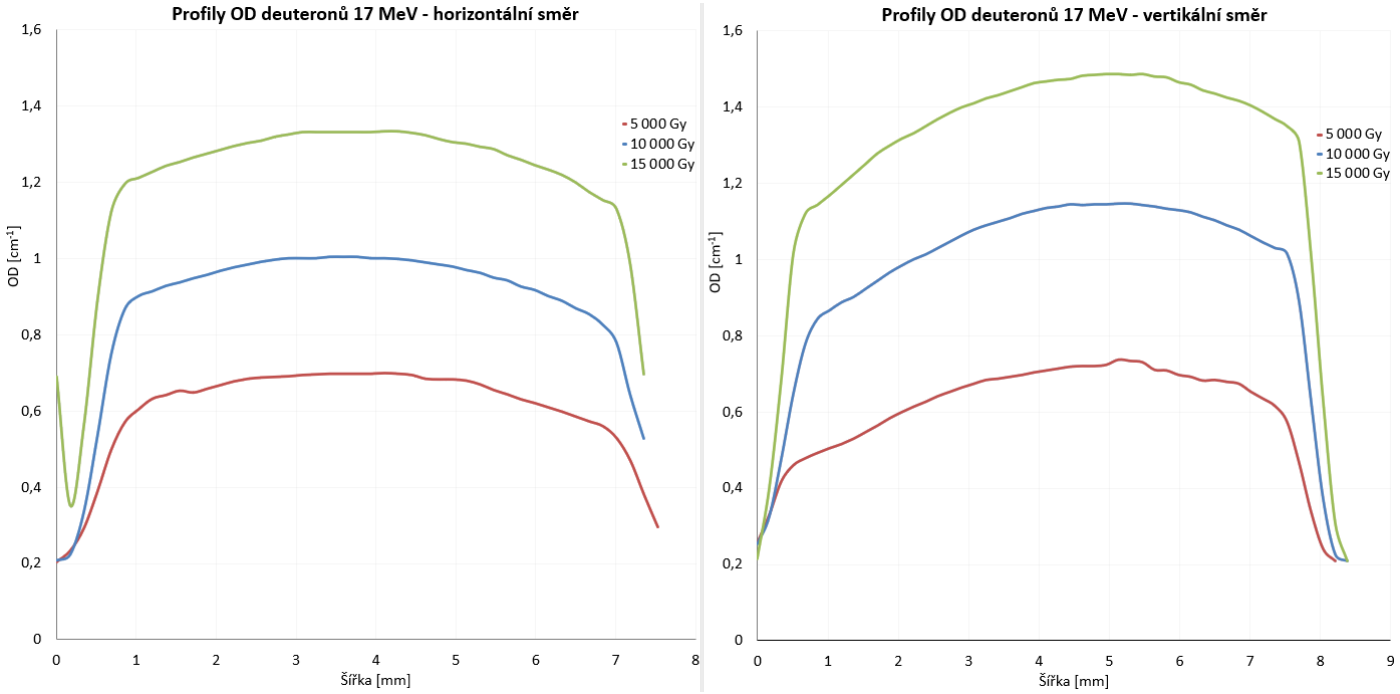
Obr. 11: Hloubkové průběhy optické denzity odečtené z dozimetrů MAKROCLEAR ozářených deuteronovými svazky o energii 17 MeV, pro tři různé absorbované dávky v Braggově maximu: 5 000 Gy, 10 000 Gy, 15 000 Gy

MAKROCLEAR reagují na relativní biologickou účinnost (RBE) různých typů záření, nikoliv jen na pouhou absorbovanou dávku. Veličinami, které dozimetry MAKROCLEAR přímo měří, se v tomto světle jeví být ekvivalentní dávka či dávkový ekvivalent.

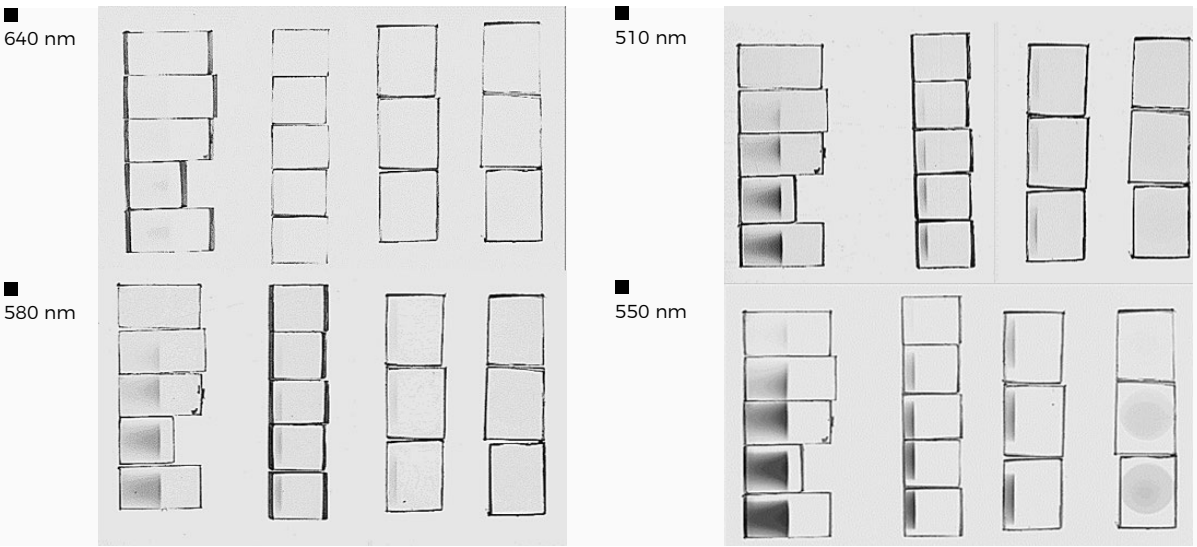
VYHODNOCENÍ DOZIMETRŮ OZÁŘENÝCH DEUTERONOVÝMI SVAZKY V POLYCHROMATICKÉM SVĚTLE

Po ozáření deuterony o energii 17 MeV byla odezva dozimetru na dávku o něco slabší než v případě protonů (Obr. 10) a zachovala si svoji linearitu až do hodnoty 15 kGy, jak dokládá graf (Obr. 11).

Graf (Obr. 12) znázorňuje dávkové profily deuteronů odečtené v osách kolmých na osu svazku – v ose x (vlevo) a v ose z (vpravo). Na grafech je dobře patrné mírné vyosení kolimátoru mimo centrální osu svazku (centrální oblast svazku s nejvyšší hustotou částic a s nejvyšším dávkovým příkonem), které činí cca 0,5 mm ve vodorovném směru a 1 mm ve svislém směru.



Obr. 12: Profily optické denzity odečtené z dozimetrů MAKROCLEAR pro tři různé absorbované dávky (viz legenda vpravo) – v horizontálním směru (vlevo) a ve vertikálním směru (vpravo)



Obr. 13: Transmisní skeny dozimetrů MAKROCLEAR ozářených protony (vlevo) dávkami 500 Gy, 2 500 Gy, 5 000 Gy, 7 500 Gy, 10 000 Gy a deuterony (vpravo) dávkami 5 000 Gy, 10 000 Gy, 15 000 Gy, pořízené přes různé barevné filtry propouštějící vlnové délky světla 640 nm, 580 nm, 510 nm, 450 nm

VYHODNOCENÍ OZÁŘENÝCH DOZIMETRŮ V MONOCHROMATICKÉM SVĚTLE RŮZNÝCH VLNOVÝCH DÉLEK

V dalším kroku proběhlo skenování ozářených dozimetrů na transmisním skeneru Epson Perfection 850-Pro přes sérii barevných filtrů propouštějících vlnové délky světla 640 nm, 580 nm, 510 nm, 450 nm (Obr. 13). Skenování probíhalo kolmo k ose svazku pro získání informace o dávkovém profilu svazku, dále pak podél osy svazku pro získání informace o hloubkových dávkových křivkách, jako v předchozím případě.

Je na první pohled zřejmé, že odezva dozimetru je na kratších vlnových délkách světla výrazně vyšší, nezávisle na druhu a energii použitých hadronů. To současně vede k rychlejší saturaci dozimetrů pro kratší vlnové délky světla, což je obzvláště patrné u protonů vyšších energií.

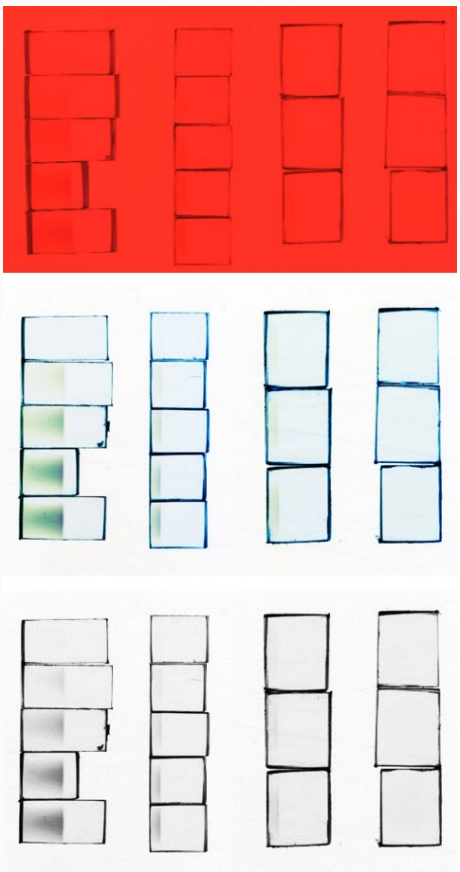
Získané obrazy byly následně upraveny pomocí automatické funkce obnovení barev, která z nich odfiltrovala barevné pozadí (Obr. 14). Na obrázku vidíme srovnání dvou výsledných obrazů pořízených na vlnových délkách 640 nm a 450 nm.

Horní obraz představuje barevný originál, na prostředním snímku je filtrovaná verze bez barevného pozadí, spodní obrázek reprezentuje denzitní mapu filtrovaného obrazu.

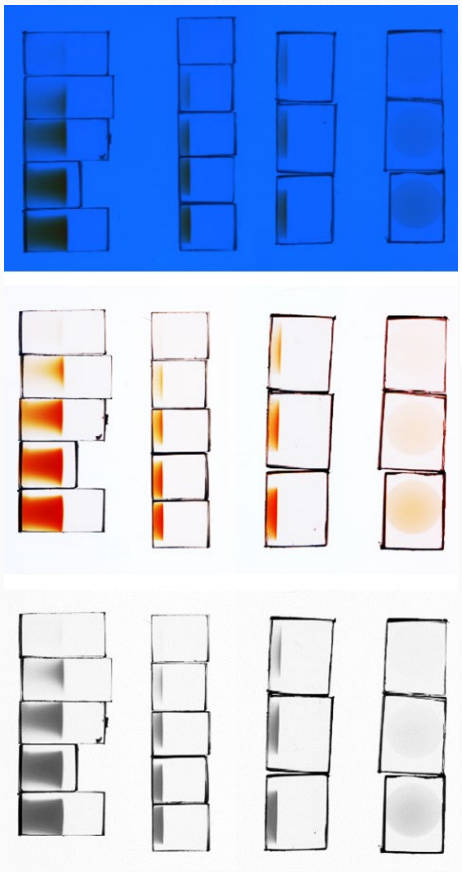
Srovnáním obou obrázků (Obr. 14) je na první pohled patrné, že pro 34 MeV protony dochází pro 450 nm světlo k extrémně rychlé saturaci dozimetru již nad dávkou 7,5 kGy, takže vyšší dávky se stávají prakticky neměřitelnými. Naopak pro 640 nm světlo je odezva dozimetru až do 7,5 kGy prakticky lineární a k úplné saturaci dozimetru dojde až mnohem později (Obr. 15). To je vlastnost, kterou jsme u dozimetrů MAKROCLEAR pozorovali již dříve po ozáření fotony gama, nebo neutrony. [5] [6] [11] [12]

Pro protony o přibližně poloviční energii byla odezva dozimetru na dávku nižší. V 640 nm světle se proto odezva dozimetru jevila téměř lineární až do dávky 10 kGy neboť bylo dosaženo optické denzity pouze okolo 1 cm^{-1}, takže lze předpokládat, že jsme se při této dávce ještě nepřiblížili bodu saturace. Ve 450 nm světle se odchylka od linearity projevovala při vyšších dávkách o něco výrazněji, dozimetr však i při dávce 10 kGy bez problémů měřil, neboť ani v tomto případě nebylo zdaleka dosaženo bodu úplné saturace (Obr. 16).

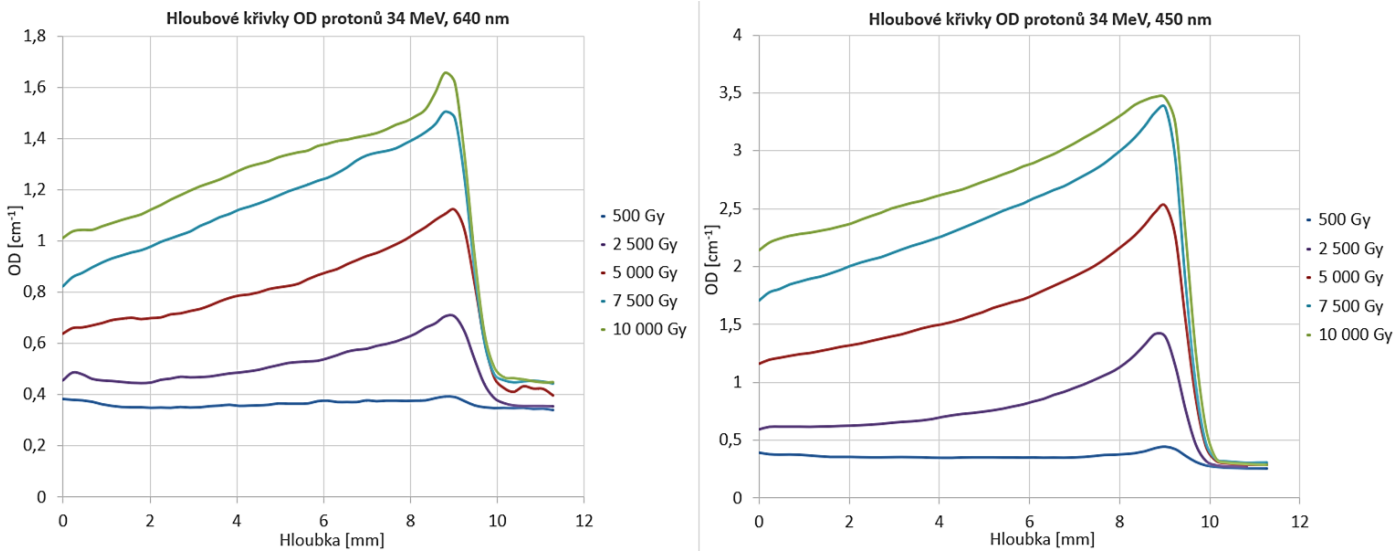
640 nm



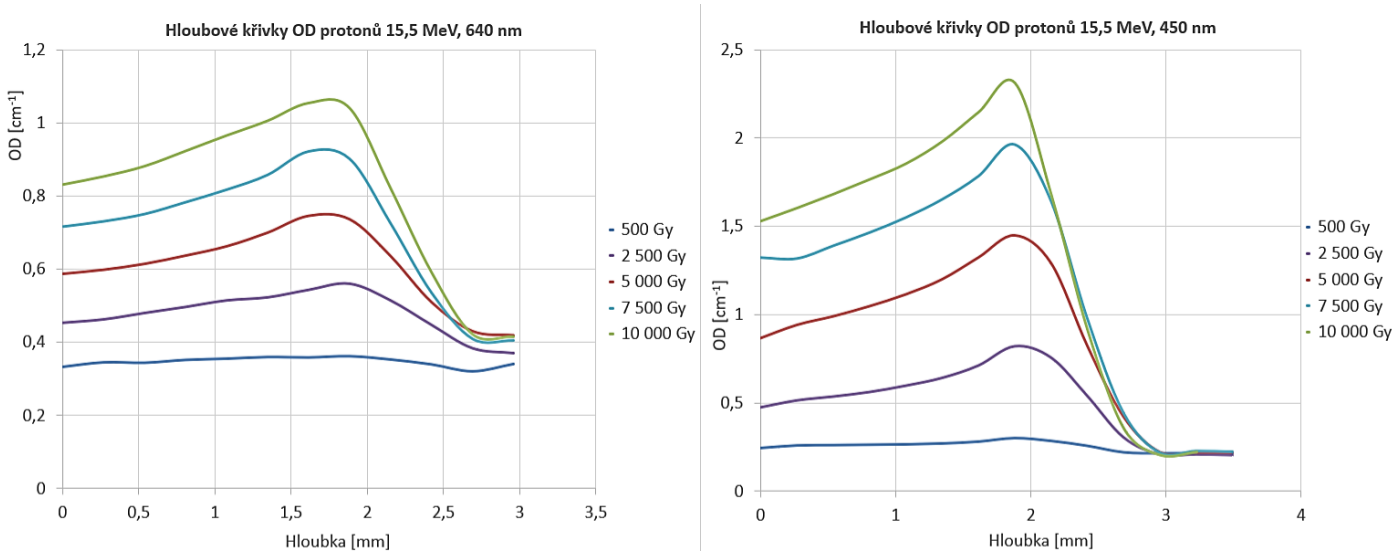
450 nm



Obr. 14: Transmisní skeny ozářených dozimetrů MAKROCLEAR z Obr. 13, pořízené na vlnových délkách světla 640 nm (vlevo) a 450 nm (vpravo) a filtrované pomocí automatické funkce obnovení barev, která z nich odfiltrovala barevné pozadí



Obr. 15: Srovnání hloubkových průběhů optické denzity dozimetrů MAKROCLEAR ozářených protony o energii 34 MeV, odečtených na vlnové délce světla 640 nm (vlevo) a 450 nm (vpravo)



Obr. 16: Srovnání hloubkových průběhů optické denzity dozimetrů MAKROCLEAR ozářených protony o energii 15,5 MeV, odečtených na vlnové délce světla 640 nm (vlevo) a 450 nm (vpravo)

Stojí za povšimnutí, že na 640 nm existuje sice malá, leč měřitelná změna optické denzity i za oblastí doletu těžkých nabitých částic. To je zřejmě způsobeno dalšími druhy částic, které byly vybuzeny hadronovým svazkem buď již v kolimátoru, nebo v samotném materiálu dozimetru. Může se jednat o záření rentgenové, neutronové a elektronové.

Po ozáření hadronovými svazky zůstávají dozimetry slabě radioaktivními po dobu několika hodin. Poločas přeměny byl měřením odhadnut na cca 1 hodinu, takže po 24 hodinách byla již aktivita dozimetrů neměřitelná, ačkoliv bezprostředně po ozáření se aktivita nejvíce exponovaných dozimetrů pohybovala okolo 1 MBq.

ZÁVĚR

Výsledky analýz prokázaly, že dozimetry MAKROCLEAR jsou skvěle využitelné jako levné a snadno dostupné integrující dozimetry protonů v oblasti dávek nejméně do 7,5 kGy, kde je jejich odezva v bílém světle prakticky lineární dávce (s prahem detekovatelnosti okolo 100 Gy). Ještě vyšší měřicí rozsah byl zaznamenán v případě deuteronů, kde byla odezva dozimetrů lineární dávce minimálně do 15 kGy. K nesporným výhodám dozimetrů MAKROCLEAR oproti jiným typům patří jejich snadná příprava v požadovaném tvaru a velikosti, jejich jednoduchá dostupnost, a velmi nízká pořizovací cena (přibližně 1 eurocent za kus). Rovněž jejich vyhodnocení je levné, snadné, rychlé a nevyžaduje nákladné či objemné laboratorní vybavení. V řádu minut lze získat 3D informaci o dávkovém profilu hadronového svazku a hloubkové dávkové křivce včetně polohy Braggova píku a dávky v Braggově píku, poměru dávky v Braggově maximu k dávce v oblasti plató a o maximálním doletu částic.

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

Mgr. David Zoul

david.zoul@cvrez.cz

Absolvoval Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy v Praze v oborech Bezpečnost jaderných zařízení a Kvantová biofyzika. Na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze poté získal akreditaci pro výkon zdravotnického povolání v oboru radiologická fyzika. V letech 2001–2013 pracoval ve Fakultní nemocnici v Motole a v Nemocnici Na Homolce jako dohlížející osoba v oblasti radiodiagnostiky a jako lékařský fyzik v oboru radiační onkologie, se zaměřením na léčbu dětské leukémie a stereotaktickou radioterapii mozkových nádorů.

V letech 2006–2013 přednášel lékařskou fyziku na 2. lékařské fakultě Univerzity Karlovy v Praze a Fakultě biomedicínského inženýrství ČVUT.

Od roku 2014 pracuje ve společnosti Centrum výzkumu Řež v oblasti dozimetrie ionizujícího záření, kde se zabývá mimo jiné výzkumem a vývojem organických integrujících dozimetrů a přístrojů pro gama tomografii. Současně vykonává soustavný dohled nad dodržováním požadavků radiační ochrany na pracovištích s otevřenými a uzavřenými radionuklidovými zdroji.

Reference:

[1] http://www.ujf.cas.cz/cs/vyzkum-a-vyvoj/velke-vyzkumne-infrastruktury-a-centra/canam/o_projektu/
[2] Shamshad, A, Rashid, M., Husain, A., 1997, "High gamma dose dosimetry by polycarbonates", Radiation Physics and Chemistry, vol. 50, pp. 307–311. DOI:10.1016/S0969-806X(97)00038-8
[3] Galante, A. M. S., Campos, L. L., 2010, "Characterization of polycarbonate dosimeter for gamma-radiation dosimetry", Proceedings of 3rdEuropian IRPA Congress, Session S04 Dosimetry P04–15, pp. 815–819, Helsinki, Finland, http://www.irpa2010europe.com/pdfs/proceedings/S04-P04.pdf
[4] Galante, A. M. S., Campos, L. L., 2012, "Mapping radiation fields in containers for industrial -irradiation using polycarbonate dosimeters", Applied Radiation and Isotopes, vol. 70, pp. 1264-1266. DOI: 10.1016/j.apradiso.2011.12.046
[5] Zoul, D., Cabalka, M., Koplová, M., 2018, "A study of using polycarbonate as a reusable radiochromic integrating dosimeter for the determination of high doses of ionizing radiation", RAD Conference Proceedings, vol. 3, pp. 138–142. DOI: 10.21175/RadProc.2018.30
[6] Zoul, D., 2017, „Studie využití polykarbonátu pro integrující dozimetrii vysokých dávek ionizujícího záření", Bezpečnost jaderné energie (Nuclear power safety), 25 [63] 5/6, pp. 141–149. ISSN: 1210-7085
[7] Serini, V., 2000, "Polycarbonates", Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, Weinheim. DOI: 10.1002/14356007.a21_207
[8] David Zoul, Radiace, která léčí – část čtvrtá, Aldebaran Bulletin, 27/2021, David Zoul: Radiace, která léčí – část čtvrtá (aldebaran.cz)
[9] Zoul, D., Koplová, M., Rosnecký, V., Štěpánková, H., Římal, V., Štěpánek, J., Mojzeš, P., Procházka, M., 2019, „Studium molekulárních mechanismů radiochromického jevu v polykarbonátu (A study of the molecular mechanisms of the radiochromic effect in the polycarbonate)", Bezpečnost jaderné energie (Nuclear power safety), 26 [64] 11/12, pp. 338–346. ISSN: 1210-7085
[10] Zoul, D., 2016, „Studie tmavnutí polykarbonátových desek v poli ionizujícího záření (A study of the changes in optical density of the polycarbonate plates in the field of ionizing radiation)", Bezpečnost jaderné energie (Nuclear power safety), 24 [62] 1/2, pp. 33–38. ISSN: 1210-7085
[11] Zoul, D., Koplová, M., Zimina, M., Libera, O., Rosnecký, V., Košťál, M., Šimon, J., Schulc, M., Vinš, M., Cabalka, M., Kučera, J., Strunga, V., Štěpánková, H., Římal, V., Čížek, J., Štěpánek, J., Procházka, M., "Study of chemical processes in irradiated polycarbonate in the context of its applicability for integrating dosimetry of high doses", submitted to Radiation physics and chemistry, 2020
[12] David Zoul, Markéta Koplová, Vít Rosnecký, Michal Košťál, Miroslav Vinš, Jan Šimon, Martin Schulc, Martin Cabalka, Jan Kučera, Vladimír Strunga, "The use of Polycarbonate as dosimeter of high dose", ASME J. of Nuclear Rad Sci., 2021

Vývoj a využití zařízení pro ozařování betonových vzorků v jaderném reaktoru LVR-15

Ing. Tomáš Melichar, Ing. Zbyněk Hlaváč, Ph.D., Ing. Jaroslav Šoltés, Ing. Petr Hájek, Ing. Karel Dočkal, Ing. Miroslav Vinš
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Článek popisuje vývoj a využití zařízení pro ozařování a řízenou simulaci degradace betonových materiálů jakožto součásti komponent jaderných elektráren. Zařízení umožňuje vystavení vzorků podmínkám odpovídajícím provozu jaderných energetických zařízení včetně fluence rychlých neutronů a teplot. Takové výsledky ozařovacích kampaní je pak možné využít v rámci hodnocení životnosti komponent jaderných bloků. Uveden je technický popis jednotlivých komponent zajišťujících správnou funkci, dále je zmíněn proces uvádění do provozu včetně funkčních testů. S využitím zařízení byla úspěšně provedena dlouhodobá experimentální kampaň v reaktoru LVR-15. Zařízení i ozařovací kampaň bylo realizováno v rámci Programu bezpečnostního výzkumu Ministerstva vnitra ČR.

The paper describes the development and utilization of a facility intended for controlled simulation of degradation of concretes as materials of components of nuclear power plants. The facility allows the exposition of concrete samples in the environment corresponding to the conditions expected in the real nuclear energy units including fast neutrons fluence. The results of the irradiation campaigns can be used within the lifetime assessment of the nuclear power plant components. A technical description of the irradiation assembly is given as well as the commissioning process and functional tests. A long-term irradiation campaign was carried out successfully in the LVR-15 reactor, supported by the Ministry of the Interior of the Czech Republic.

ÚVOD

Centrum výzkumu Řež je dlouhodobě zapojeno do výzkumu degradace různých konstrukčních materiálů jaderných energetických zařízení. Součástí výzkumu je obvykle expozice vzorků materiálů v podmínkách odpovídajících provozním parametrům reálných energetických zařízení. Dle požadavků konkrétního experimentu se může například jednat o vliv neutronových toků a fluencí o požadované energii, teplot, mechanického napětí, vlivu okolní atmosféry nebo i kombinaci různých parametrů. Takových podmínek lze dosáhnout díky existenci a dostupnosti unikátní infrastruktury výzkumného jaderného reaktoru LVR-15 v kombinaci se speciálně vyvíjenými ozařovacími zařízeními.

V rámci projektu „Kontrola betonu biologické ochrany po ozáření neutrony z jádra reaktoru", který byl zařazen do Programu bezpečnostního výzkumu Ministerstva vnitra ČR, probíhá výzkum degradace betonů jakožto materiálu biologického stínění umístěného v okolí aktivní zóny reaktorů typu VVER. Návrh projektu vychází z potřeby prohloubení znalostí o degradaci betonů vlivem ozáření neutrony o spektru odpovídajícímu provozu reaktorů. Výchozí data pro hodnocení životnosti betonů jsou totiž založena na starších experimentech, jejichž výsledky jsou často nekonzistentní a jejich interpretace není jednoznačná. Pro účely prodlužování životnosti stávajících jaderných elektráren je tedy velmi žádoucí získání nových dat a vývoj nových

Rozměr testovací sekce	průměr 40 mm, výška 600 mm
Neutronové toky a fluence	rychlé spektrum (energie >0,1 MeV) fluence >10^{19} n/cm^2 zajištění rovnoměrných podmínek na vzorcích
Teploty	nižší než 60 ˚C
Další požadavky	zajištění jaderné bezpečnosti během ozařování a manipulací zajištění kontrolované inertní atmosféry v okolí vzorků měření teploty a neutronových fluencí

Tabulka 1: Základní požadavky na ozařovací zařízení

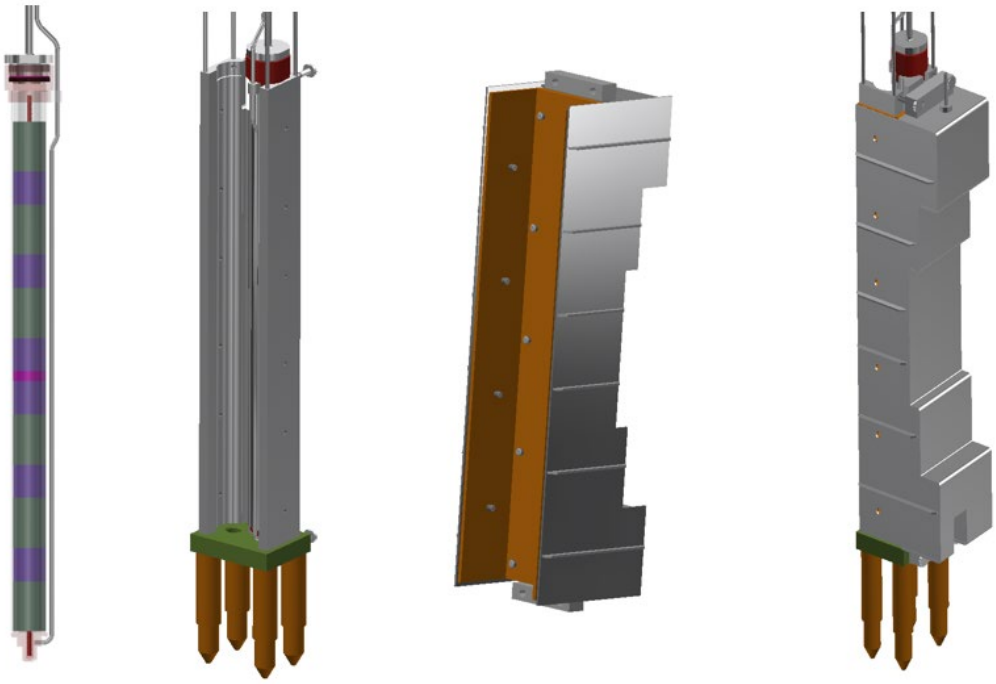
metod hodnocení degradace betonů. Hlavním cílem zmíněného projektu je pak ověření metody nedestruktivní kontroly betonu biologické ochrany vyvinuté v předchozím projektu a získání zkušeností s prací s ozářenými vzorky a s hodnocením mechanismu poruch. K tomu je zapotřebí zajištění vhodně ozářených vzorků. Za tímto účelem bylo vyvinuto zařízení, které umožňuje dosažení relevantních parametrů na vzorcích v přijatelném čase. V dalších kapitolách bude uveden technický popis tohoto zařízení včetně jeho vývojových fází a konečného využití.

OZAŘOVACÍ PODMÍNKY A POŽADAVKY NA ZAŘÍZENÍ

Technický návrh vychází z požadovaných provozních parametrů a experimentálních možností. Technické parametry zařízení jsou shrnuty v Tabulce 1. Požadavky na prostor, respektive na rozměr sekce pro umístění vzorků vychází nutnosti ozáření dostatečného počtu dostatečně velkých vzorků. Zařízení umožňuje ozařování vzorků ve formě válečků o průměru 40 mm. Výška testovací sekce je pak 600 mm, což odpovídá výšce aktivní zóny reaktoru LVR-15, ve které je možné dosáhnout potřebných neutronových fluencí. Zařízení tedy umožňuje ozařování např. dvanácti vzorků o výšce 50 mm. Z hlediska neutronového toku je požadavkem ozařování rychlými neutrony o energii vyšší než 0,1 MeV a dosažení konečné fluence na vzorcích 10^{19} n/cm^2. Takové fluence rychlých neutronů odpovídají přibližně 40 letům provozu komponenty stínění biologické ochrany dukovanské elektrárny (EDU). Díky možnosti umístění ozařovací sondy v naprosté blízkosti aktivní zóny reaktoru LVR-15 je dosažení takové fluence dle návrhových výpočtů možné za přibližně 200 ozařovacích dní. Díky tomu lze simulovat degradaci betonu vlivem neutronového toku odpovídající celé plánované životnosti EDU v relativně krátkém čase. Důležitým požadavkem je dosažení srovnatelných neutronových toků a fluencí na všech vzorcích tak, aby následné hodnocení bylo co nejvíce konzistentní. Za tímto účelem byl vyvinut a implementován tzv. vzduchový vytěsnitel. Dále je požadováno, aby teplota vzorků po celou dobu ozařování nepřesáhla 60 ˚C a byl tak eliminován vliv teplotně závislých mechanismů degradace. To rovněž odpovídá provozním teplotám stínění biologické ochrany na jaderných elektrárnách. Dalším požadavkem je zajištění kontrolovatelné atmosféry v okolí vzorků tak, aby nedocházelo k nežádoucímu nárůstu tlaku v ozařovacím pouzdře vlivem uvolňování plynů a vlhkosti ze vzorků během ozařování. Zároveň bylo zamezeno vniku vlhkého vzduchu z okolí. Zařízení je navrženo tak, aby byly splněny limity a podmínky provozu reaktoru LVR-15 a aby byla zajištěna jaderná bezpečnost během ozařování i veškerých manipulací s ozařovacím zařízením i samotnými vzorky.

POPIS ZAŘÍZENÍ

Zařízení se skládá z několika součástí, jak je zobrazeno na Obr. 1. Testovací sekci tvoří kapsle – trubka z hliníkové slitiny. Do kapsle jsou přímo vkládány vzorky. Dno i víko kapsle jsou napojeny na systém plynového hospodářství, který prostřednictvím soustavy regulačních prvků kontroluje tlak plynu v kapsli. Další součástí je tzv. držák kanálu, který má mechanickou funkci. Vymezuje kapsli se vzorky tak, aby kolem bylo zajištěno rovnoměrné proudění chladiva a zároveň slouží k usazení



kapsle se vzorky

držák kanálu

stínění a vytěsnitel moderátoru

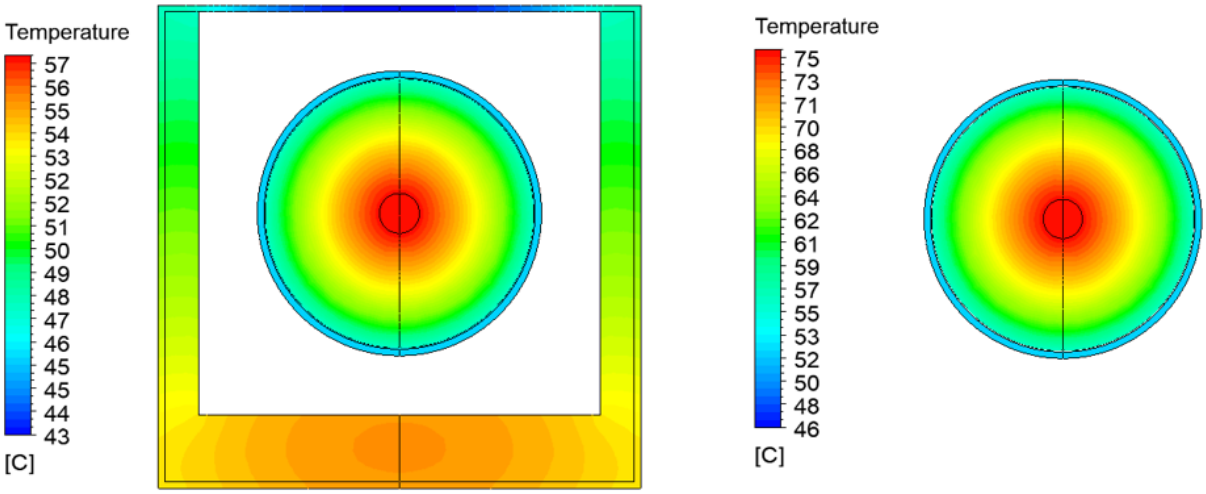
sestava ozařovacího kanálu

Obr. 1: Součásti ozařovacího zařízení

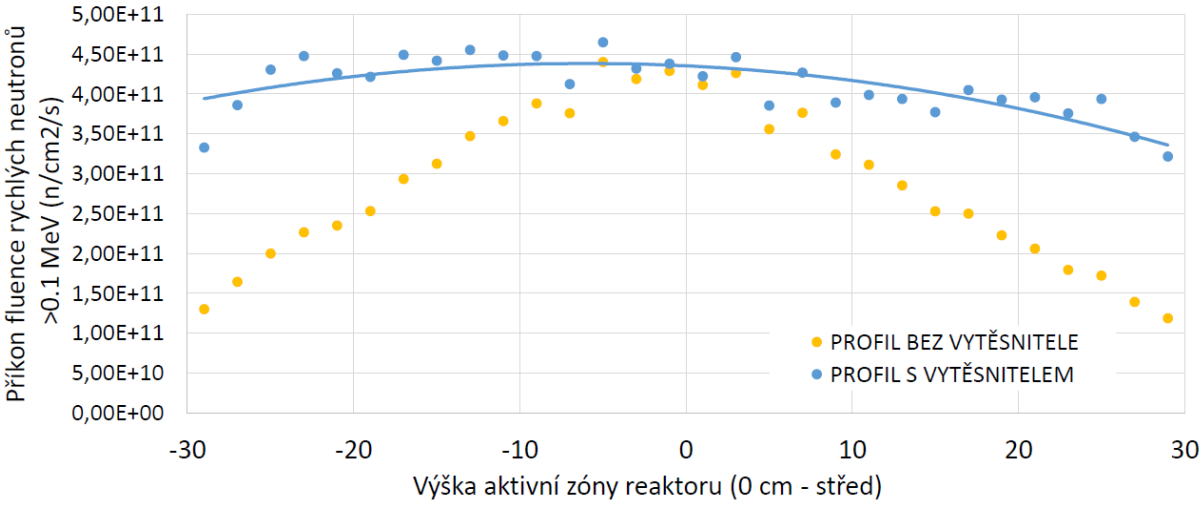
celé sestavy zařízení do mříže aktivní zóny reaktoru LVR-15. K držáku je rovněž připojena sestava gama stínění a vzduchového vytěsnitele moderátoru.

Úkolem gama stínění je snížení intenzity gama záření interagujícího se vzorky. Vlivem interakcí především gama záření s materiály testovací sekce dochází ke generování tepla a zvyšování teploty vzorků, což je nežádoucí vzhledem k požadovaným ozařovacím podmínkám (Tabulka 1). Z toho důvodu je implementováno stínění ve formě wolframových plátů, jejichž tloušťka byla výpočetně optimalizována tak, aby teploty vzorků nepřesáhly požadované limity. Wolframové stínění bylo zapouzdřeno pokrytím z hliníkové slitiny tak, aby byla celá sestava kompatibilní s chladivem reaktoru a nedocházelo ke kontaminaci chladiva wolframem. Pro účely návrhu zařízení a bezpečnostních analýz byl vyvinut detailní výpočetní model s využitím metody konečných objemů. Díky tomu je možné simulovat teplotní pole ve vzorcích a komponentách zařízení při různých podmínkách. Pro porovnání byla provedena i simulace případu bez gama stínění. Teplotní pole ve vzorku pro nominální provozní režim s gama stíněním predikované výpočetním modelem je zobrazeno na Obr. 2 vlevo, bez gama stínění pak na Obr. 2 vpravo. Rozdíl v maximální teplotě vzorku je 18 °C a je tedy zřejmé, že bez stínění by nebylo možné dosáhnout požadovaných teplot při ozařování.

Další klíčovou součástí je tzv. plynový vytěsnitel moderátoru, prostřednictvím kterého dochází k zrovnoměrnění toku rychlých neutronů dopadajícího na vzorky. To je zajištěno po výšce odstupňovaným tvarem komponenty. Vnitřní prostor vytěsnitele je vyplněn plynem a celá komponenta je ponořena v chladicí vodě, a tedy i moderátoru reaktoru. Vlivem rozdílných tlouštěk vytěsnitele v příslušných výškách je snižována moderace neutronů. V pozici vertikálního středu aktivní zóny, kde



Obr. 2: Teplotní pole vzorků predikované výpočetním modelem

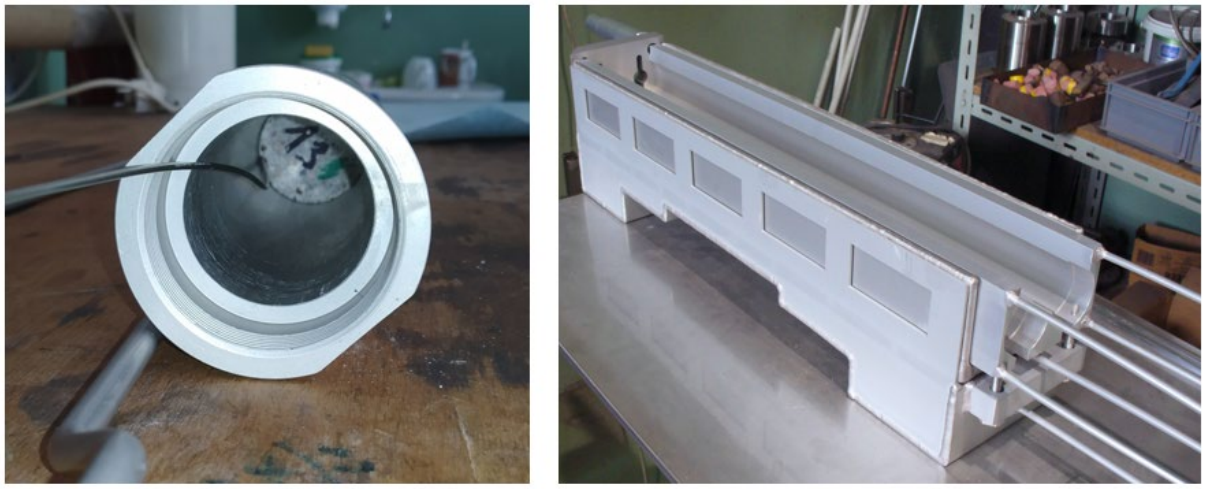


Obr. 3: Příkon fluence rychlých neutronů po výšce testovací sekce

je přirozeně vyšší tok neutronů, je tloušťka vytěsnitele menší a větší část dráhy neutronového toku prochází moderátorem. Směrem od středu klesá tloušťka moderátoru na úkor plynové vrstvy a moderace neutronů je tak snížena. Tím je dosaženo rovnoměrnějšího profilu fluence rychlých neutronů po výšce testovací sekce se vzorky. Porovnání profilů s vytěsnitelem a bez něj je vykresleno na Obr. 2.

Testovací sekce je opatřena teplotními čidly, která měří a zaznamenávají teplotu během ozařování. Ke vzorkům jsou rovněž umístěny monitory fluence, ze kterých lze po ozařovací kampani odečíst dosažené neutronové fluence pro účely hodnocení vzorků. Celé zařízení je umístěno do reaktorové nádoby v těsné blízkosti aktivní zóny, což umožňuje dosažení požadovaných fluencí v krátkém čase.

Design, výroba a montáž zařízení byly provedeny v Centru výzkumu Řež. Po výrobě a zkouškách jednotlivých komponent byly betonové vzorky vloženy do testovací kapsle, současně byly instalovány termočlánky a monitory fluence (Obr. 4 vlevo). Kapsle byla následně uzavřena, vyplněna inertním plynem a utěsněna. Dále byla připravena sestava držá-



Obr. 4: Montáž kapsle se vzorky (vlevo) a sestava držáku s plynovým vytěsnitelem (vpravo)

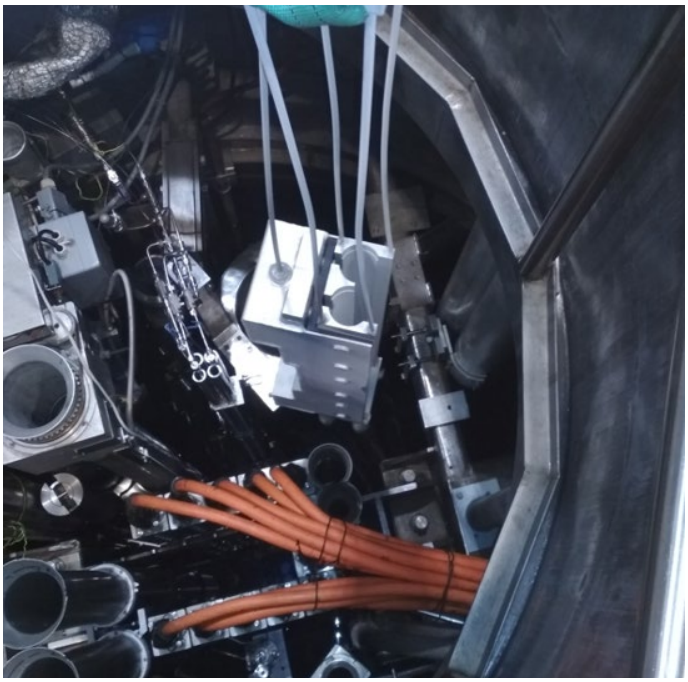
ku sondy se stíněním a vytěstnitelem (Obr. 4 vpravo). Obě podsestavy jsou takto připraveny k instalaci do reaktorové nádoby.

EXPERIMENTÁLNÍ PROVOZ

V první fázi je do reaktorové nádoby zavezena sestava držáku se stíněním a vytěsnitelem (Obr. 4). Do prostoru v držáku je pak možné vložit kapsli se vzorky. Kapsle je v horní části nad hladinou chladiva mechanicky zajištěna připojením ke struktuře reaktorové nádoby. Následně je připojena na rozvod inertního plynu s řídicími prvky. Termočlánky jsou pak připojeny k systému kontroly, řízení a sběru dat. Stav ozařovacího zařízení a experimentu lze pak kontrolovat a řídit z operátorovny reaktoru LVR-15. Během ozařování jsou kontrolovány teploty vzorků a tlak plynu v kapsli. Kapsli se vzorky lze po ukončení ozařování ze sestavy snadno vyjmout, sestava držáku pak může zůstat v reaktorové nádobě pro případné navazující experimenty.

Po zavezení zařízení do reaktoru a připojení k potřebným systémům byl proveden funkční test při reálných parametrech. Cílem bylo ověření designu zařízení a postupu manipulací, dále pak ověření ozařovacích podmínek. Součástí testu bylo najetí reaktoru na výkon po dobu několika hodin a sledování teplot a tlaků z čidel. Během testu měřené teploty nepřesáhly 52 °C. Naměřené hodnoty navíc byly v dobré shodě s numerickým tepelným modelem (rozdíl méně než 3 °C). Díky tomu poznatku lze pak výpočetní model použít pro predikování teplot v celém objemu vzorků i dalších součástech zařízení. Odzkoušeny a ověřeny byly rovněž potřebné manipulace s kapslí i držákem sondy před ostrými manipulacemi s ozářenými součástmi.

Dlouhodobá ozařovací kampaň byla zahájena v roce 2020 a byla ukončena v prosinci 2021. Ozařování proběhlo bez komplikací, bylo dosaženo požadovaných fluencí a v žádné fázi nebyl překročen teplotní limit 60 °C na vzorcích. Při odstávce reaktoru pak byla kapsle se vzorky za účasti dozimetrické kontroly odpojena a pomocí jeřábu vyjmuta z reaktorové nádoby. Následovalo přemístění kapsle do horkých komor pod halou reaktoru LVR-15 a zde byla kapsle uložena do transportního stínicího kontejneru. Poté byl realizován transport ozářené kapsle na pracoviště horkých komor vybudovaných v rámci projektu SUSEN, které jsou vybaveny potřebnou výzkumnou infrastrukturou pro hodnocení degradace ozářených vzorků. Zde byly vzorky z kapsle vyjmuty a podrobeny plánovaným analýzám. S prázdnou kapslí je pak naloženo jako s radioaktivním odpadem, zatímco sestava držáku se stíněním a vytěsnitelem je v reaktoru připravena pro realizaci dalších ozařovacích experimentů vyžadujících ozařování na nízkých teplotách.



Obr. 5: Zavezení sestavy držáku ozařovacího zařízení do reaktoru LVR-15

V rámci projektu úspěšně proběhla dlouhodobá ozařovací kampaň s betonovými vzorky. Ozářené vzorky byly v rámci projektu využity k ověření metodiky hodnocení degradace ozářených betonů. Zařízení má potenciál dalšího využití, ať už v rámci navazujících výzkumných projektů, nebo jako součást komerčních ozařovacích služeb, neboť problematika hodnocení degradace betonů je vysoce aktuální a celosvětově je po podobných experimentech velmi vysoká poptávka.

Poděkování: Tento výsledek vznikl v rámci projektu VI20192022154 „Kontrola betonu biologické ochrany po ozáření neutrony z jádra reaktoru“ za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva vnitra České republiky v Programu bezpečnostního výzkumu České republiky v letech 2015–2022.

ZÁVĚR

V rámci projektu, který je součástí Programu bezpečnostního výzkumu podpořeného MV ČR, bylo vyvinuto, vyrobeno, odzkoušeno a využito zařízení, které umožňuje ozařování betonových vzorků jakožto konstrukčních materiálů jaderných elektráren. Přínosem zařízení je dosažení degradace betonových materiálů vlivem neutronového záření při podmínkách odpovídajících provozu jaderných energetických zařízení, avšak při výrazně kratším čase. Například fluence rychlých neutronů odpovídající 40 letům provozu stínění biologické ochrany dukovanské elektrárny bylo možné simulovat během přibližně 1,5 roku prostřednictvím ozařovacího zařízení a reaktoru LVR-15. Zařízení pak může hrát významnou roli v procesu prodlužování životnosti stávajících jaderných elektráren, neboť dříve dostupná data o degradaci betonových materiálů jsou nekonzistentní a nemusí být pro hodnocení životnosti plně vhodná. Prodlužování životnosti stávajících bloků pak nepochybně přispěje ke zvyšování energetické bezpečnosti, avšak nepřekročitelnou podmínkou je zajištění jaderné bezpečnosti a ochrany personálu jaderných elektráren i okolního obyvatelstva.

Ing. Tomáš Melichar

tomas.melichar@cvrez.cz

Na Fakultě strojní ČVUT v Praze absolvoval magisterský obor Jaderná energetické 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.

Výstavba JE Mochovce a role ŠKODA JS a.s.

Ing. Jan Vybulka
ŠKODA JS a.s.

Materiál shrnuje dosavadní historii dostavby dvou bloků na Jaderné elektrárně Mochovce se zvláštním zaměřením na úlohu společnosti ŠKODA JS. Ta byla a je klíčovým dodavatelem pro oba stávající bloky elektrárny, rozhodující měrou se zasloužila o to, že se dnes spouští třetí blok a pokračují práce na dokončení bloku čtvrtého. Na výstavbě se významným způsobem podílejí další české a slovenské firmy.

This article summarizes the history of the completion of two units of the Mochovce Nuclear Power Plant with a special focus on the role of ŠKODA JS. The company has been a key supplier for both existing units of the plant and has played a decisive role in the current commissioning of Unit 3 and the ongoing completion of Unit 4. Other Czech and Slovak companies also significantly contribute to the construction.

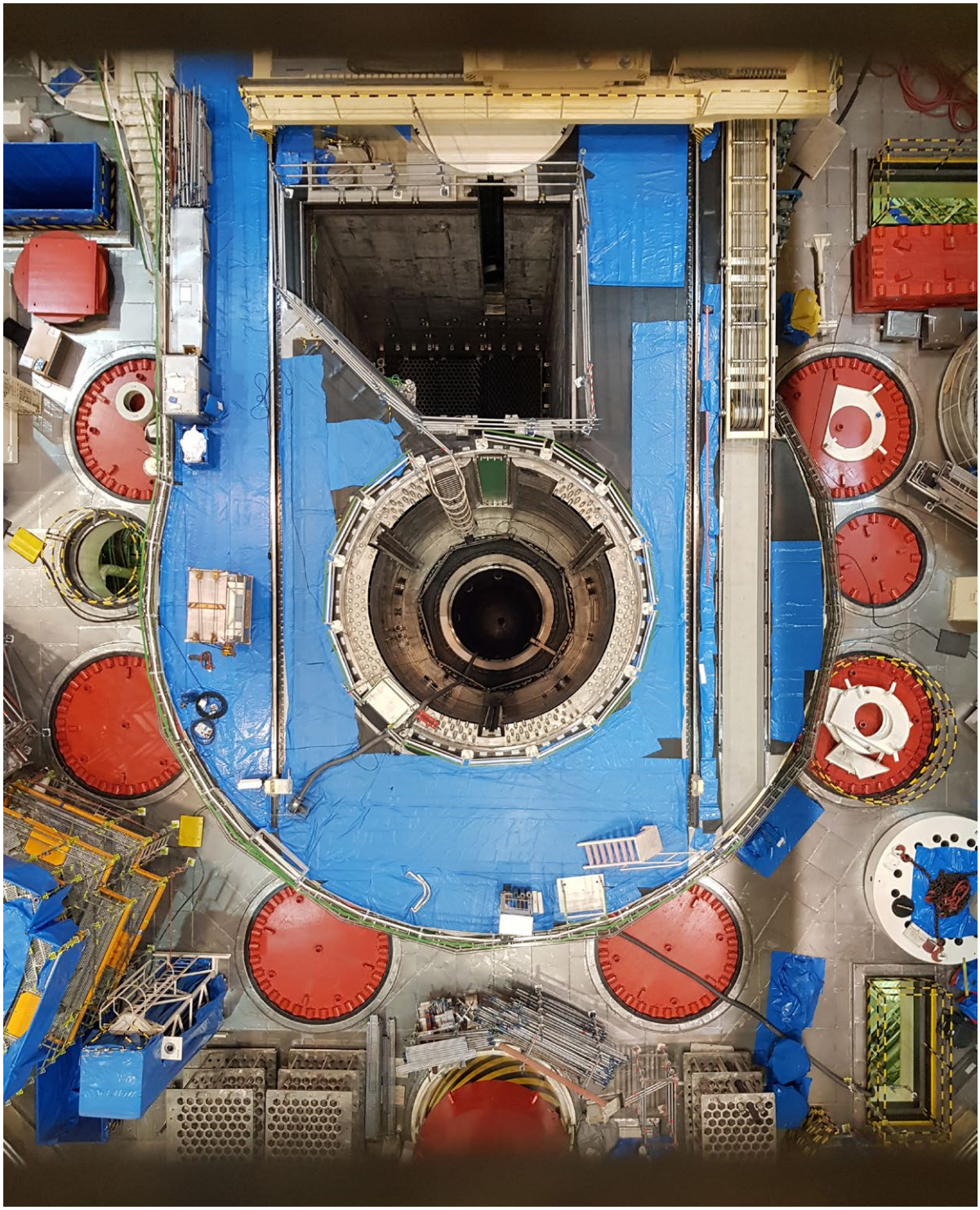
Jaderná elektrárna Mochovce se nachází v jihozápadním regionu Slovenské republiky v místě stejnojmenné bývalé obce Mochovce mezi městy Nitra a Levice. Elektrárna provozuje dva bloky VVER-440/213 a další blok stejného typu je nyní ve fázi spouštění a další ve výstavbě. Reaktory pro všechny čtyři mochovecké bloky vyrobila dnešní ŠKODA JS již koncem osmdesátých let.

Stavba prvních dvou bloků započala v roce 1983, zahájení výstavby dalších dvou bloků proběhlo v roce 1987.

V roce 1991 však byla výstavba celé elektrárny přerušena v důsledku nedostatku finančních prostředků. V roce 1995 schválila vláda SR plán na dostavbu dvou bloků JE Mochovce s podmínkou doplnění zastaralé sovětské technologie modernějšími bezpečnostními prvky firem Framatome, Siemens, EdF. První blok byl spuštěn v roce 1998 a druhý na konci roku 1999.

Na přelomu let 2007 a 2008 započaly diskuze o dostavbě 3. a 4. bloku jaderné elektrárny, které byly dosud zakonzervovány každý v různém stupni rozestavěnosti. V roce 2006 došlo k prodeji významného podílu Slovenských elektrární italské společnosti ENEL, která se současně zavázala financovat dostavbu 3. a 4. bloku elektrárny a spustit 3. blok v roce 2012. Cena dostavby obou bloků byla tehdy odhadována na 2,8 mld. euro.

Na výstavbě JE Mochovce se od počátku podílela řada českých i slovenských firem, z nichž většina již měla bohaté zkušenosti z výstav-



Obr. 1: Pohled z jeřábu na šachtu reaktoru třetího bloku jaderné elektrárny Mochovce (foto: autor)

by bloků stejného typu v jiných lokalitách (např. Dukovany, Jaslovské Bohunice, Mochovce 1,2). Z hlavních českých dodavatelů technologií jmenujme zejména ŠKODA JS, dnešní Doosan Škoda Power a ZAT, dále SIGMA, Chemcomex, I&C Energo, Vítkovice, Královopolská, ŠKODA Praha a řada dalších. Za slovenské firmy pak především ENSECO (části primárního okruhu, inženýrsko-montážní dodávky), VÚJE (vzduchotechnika a kontrola spouštění), PPA Control (řídicí systémy a elektronika), ŠKODA Slovakia a za stavební práce Inžinierske stavby Košice.

V roce 2008 provedlo konsorcium firem ŠKODA JS, ENSECO, VÚJE a Inženierske stavby Košice posouzení stavu zařízení a konstrukcí a bylo zodpovědné i za splnění legislativních požadavků a dokumentaci k ověření zkoušek. ŠKODA JS následně v roce 2009 po-

Obr. 2: Jaderná elektrárna Mochovce v roce 2022 (foto: autor)

depsala se společností Slovenské elektrárne smlouvu o dílo na dostavbu části jaderného ostrova 3. a 4. bloku JE Mochovce.

V roce 2014 byl schválen nový oficiální termín dostavby JE Mochovce na konec roku 2016, resp. rok 2017, a navýšení rozpočtu na 3,8 mld. euro. Dostavba se prodloužila i v důsledku zátěžových stress testů, které požadovala Evropská unie zejména po událostech ve Fukušimě. Stress testy prokázaly, že JE Mochovce 3,4 mají dostatečnou 30% rezervu navíc oproti projektové hodnotě z hlediska odolnosti vůči seizmickému zatížení. Analýza stress testů také potvrdila bezpečnostní rezervy pro extrémní přírodní podmínky – zemětřesení, záplavy, extrémní klimatické podmínky a jejich kombinace, extrémní stavy zařízení – postupná ztráta bezpečnostních funkcí a řízení těžkých havárií. Náklady celé dostavby se vyšplhaly na více než 200 % rozpočtu předpokládaného v roce 2008.

V rámci projektu dostavby JE Mochovce 3,4 jsou společností ŠKODA JS komplexně pokryty činnosti EPC kontraktu (Engineering, Procurement, Construction) pro nejdůležitější systémy primárního okruhu. Pro realizaci projektu JE Mochovce 3,4 byl v roce 2009 ve společnosti ustanoven speciální tým pracovníků. Model spojení inženýringu, výroby a servisu ve společnosti umožňuje nabídnout komplexní služby a dodávky, garantovat kvalitu a nabídnout zákazníkovi tým, který spolupracuje na všech fázích projektu.

Dle smlouvy uzavřené se společností Slovenské elektrárne je ŠKODA JS hlavním dodavatelem technologie nejdůležitější části JE, tj. primárního okruhu. Předmětem projektu je příprava a realizace dodávky ŠKODA JS pro investiční akci dostavby dvou bloků VVER-440/V-213 (bloky č. 3 a č. 4) v lokalitě JE Mochovce na Slovensku. Především pak:

- verifikace použitelnosti stávajícího zařízení a dokumentace dodaných před rokem 1992 tj. ještě před pozastavením stavby
- zpracování technické dokumentace (prováděcího projektu) na základě Úvodního projektu

- demontáž vyřazeného zařízení
- repase použitelného zařízení (tj. zařízení, které prošlo verifikací jako ještě použitelné)
- dodávka a kompletace chybějícího zařízení (vlastní výroba, nákup)
- montáž systémů, včetně vypracování montážní dokumentace
- individuální a neaktivněfunkční zkoušky zařízení
- testy spouštění a uvedení do provozu, včetně vypracování dokumentace
- součinnost při komplexním vyzkoušení a uvádění zařízení do provozu (fyzikální a energetické spouštění)
- koordinace subdodavatelů

Od roku 2015 poskytuje ŠKODA JS také investorovi inženýrsko-technický personál v průměrném počtu cca 155 lidí na den, ti jsou činní v oblasti podpory investora servisními činnostmi prakticky ve všech oblastech inženýrské přípravy a výstavby elektrárny, především pak v oblasti licencování, inženýringu, realizace i spouštění elektrárny. Specifickou oblastí servisní činnosti ŠKODA JS pak je udržování a servis zařízení elektrárny při přípravě k uvádění do provozu.

V současné době je už 3. blok ve fázi fyzikálního a energetického spouštění v plánované délce 4 měsíce, poté bude následovat 144hodinový průkazný chod na 100 % výkonu a předání 3. bloku do tzv. PAC (Preliminary Acceptance).

Spuštění 4. bloku je naplánováno v roce 2024. Na konci roku 2023 je předpokládáno provedení studené hydrozkoušky 4. bloku. Poté bude následovat stejná sekvence jako na bloku 3, tj. malá revize, horká hydrozkouška, rozšířená revize, zavezení paliva a fyzikální a energetické spouštění zakončené 144hodinovým chodem a předáním 4. bloku do PAC.

Během projektu dostavby JE Mochovce 3,4 se naše společnost musela potýkat s praktickými problémy týkajícími se ukončení činností několika významných subdodavatelů. Několik českých průmyslových podniků neustálo situaci na trhu (nejen jaderné) energetiky v posledním desetiletí, dostalo se do finančních problémů a zaniklo. Zmiňme např. společnosti jako Vítkovice Power Engineering, Modřany Power, Královopolská Ria. ŠKODA JS tak byla vždy nucena reagovat a byla schopna převzít dílčí rozsahy děl těchto subdodavatelů na sebe. Vždy se nám podařilo zorganizovat dokončení jednotlivých dílčích rozsahů náhradním způsobem tak, aby bylo zajištěno splnění smluvních povinností vůči konečnému zákazníkovi.

Společnost ŠKODA JS disponuje unikátním a výkonným projektovým týmem, který je schopný komplexně zorganizovat a „uřídit" jedinečný rozsáhlý a složitý funkční celek, jakým výstavba jaderné elektrárny je. ŠKODA JS je dnes jednou z několika mála firem, které dokážou realizovat projekt takového rozsahu.

V rámci své činnosti pomáháme i ostatním českým a slovenským firmám, aby se uplatnily na jaderném trhu a zachovaly si know-how v oboru a pevně věříme, že získané zkušenosti dokážeme velmi záhy zúročit při výstavbě nového jaderného zdroje v ČR.

Ing. Jan Vybulka

jan.vybulka@skoda-js.cz

Studoval na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Studium ukončil v roce 1992 a poté nastoupil do společnosti EZ Praha, nejprve jako konstruktér, poté vedoucí konstruktér a projektový manažer. Jako projektový manažer či vedoucí (manažer) stavby následně působil v různých regionech a společnostech jako Škodaexport, EGE Partners, Qtel Partners, Ltd. UK, Siemens Engineering či Škoda Praha Invest. V roce 2016 nastoupil do ŠKODA JS na pozici projektového manažera pro projekt dostavby 3. a 4. bloku JE Mochovce. Od roku 2019 je ředitelem divize Slovensko.

Přepravy jaderného paliva

Ing. Ján Milčák
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Jaderný palivový cyklus na výzkumném jaderném reaktoru vyžaduje realizaci přeprav jaderných materiálů – dovoz čerstvého a následný odvoz vyhořelého paliva. Tyto transporty představují rozsáhlé projekty s nutnou koordinací nejen pracovníků daného zařízení, ale i potřebných dodavatelů a rovněž účast státních složek. Článek představuje přiblížení realizaci těchto aktivit, ale vlivem vyžadovaného utajování informací nemůže detailně tyto aktivity popsat nebo publikovat fotky z vlastní realizace.

The nuclear fuel cycle at a research nuclear reactor requires the implementation of the transportation of nuclear materials – the import of fresh and then the removal of spent fuel. These transports represent large-scale projects with the necessary coordination not only of the workers of the given facility, but also of the necessary suppliers and the participation of state agencies. The article presents an approximation of the implementation of these activities, but due to the required confidentiality of information, it cannot describe these activities in detail or show photos from the direct implementation.

Společnost Centrum výzkumu Řež provozuje výzkumný jaderný reaktor LVR-15. K zajištění jeho provozu v rozsahu výzkumných plánů a stanovených harmonogramů je realizována pravidelná výměna jaderného paliva. Aktuálně reaktor využívá palivo typu IRT-4M od ruského výrobce TVEL a v roce 2022 bylo zahájeno testování alternativního paliva FPFA výrobce Cerca Romans z Francie.

Kromě přeprav jaderného paliva jsou realizovány další přepravy, které jsou s provozem zařízení společnosti CVŘ spojeny a které jsou v působnosti SÚJB – ať už vyžadují přímo povolení nebo plnění potřebných podmínek provedení dle vyhlášky a podmínek ADR:

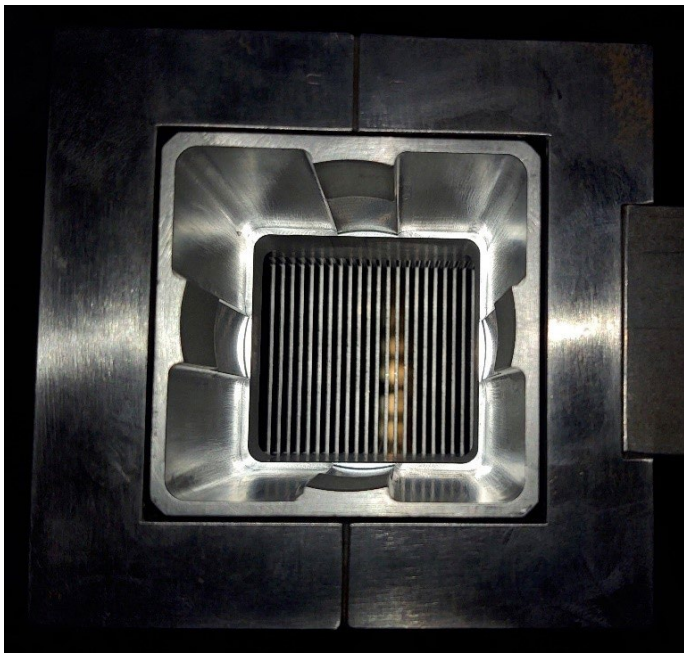
- dovoz obohaceného uranu z výrobního závodu z Francie pro potřeby ozařování pro výrobu radiomedik (Mo-Tc) a po jejich ozáření následně i odvoz na zpracování do Belgie
- odvozy vzniklých radionuklidů pro ozáření na místa zpracování – ať už technické izotopy (např. ^{60}Co) nebo medicínské (např. ^{166}Ho)
- dovozy a odvozy ozářených materiálů v rámci vědecké spolupráce s dalšími výzkumnými centry nebo producenty (dovoz vzorků z Reaktor Halden aj).

Historická vsuvka: Nejrozsáhlejší přepravou jaderného paliva, která byla realizována ve společnosti CVŘ/ÚJV Řež, byl odvoz vysoce-obohaceného paliva z předchozího provozu reaktoru LVR-15 v rámci programu Repatriace ruského jaderného paliva z výzkumných

reaktorů (RRRFR – Russian Research Reactor Fuel Return) v letech 2007 a 2013. Činnosti spojené s tímto programem byly realizovány ve spolupráci zúčastněných zemí s americkým Ministerstvem energetiky a ruským Ministerstvem pro jadernou energii, korporací ROSATOM. Transport probíhal kombinovanou silniční a železniční přepravou 250 km po území České republiky, tranzitní železniční přepravou 650 km přes území Polska, lodní přepravou 3 500 km z polského do ruského přístavu, a železniční přepravou 3 200 km po území Ruské federace až do místa určení v Čeljabinské oblasti. V rámci tohoto programu byly přepraveny stovky kilogramů vyhořelého jaderného paliva zpět do země původu. Aktuální přepravy jsou rozsahem menší, ale přesto pro zajištění provozu zásadní.

Čerstvé jaderné palivo je po ukončení výroby a potřebných testů ve výrobním závodě dopraveno do ČR, resp. areálu ÚJV Řež kombinací letecké přepravy na vybrané letiště a poté silniční přepravou do areálu. V případě paliva FPFA byla volena přímá silniční přeprava. Přepravy jsou realizovány dle příslušných povolení SÚJB včetně účasti Policie ČR pro zajištění fyzické ochrany. Samotné termíny přeprav a způsoby zajištění patří mezi utajované informace a okruh lidí, kteří znají detaily, je velmi striktně hlídán a limitován. Transporty paliva jsou prováděny v obalovém souboru TK-S16, který je licencován nejen pro silniční,

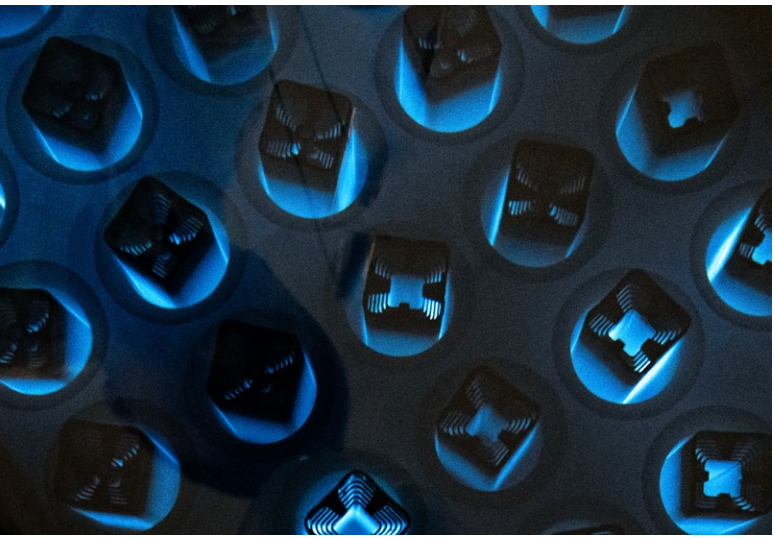
Obr. 1: Vykládka obalového souboru TK-S16 z přepravního letadla



Obr. 2: Test kazety FPFA v rozměrovém kalibru a kontrola průchodnosti

ale právě i pro leteckou přepravu jaderného paliva typu IRT-4M s tím, že maximálně obsahuje 7 ks tohoto paliva. Jelikož čerstvé palivo není významným zdrojem záření, není hlavním cílem obalového souboru zajistit radiační ochranu v okolí převáženého materiálu, ale právě ochranu samotného paliva v případě možné nehody, zabránit možnosti vzniku kritického množství (i při tzv. podmínkách optimální moderace – např. zatopení vodou) nebo ztížit možné zneužití (krádež aj). Alternativně pro palivo FPFA byl použit podobně licencovaný obalový soubor z vlastnictví francouzského partnera.

Životní cyklus palivové kazety v areálu začíná jejím uložením ve skladu paliva do doby požadovaného nasazení. Při tomto požadavku je realizována přeprava ze skladu do samotné reaktorové haly LVR-15. I pro této vnitroareálový přesun je realizováno povolení k přepravě se všemi náležitostmi a podmínkami SÚJB. Před založením do aktivní zóny reaktoru je provedena posloupnost činností pro ověření stavu paliva z pohledu technických podmínek a evidence jaderných materiálů.



Obr. 3: Tzv. mokrý zásobník

V rámci provozu je většina kazet používána po dobu přibližně dvou let, po kterých její vyhoření dosahuje limitů stanovených výrobcem a následně je kazeta z aktivní zóny vyjmuta a přesunuta do bazénu dochlazování v budově reaktoru, resp. pomocných provozech, kde postupně dochází k poklesu jeho zbytkové aktivity a produkovaného tepla. Aktuální koncepce dlouhodobého nakládání s vyhořelým palivem počítá s časově omezeným skladování v areálu ÚJV Řež ve skladovacích kontejnerech Škoda VPVR/M a dále bude řešeno buď přepracování nebo trvalé uložení v hlubinném uložišti.

Samotná přeprava vyhořelého paliva je opět komplexní aktivitou vyžadující spolupráci mezi několika dodavateli a naší společností, a která vyžaduje povolení SÚJB k provedení. Každé přepravě předchází potřebná příprava a činnosti spojené se samotným naložením vyhořelého paliva z bazénu reaktoru LVR-15 do obalového souboru, kde se využívá zkušeností pracovníků z ÚJV Řež z podobných akcí v rámci tzv. repatriace jaderného paliva s použitím obalových souborů VPVR/M, které jsou pro tento typ přeprav a nákladu od SÚJB typově schváleny. V samotném souboru se může nacházet až 36 ks paliva, ale jsou stanovena striktní omezení na např. zbytkovou produkci tepla nebo povolený radionuklidový obsah.

Právě s ohledem na charakter přepravované látky je obalový soubor VPVR/M zásadně odlišný od TK-S16. Značná hmotnost obalového souboru (celkově téměř 12,5 t a z toho pouze cca 250 kg samotné palivové kazety) je dána požadavkem dostatečného stínění přepravovaného materiálu tak, aby na povrchu, resp. v okolí obalového souboru při přepravě, byl minimalizován dávkový příkon – plnění těchto podmínek je součástí přepravních kontrol. Pro minimalizaci možnosti poškození je dále obalový soubor opatřen dvěma tlumiči nárazu (průměr 1,5 m, výška cca 40 cm). VPVR/M je typově schválen jako obalový soubor typu B(U)F, takové označení je podloženo rozsáhlými zkouškami tak, aby bylo prokázáno, že představuje spolehlivou bariéru mezi vysoce-aktivním přepravovaným materiálem a životním prostředím. Toto je dokládáno rozsáhlými analýzami a doklady včetně pádové, tepelné nebo nárazové zkoušky.

Hodnocení, které palivové kazety budou založeny, se provádí na základě jejich provozní historie a analýzy zbytkového výkonu kazet výpočetními kódy. V návaznosti na identifikaci vhodných kazet je provedena tzv. těsnostní zkouška kazet tak, aby do obalového souboru byly založeny, v souladu s typovým schválením, pouze těsné palivové soubory. Tato zkouška je prováděna pomocí sippingu tak, že vybraný soubor je vložen do těsného odběrového zařízení, následuje proplach čistou demineralizovanou vodou a po dílčím ponechání v tomto prostředí je proveden odběr a návazná spektrometrická analýza s cílem potvrzení přítomnost, resp. nepřítomnosti vybraných produktů štěpení, což by značilo kontakt vody přímo s palivovým jádrem, a tedy porušení těsnosti pokrytí paliva. Pro transport jsou vybrány pouze palivové soubory s prokázanou těsností, případné identifikace netěsnosti vedou k zapouzdření paliva v těsném obalu a přípravě na budoucí zavaření do hermetického obalu.

Po provedení naložení kazet do samotného kontejneru pokračuje příprava transportu sušením vnitřní části kontejneru, osazením primárních a sekundárních vík, provedením heliových kontrol těsnosti a osazením horního a dolního tlumiče nárazů. V průběhu těchto manipulací je typicky prováděn dohled dozornými orgány SÚJB, MAAE i Euratomu, které po dokončení prací obalový soubor pečetí.

Samotná přeprava je realizována speciálním vozidlem dopravce s potřebnými náležitostmi pro provedení přepravy v souladu s podmínkami ADR a samotnými podmínkami povolení od SÚJB. Mezi hlavní podmínky patří:

- provedení dozimetrických kontrol obalového souboru, vozidla a okolí vozidla,
- označení vozidla dle podmínek ADR,
- zajištění sledování přepravy a dostupnosti složek pro případnou nehodu a řešení nestandartních stavů,
- zajištění ochrany transportu – typicky spoluprací s Policií ČR a příslušným utajením termínu.

Po ukončení přepravy je obalový soubor uložen v kobce, která je dále pečetěna dozornými orgány.

S ohledem na zajištění provozu a požadavky v oblasti výzkumu a vědecké práce na reaktoru přepravy jsou a nadále budou pravidelnou součástí provozu reaktoru.

Obr. 4: Naložení obalového souboru VPVR/M v hale reaktoru

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.

Jaderná forenzní analýza

a její role v jaderně bezpečnostní infrastruktuře státu

RNDr. Jan Lorinčík, CSc.[1], prof. Ing. Jan John, CSc.[2]

[1] Centrum výzkumu Řež s.r.o.

[2] FJFI ČVUT v Praze, Katedra jaderné chemie

Cílem příspěvku je vysvětlit základní principy oboru jaderně forenzní analýzy a její roli v jaderně bezpečnostní infrastruktuře státu. Součástí příspěvku je i stručný popis posledních aktivit Centra výzkumu Řež, jeho účasti na mezinárodním jaderně forenzním cvičení a mezinárodních vzdělávacích akcí v oboru.

The aim of this contribution is to explain basic principles of nuclear forensics and its role in the national nuclear security infrastructure. A brief description of the latest activities of Research Centre Řež and its participation in the international nuclear forensic exercise and in the international educational events in the field is also provided.

ÚVOD

Jaderná forenzní analýza (nuclear forensics) je relativně nový směr ve forenzních vědách, který se zabývá zkoumáním jaderných nebo jiných radioaktivních materiálů nebo klasických forenzních materiálů kontaminovaných radionuklidy v kontextu národního nebo mezinárodního práva nebo mezinárodních jaderných záruk. Pod pojmem jaderný materiál budeme rozumět materiál, který obsahuje jeden nebo více z následujících prvků: thorium, uran, plutonium, tj. prvků, které jsou klíčové pro jadernou energetiku a pro výrobu jaderných zbraní. Pod pojmem radioaktivní materiály budeme v tomto článku chápat materiály obsahující jiné radioaktivní prvky než Th, U, Pu. Speciálním případem jaderně forenzní analýzy je analýza pro účely jaderných záruk (nuclear safeguards), která je jedním z klíčových technických nástrojů mezinárodních orgánů (MAAE – Mezinárodní agentura pro atomovou energii, EURATOM – Evropské společenství pro atomovou energii) a národních regulatorních

orgánů (v České republice SÚJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost) na monitorování dodržování Smlouvy o nešíření jaderných zbraní (NPT – Non-proliferation treaty) a dalších souvisejících smluv a protokolů zaměřených na kontrolu evidence jaderných materiálů. Zjednodušeně řečeno, rozdíl mezi jaderně zárukovou analýzou a jaderně forenzní analýzou spočívá v tom, jaké zadání tyto analýzy řeší. V prvém případě je to odpověď na otázku, zda byla nebo nebyla porušena smlouva NPT, ve druhém případě se jedná o odpovědi na zadání vyšetřovacích orgánů (orgánů činných v trestním řízení) týkajících se původu, technologie, manipulace a zamýšleného použití zabaveného jaderného materiálu.

Jaderně forenzní analýzy jsou součástí infrastruktury národní jaderné bezpečnosti, jejímž úkolem je zabránit, aby jaderný materiál nebo jiný radioaktivní materiál byl zneužit pro kriminální nebo teroristické aktivity a předcházet sabotážím proti jaderným zařízením, včetně přepravy jaderných a radioaktivních materiálů. Hlavními prvky národní jaderně bezpečnostní infrastruktury jsou:

- organizační struktury státu zabezpečující adekvátní a včasnou reakci na mimořádné události v jaderné bezpečnosti (v ČR složky IZS – Integrovaného záchranného systému)
- speciální útvary policie pro vyšetřování terorismu a organizované trestné činnosti (v ČR NCOZ – Národní centrála proti organizovanému zločinu)
- výjezdní skupiny IZS provádějící předběžnou kategorizaci zachyceného jaderného nebo radioaktivního materiálu
- laboratoře provádějící jadernou forenzní analýzu jako součást podpory vyšetřovacích nebo jiných státních orgánů
- laboratoře provádějící klasickou forenzní analýzu (otisky prstů, DNA, atd.) důkazních předmětů kontaminovaných radioaktivním materiálem
- národní jaderně forenzní knihovny obsahující materiály jaderně palivového cyklu a jejich charakteristiky
- mezinárodní spolupráce v oboru jaderné bezpečnosti

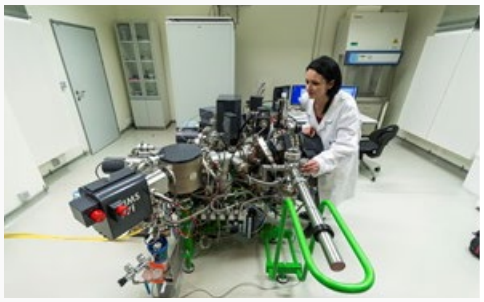
Význam jaderně forenzních analýz spočívá v klíčové schopnosti vypátrání zdroje jaderného nebo radioaktivního materiálu, který se dostal mimo zákonem požadovanou materiálovou evidenci. Navíc, samotná existence prověřených jaderně forenzních schopností státu může odradit jednotlivce nebo skupiny od pokusu o pašování jaderného nebo radioaktivního materiálu nebo nezákonné manipulace s nimi.

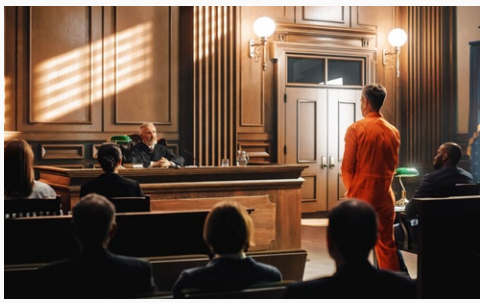
PAŠOVÁNÍ A NEZÁKONNÉ OBCHODOVÁNÍ S JADERNÝMI MATERIÁLY

Pašování jaderných materiálů je mezinárodní problém, protože se s nimi legálně obchoduje a jaderný materiál překračuje hranice států. Tím tedy existují příležitosti pro odklon tohoto materiálu do nepovolaných rukou, k tomu může dojít v kterékoliv fázi jaderného palivového cyklu. Podle databáze MAAE bylo mezi lety 1993–2021 potvrzeno 320 incidentů první kategorie s prokázaným nezákonným obchodováním a podvodnou činností zahrnující jaderný materiál, včetně vysoce obohaceného uranu, plutonia a plutonium-berylliových neutronových zdrojů [1]. Trend v počtu incidentů první kategorie měl od roku 2000 do roku 2021 včetně spíše klesající tendenci. Výhled v počtu a druhu incidentů s jaderným materiálem do dalších let s sebou však nese nejistoty v souvislosti s válkou v Evropě na území státu s rozvinutou infrastrukturou jaderné energetiky a snahami některých států o zpochybnění systému mezinárodních jaderných záruk a budování kapacit na získání technologií pro výrobu jaderných zbraní. Toto znamená i nové výzvy pro národní jadernou bezpečnost, včetně připravenosti laboratoří jaderně forenzních analýz.

ČINNOSTI PŘI ODHALOVÁNÍ NEZÁKONNÉHO OBCHODOVÁNÍ A PAŠOVÁNÍ JADERNÉHO MATERIÁLU

Na Obr. 1 jsou znázorněny čtyři hlavní typy činností – od detekce podezřelého jaderného nebo radioaktivního materiálu až po trestní stíhání nezákonného jednání. Podezřelý materiál může být zachycen například na hraničních přechodech nebo letištích pomocí





Obr. 1: Činnosti při potírání nezákonného obchodování s jadernými nebo radioaktivními látkami

detektorů ionizujícího záření, často i s využitím zpravodajských informací. V dalším kroku jsou k místu záchytu přivolány výjezdové týmy IZS, které jsou schopny provést analýzu materiálu na místě (kategorizaci), která musí dát odpověď na základní otázky typu:
Jsou materiály radioaktivní? Jaké je složení materiálu? Do jaké kategorie materiál patří (uran ochuzený, přírodní, lehce obohacený, vysoce obohacený; plutonium reaktorové nebo zbraňové kvality; radioaktivní látka průmyslová, medicínská)? Do jakých specializovaných laboratoří materiál poslat pro další analýzy?

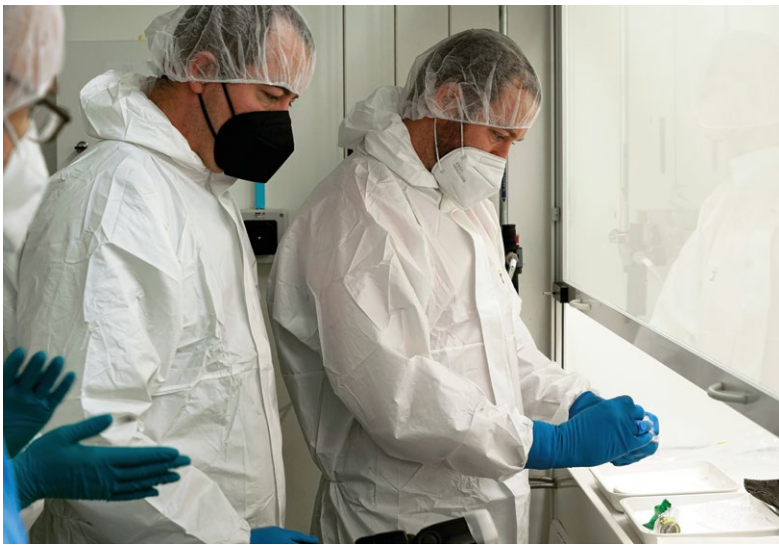
V určených jaderně forenzních laboratořích pak dochází k charakterizaci materiálu zaměřené na zodpovězení otázek vyšetřovacích nebo regulatorních orgánů státu. Mezi tyto otázky patří:
Jaký je původ nebo zdroj materiálu? Odkud se materiál vzal a kde a kým s ním bylo manipulováno? Jedná se o materiál, který se dostal mimo systém evidenční kontroly?

Činnosti označené v Obr. 1 jako „Kategorizace" a „Charakterizace" jsou oblasti, kde postupy jaderně forenzní analýzy hrají klíčovou úlohu. Jejich cílem je získání charakteristických materiálových znaků, které umožní rozlišit původ a historii materiálu, vyloučit/potvrdit výrobní procesy nebo zamýšlené použití. Velmi se doporučuje kombinovat jaderně-forenzní analýzy s „klasickou" kriminalistikou (otisky prstů, DNA, vlákna atd.) jako účinný postup pro nalezení propojení podezřelých osob a důkazních předmětů nebo materiálů.

MEZINÁRODNÍ JADERNĚ FORENZNÍ CVIČENÍ

Jednou ze základních podmínek fungování jaderně forenzních laboratoří je mít zaveden systém kvality, jehož součástí musí být pravidelné prověřování schopností laboratoře v mezilaboratorních jaderně forenzních cvičeních. Taková cvičení pořádá ve tříletých intervalech na příklad Mezinárodní technická pracovní skupina pro jaderně forenzní analýzy (ITWG – Nuclear forensics international technical working group) [4].

Obr. 2: Měření příkonu dávkového ekvivalentu jednoho z dodaných vzorků (foto: Michal Šafránek, ÚJV Řež)



Obr. 3: Otevírání lahvičky s důkazním materiálem (foto: Michal Šafránek, ÚJV Řež)

Poslední cvičení pod názvem CMX-7 (7th Collaborative Materials Exercise) se konalo v letech 2021/2022. Po delší době se tohoto typu cvičení zúčastnilo i uskupení laboratoří z České republiky pod vedením Centra výzkumu Řež (CVŘ). Toto uskupení tvořily následující laboratoře se schopnostmi a kapacitami v jaderné forenzní a klasické analýze: Centrum výzkumu Řež, ÚJV Řež, Ústav jaderné fyziky AV ČR, Katedra jaderné chemie FJFI ČVUT, Státní ústav radiační ochrany, Ústav ochrany proti zbraním hromadného ničení Univerzity obrany a Kriminalistický ústav Policie ČR. Cvičení se zúčastnilo více než 20 zemí. Ilustrativní záběry z cvičení jsou na Obr. 2–5. Cvičení bylo zakončeno konferencí k jeho vyhodnocení, která proběhla v Praze 10.–14. 10. 2022 a jejímž místním organizátorem bylo CVŘ se sponzorskou podporou ÚJV Řež. Už samotný fakt, že vedení ITWG požádalo CVŘ o pořádání konference k vyhodnocení výsledků cvičení, dával tušit, že si naše laboratoře nevedly špatně. V závěru čtyřdenního setkání zaznělo, že české laboratoře byly mezi těmi, které nejrychleji stanovily přesné izotopové složení jaderných materiálů, analyzovaných během cvičení. Kladně byla také hodnocena spolupráce českých jaderně forenzních laboratoří s Kriminalistickým ústavem Policie ČR, který byl v rámci české účasti na cvičení zodpovědný za klasické forenzní analýzy. Česká republika touto akcí (znovu)získala pověst země s vysokou technickou úrovní v oboru jaderně forenzních analýz.

ZLEPŠOVÁNÍ KVALIFIKACE A SCHOPNOSTÍ JADERNĚ FORENZNÍCH LABORATOŘÍ

Kromě mezilaboratorních cvičení musí pracovníci jaderně forenzních laboratoří neustále vylepšovat svoje technické dovednosti, přicházet s novými analytickými postupy a obecně zvyšovat svoji znalostní základnu tak, aby mohli reagovat na nové výzvy v oblasti národní nebo mezinárodní jaderné bezpečnosti. V této souvislosti mnoho zemí, včetně ČR, využívá programu vlády Spojených států amerických realizovaném Úřadem pro detekci a prevenci pašování jaderného materiálu (Office of Nuclear Smuggling Detection and Deterrence – NSDD), který je součástí Úřadu pro národní jadernou bezpečnost (National Nuclear Security Administration) Ministerstva energetiky (Department of Energy).

Obr. 4: Vážení vzorku (foto: Michal Šafránek, ÚJV Řež)

Obr. 5: Analýza práškového materiálu v rastrovacím elektronovém mikroskopu vybaveném detektorem rentgenovského záření (foto: Michal Šafránek, ÚJV Řež)

V roce 2022 NSDD zorganizoval pro jaderně forenzní laboratoře a vybrané složky IZS ČR pracovní semináře, ve kterých si jejich účastníci osvojili současné nejlepší poznatky z praxe v oblasti řešení incidentů s jaderným materiálem.

Pro udržitelnost vysoké technické úrovně v oboru jaderně forenzních analýz je neméně důležitá příprava nových odborníků na vysokých školách. I v tomto směru má Česká republika co nabídnout. Ve druhé polovině roku 2021 byl na FJFI ČVUT v Praze akreditován nový doktorský studijní obor „Bezpečnost a zabezpečení jaderných zařízení a forenzní analýzy jaderných materiálů“ [5], který reaguje na současné i budoucí potřeby odborníků v oblasti národní jaderné bezpečnosti. Nový doktorský program pokrývá čtyři široké oblasti:

- bezpečnost a zabezpečení jaderných zařízení,
- radiační ochrana při mimořádných situacích,
- jaderná forenzní analýza,
- jaderná kyberbezpečnost,

a je garantován širokou mezikatedrální a mezifakultní spoluprací pracovišť ČVUT. Oblast jaderné forenzní analýzy je zaštiťována Katedrou jaderné chemie FJFI, kde studenti získávají teoretické znalosti ze tří základních oblastí:

- jaderná forenzní analýza,
- instrumentální a radiochemické metody pro jadernou forenzní analýzu,
- jaderná a radioanalytická chemie.

Nad rámec této úzké specializace si studenti podle potřeby a svého předchozího vzdělání doplňují a rozšiřují vzdělání v oblasti jaderné chemie. Experimentální část doktorské práce je prováděna ve spolupráci s externími pracovišti, mezi něž patří většina pracovišť zmíněných ve čtvrtém odstavci výše, včetně CVŘ. Prvních pět studentů nového programu (z nich tři v oblasti jaderné forenzní analýzy) úspěšně pokračuje ve studiu.

SHRNUTÍ

Jaderná forenzní analýza je oborem, který se zabývá identifikací fyzikálních a chemických vlastností jaderného nebo jiného radioaktivního materiálu, ze kterých lze určit jeho původ, historii, technologii a odhadnout jeho zamýšlené použití. Tyto analýzy slouží jako podpora vyšetřování při soudním stíhání a při inspekční činnosti státních orgánů a stávají se tím klíčovou součástí národní jaderně bezpečnostní infrastruktury. Technická vyspělost v oboru jaderně forenzních analýz umožňuje státu účinně a včas reagovat na jaderné incidenty a má preventivní odrazující účinek na potenciální pachatele nezákonného obchodování nebo manipulace s jaderným nebo radioaktivním materiálem.

Reference:

[1] IAEA INCIDENT AND TRAFFICKING DATABASE (ITDB), 2022 Fact Sheet, https://www.iaea.org/sites/default/files/22/01/itdb-factsheet.pdf

[2] Zapojení do IZS – Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v.v.i., https://www.sujchbo.cz/zamereni-ustavu/zapojeni-do-izs

[3] Předseda KS v Hradci Králové: Žádný z čekatelů není při navrhování na jmenování soudcem účelově upozaďován – Česká justice, https://www.ceska-justice.cz/2017/05/predseda-ks-hradci-kralove-zadny-cekatelu-neni-pri-navrhovani-jmenovani-soudcem-ucelove-upozadovan

[4] ITWG, https://www.nf-itwg.org

[5] Bezpečnost a zabezpečení jaderných zařízení a forenzní analýzy jaderných materiálů – FJFI ČVUT v Praze, https://nssf.fjfi.cvut.cz/cz

prof. Ing. Jan John, CSc.

jan.john@fjfi.cvut.cz

V roce 1977 dokončil studium na FJFI ČVUT v Praze, kde od té doby působí. Absolvoval dva dlouhodobé zahraniční pobyty (1985–1986 University v Oslo a Trondheimu, 1987–1990 SÚJV Dubna). Hlavními oblastmi jeho odborného zájmu jsou radioanalytické metody, separační metody, jaderná spektroskopie, zpracování radioaktivních odpadů, monitorování a speciace radionuklidů v životním prostředí. Koordinuje dva mezinárodní projekty 7. RP EU a je zodpovědným řešitelem řady dalších národních i mezinárodních projektů, včetně projektů 6. a 7. RP EU a projektů pro MAAE Vídeň. V letech 2003–2010 byl ředitelem CRRC ČVUT, od roku 2010 vede Katedru jaderné chemie FJFI ČVUT v Praze. Je členem Vědecké rady FJFI ČVUT v Praze a Rady ÚJF AV ČR a autorem nebo spoluautorem téměř dvou stovek příspěvků v recenzovaných časopisech nebo sbornících konferencí.

RNDr. Jan Lorinčík, CSc.

jan.lorincik@cvrez.cz

V roce 1984 absolvoval obor Fyzikální elektronika na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy a na témže pracovišti obhájil v roce 1991 disertační práci v oboru Kvantové elektroniky a optiky. Prošel různými pozicemi vědeckého pracovníka na Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR a Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR, na posledně jmenovaném ústavu byl vedoucím oddělení a členem Rady instituce. Významné zkušenosti v oboru mikroanalýzy a v aplikaci metody SIMS získal v USA jak v prostředí národních laboratoří (NIST 1994–1997), tak na univerzitách (University of Virginia 2002, Arizona State University 2003–2005). Od roku 2015 je vedoucím výzkumného týmu v Centru výzkumu Řež, kde se zabývá aplikací mikroanalytických metod v jaderné forenzní analýze a materiálovém výzkumu.

Jules Horowitz Reactor Operation Plan 2040 - JHOP2040

Marek Mikloš[1], Petri Kinnunen[2], Jean-Pierre Chauvin[3], Gilles Bignan[3], Joris Van den Bosh[4], Victor Esteban Gran[5]

[1] Centrum výzkumu Řež s.r.o.

[2] Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

[3] Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

[4] The Studiecentrum voor Kernenergie / Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire

[5] European Commission, Joint Research Centre, Brussels, Belgium

Cílem projektu JHOP2040 je na evropské úrovni vytvořit strategii, která se bude zabývat zdroji, financováním a organizačními faktory pro co nejefektivnější využití přístupových práv Euratomu k připravovanému materiálovému testovacímu Reaktoru Julese Horowitze (JHR). Projekt JHOP2040 realizuje konsorcium složené z deseti evropských partnerů, podílejících se na výstavbě JHR. Součástí projektu je mezinárodní vědecká poradní skupina a podpůrná skupina, složená z externích odborníků na provoz výzkumných zařízení, neevropských členů konsorcia JHR a také zástupců členských států Euratomu, které nejsou partnery konsorcia JHR.

JHOP2040 project will deliver a European level strategy addressing resourcing, financing and organisational factors for the most effective way of utilising the Euratom access rights to the forthcoming Jules Horowitz Material Test Reactor (JHR). JHOP2040 is being carried out by a consortium gathering ten partners representing the European partners involved in building the JHR. The project includes an International Scientific Advisory Group and Support Group consisting of external experts in research facility operations, non-European JHR consortium members as well as representatives from Euratom members states, which are not partners in the JHR consortium.

INTRODUCTION

Material Testing Reactors (MTRs) have been, for many decades, key research tools for fuel and material behaviour studies under neutron flux, supporting nuclear industries, research institutes and regulators. Various studies have shown that, whatever the progress in simulation, MTRs will remain a necessity for the qualification of new fuel and material under irradiation, notably in support to safety demonstration. In Europe, a well-integrated and international MTR network was set up few decades ago and is still in existence. However, as most MTRs (BR2, HFR, LVR-15, HBWR, MARIA) were built in the 1960s, the fleet is ageing and needs renewal. Currently, in response to this need, the Jules Horowitz Material Test Reactor) is under construction.

JHR will be a reference international user facility, to investigate and understand material and fuel behaviour in an extreme nuclear environment, with irradiation loops reproducing the operational conditions of the different power reactors. JHR is designed to be flexible in terms of irradiation conditions, which will allow its use by many different end users (researchers, industries, safety authorities, medical community, etc.) and for many different technologies (LWR, SMR, GENIV, fusion, isotope production, etc.), making it a globally unique centre of excellence.

JHR will be built and managed within the framework of an international cooperation between several organizations, bound by the Consortium Agreement signed in March 2007 by partners from nine countries, plus the European Commission (EC) with 6% access rights. JHR is expected to be in operation at the beginning of the 2030's.

The potential advantages of the JHR to Europe are clearly of key-importance. To realise this potential, however, requires careful planning. To this end, the EURATOM indirect actions work programme 2019–2020, in its topic NFRP-16, called for proposals to develop a workplan to optimise the EC's utilisation of its access rights. The Jules Horowitz Material Test Reactor Operation Plan 2040 (JHOP2040) consortium has been set up to deliver a high-quality workplan.

MAIN OBJECTIVES

The main objectives set for this planning have been set as follows:

- Strengthen and widen the JHR research network, by bringing together relevant stakeholders and interest groups, to identify and review their current and future needs in terms of research and irradiation experiments as well as PIE (Post Irradiation Exams) studies. It is especially important that this roadmap enhances collaboration with organisations, within and outside of the current JHR consortium, that can utilise JHR via Euratom access rights.

- Make full use of the planned JHR capacity by promoting and enhancing the collaboration between potential users, while taking into consideration the evolution of nuclear materials, fuels and measurement technologies but also considering the future needs of education, training and widening access in the nuclear industry. This will include research, demonstration and innovation concerning the existing Gen II, III and IV fission reactors as well as fusion reactor needs. JHOP2040 intends to promote, through the listed activities, a better understanding, a closer dialogue and active co-operation between research, industry, associations and safety authorities to support future use of safe, efficient and sustainable nuclear energy.

- Create the roadmap for the first four years of JHR operation ("Roadmap-4") by employing the research infrastructure available and taking into account the commissioning phase experience on operation and objectives #1 and #2. This first period of operation will differ from the later ones as the available experimental fleet will be limited and the long-term research programmes, including the proprietary programmes, will be being built at the same time, so flexibility and lean cooperation will be needed.

- Create the roadmap for 15 years from the start of first irradiation ("Roadmap-15"), i.e., covering the following 11 years after Roadmap-4. Future fuel and material research will be emphasized also within the EU ORIENT-NM project that is planning the co-funded European partnership on nuclear materials. In addition, the production of medical isotopes and its effects on e.g., reactor availability and cost breakdown will be investigated.

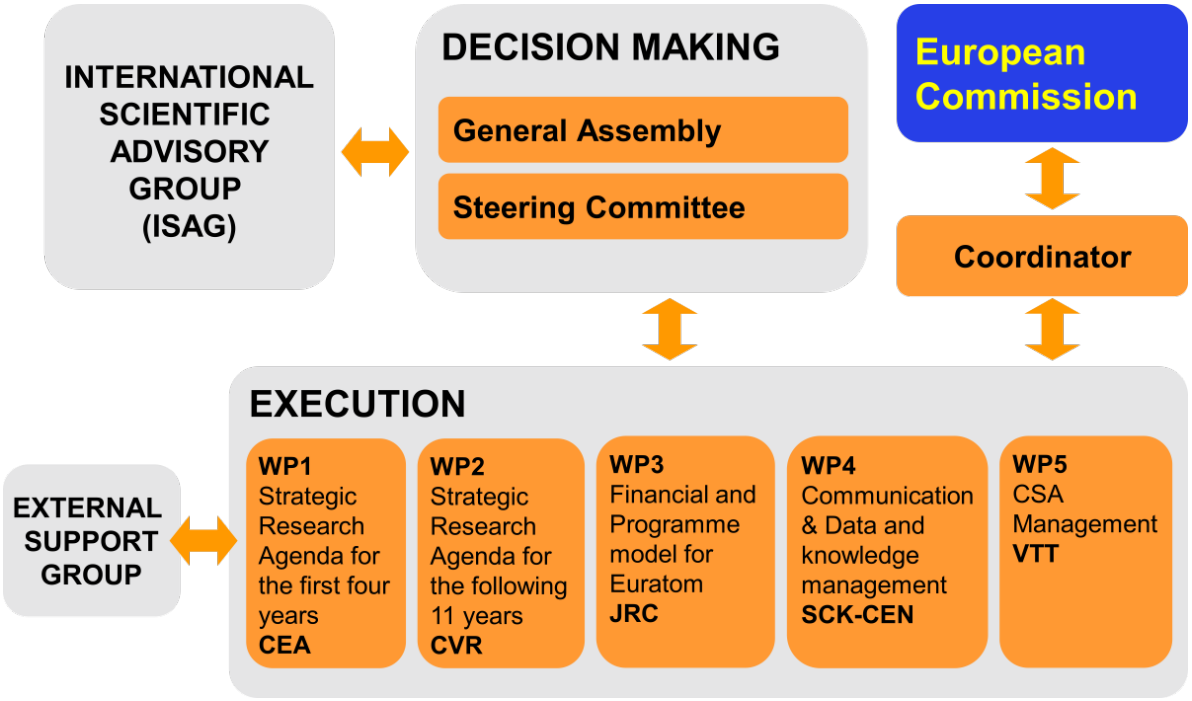
The roadmap, for the first 15 years of operation, will include the research programme structure and governance including resource and cost breakdown, as well as the model for the financing of the programmes.

MAIN PARTNERS

- VTT Technical Research Centre of Finland Ltd
- Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)
- Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)
- Centrum výzkumu Řež
- Électricité de France
- Joint Research Centre – European Commission (JRC)
- National Nuclear Laboratory Limited (NNL)
- The Studiecentrum voor Kernenergie/Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire (SCK CEN)
- Studsvik Nuclear AB
- ÚJV Řež

Project structure

JHOP2040 is divided into five distinct work packages. Each of the work packages (WPs) is led by a partner with the necessary expertise and ability in the relevant field. The main aims of each work package are summarised below.



Pic. 1: Structure of the JHOP2040

WORKPLAN

WP1: Strategic research agenda for the first four years of the JHR operation (Roadmap-4)

The objective of WP 1 is to make a detailed plan for the first experimental period (four years), taking into consideration the start-of-operation fleet of experimental devices and the requirements of the stakeholders (input from WP4). The experimental devices currently available or predicted to become available by the start of JHR operations, are MICA (for testing of structural materials) (3 units), MADISON (testing of LWR fuel samples no clad failure) and ADELINE (testing of LWR fuel samples where clad failure is a risk or experimental objective) (1 unit each) [1][2]. The capabilities of these devices determine the actual experimental matrix that can be performed in the reactor during the first four years. The plan will also consider the interaction of available devices with the range of exposure conditions achievable in different JHR locations (using the outcomes of the commissioning phase) and incorporate lessons learnt from other MTR operators concerning the constraints associated with running different devices / experiments in parallel. Since the advanced modelling and simulation techniques, which will play a vital role in the interpretation of the test results, require detailed knowledge of the uncertainties related to the test conditions and measurements, this topic will be also addressed. Also, the need for PIE studies outside JHR and the corresponding procedures related to that will be examined.

WP2: Strategic research agenda for the following 11 years after the first programme period of the JHR operation (Roadmap-15)

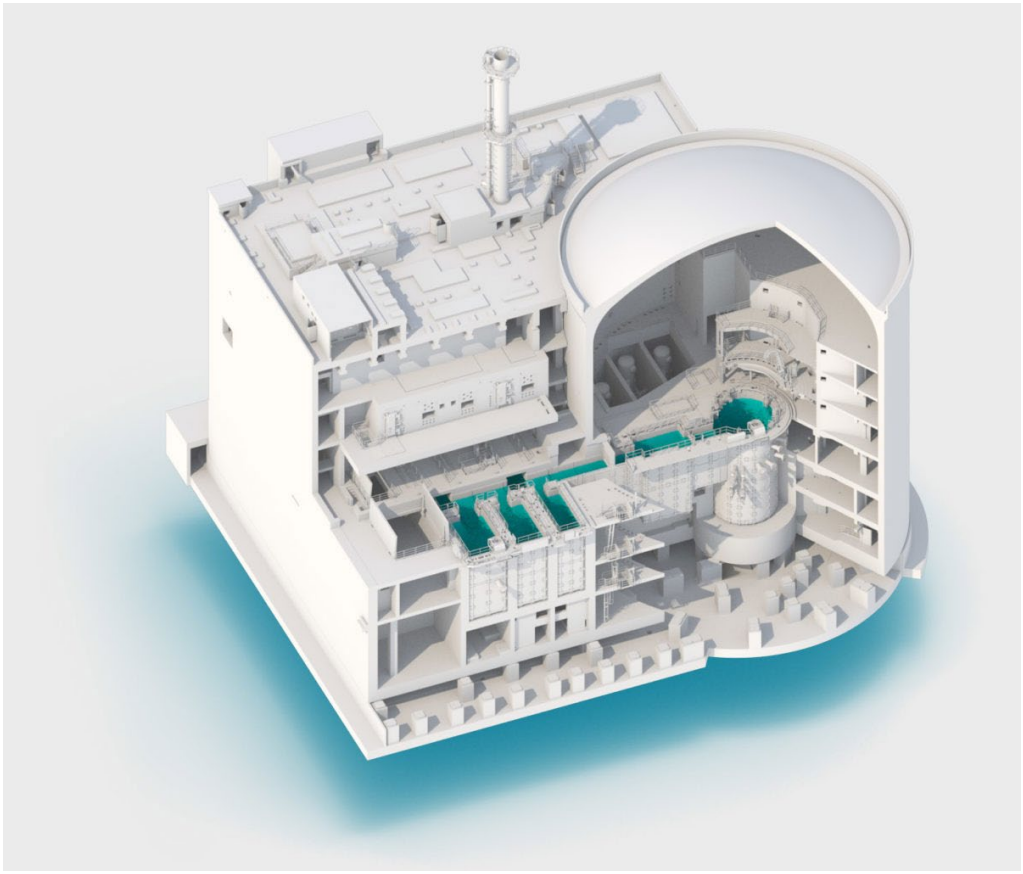
In WP 2 the goal is to prepare planning for the following 11 years (after the first programme period presented in WP1) of operation, taking into account the foreseen schedule for extending the current experimental fleet with technologies under construction today, or being planned to be realised after the start of operation of the JHR. This WP is taking into account the detailed planning of WP 1 in organisation, scheduling, resourcing, quality managing, etc. of the work. One of the tasks will be also dedicated to the continuation of the program for current and new, innovative nuclear fuels with use of MADISON and ADELINE experimental devices. An important aspect of the roadmap is to facilitate, as far as possible, access to neutron exposures which provide the most direct predictors of operational conditions, reducing reliance on extrapolations from highly accelerated or surrogate irradiations. The plan will consider the advantages to Euratom of both, short and long-term experiments. Also, the need for PIE studies outside the JHR, corresponding procedures related to that as well as their potential future evolution will be examined.

WP3: Financial and Programme model for Euratom

In WP 3 the goal is to construct the actual programme model for Euratom. The proposed model needs to cover the programme structure itself and the governance of it, as well as the cost breakdown and financing solutions for the programmes. Relation to other Work Packages: Input from WPs 1 and 2. The programme and financing models need also to reflect the different schedules for the first period of operation vs. long-term operation. The results will be evaluated and endorsed by WP4.

WP4: Communication & Data and knowledge management

WP4 focuses on communication of the roadmap towards stakeholders and EU member states, either participating in the JHR consortium or not. In addition, WP4 includes data and knowledge management, as well as take care of communication with the parallel proposal NFRP-08 CSA ORIENT-NM and related organisations. Communication and documentation provided from stakeholders and partners, in the framework of the JHR Roadmap preparation and dissemination, will be stored according to current document management quality standards, thereby applying modern ICT tools to enable traceability of document changes and updates as well as the respective sources of input or comments. These will remain available for later reference or consultation during the execution phase of the roadmap in JHR.



Pic. 2: 3D Visualization of the Jules Horowitz Reactor

WP5: Project Management

WP5 ensures efficient overall management of JHOP2040. Specific objectives include:

- Overall coordination and management of the project
- Productive communication with the EC, within the Consortium, and with external bodies
- Financial, legal and administrative management
- Data management in accordance with the H2020 Pilot on Open Research Data

COMMUNICATION STRATEGY

The JHOP2040 dissemination activities ensure the JHOP2040 roadmap is well known, and actively communicated. A key aspect is to engage closely Member States and stakeholders, who have indicated their willingness to participate in the roadmap preparation phase, in the elaboration and assessment of the JHOP2040 Roadmap-4 (WP1) and Roadmap-15 (WP 2), as well as the general programme and financing model. Hence, all JHOP2040 communication actions aim to support efficient and active co-creation with stakeholders, dissemination, knowledge sharing, and management. An additional objective is for targeted spreading and controlled dissemination of JHOP2040 outcomes to relevant audiences.

Main communication channels include:

- The JHOP2040 project website: https://www.jhop2040-h2020.eu/
- Events organization: project and coordination meetings
- Events participation
- Conferences
- Stakeholder networks and relationships
- Co-creation Workshops
- The JHR school (2021)
- Publications
- The Euratom website

Preliminary key events for JHOP2040 communications include e.g., the SNETP General Assembly, and the Euratom Scientific and Technical Committee meetings. Conferences will include at least the annual NUGENIA forum, the FISA conference and the IGORR conference to disseminate the finished roadmap.

The JHOP2040 communications act as a two-directional interface towards Euratom stakeholders, providing a platform of multiple methods. Functional and continuous communication with the member states inside and outside the JHR consortium, and the Euratom Scientific and Technical Committee, will increase the understanding of needs and constraints, and promote the road map. The participation of project consortium members in several platforms and groups will also benefit getting feedback from stakeholders.

CONCLUSIONS

The JHOP2040 project started in 2020 and has progressed well. The project will be running up to September 2023. The planning of the future operation has required thorough thinking on how especially the first operation phase will be run. The beginning of operation is in many ways different from later ones as there will be still partly qualifications tests at the reactor running at the same time when operation starts.

There will be continuation for this article. In the following papers authors will give more insight into the experimental capabilities and describe in more detail what kind of technological solutions will be included in the JHR, to tackle the scientific challenges with the existing and forthcoming reactor materials and fuels.

This project has received funding from the Euratom work programme 2014–2020 under grant agreement No. 899360.

References:
[1] https://jhrreactor.com/en/home/
[2] G. Bignan & All, JHR experimental capacity under development for the start-up of the reactor and the years after, RRFM 2023 6–8 June 2022, Budapest, Hungary

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 Jaderná energetika 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.

Dvacet let od povodní v Řeži

Ing. Alena Rosáková
ÚJV Řež, a. s.

V srpnu 2002 dorazila povodeň přes Prahu až do Řeže. Neočekávaná 500letá voda, která tady kulminovala ve dnech 13. a 14. srpna, byla rozsahem a důsledky největší mimořádnou událostí od založení Ústavu jaderné fysiky v roce 1955. Jen díky obětavému nasazení tehdejších zaměstnanců, předvídavé přípravě a dobré koordinaci krizového štábu nedošlo v areálu s jadernými instalacemi k žádnému úmrtí a chemické látky ani zdroje radioaktivního záření neohrozily životní prostředí.

In August 2002 a flood came through Prague to Řež. The unexpected five-hundred-year flood, which peaked here on 13 and 14 August, was the largest emergency event in terms of its extent and consequences since the establishment of the Institute of Nuclear Physics in 1955. It was only thanks to the dedication of the staff at that time, the prudent preparation and good coordination of the emergency staff that no deaths occurred on the site and no chemicals or sources of radioactive radiation threatened the environment.

OCHRANA AREÁLU PŮVODNĚ POČÍTALA SE STOLETOU VODOU

Přestože v době založení ústavu v padesátých letech minulého století nebyly požadavky na umístění jaderných zařízení explicitně definovány, splňuje poloha řežského areálu většinu dnešních pravidel pro bezpečnost takových lokalit. Z potenciálních rizik přichází v této oblasti do úvahy zejména nebezpečí záplav a pádu letadla. Obě tyto možnosti byly v ochraně zohledněny. Proti záplavám byla vystavěna protipovodňová hráz na 100letou vodu, pro elimininaci rizika pádu letadla je nad celým prostorem bezletová zóna o poloměru 1,5 km a výšce 600 m. Kromě toho je už dnes areál vybaven i pokročilým systémem bezpečnostní ochrany jaderných zařízení a materiálů, který vyhovuje požadavkům české legislativy a celosvětové praxi.

Situace ohrožení záplavami je součástí pravidelně aktualizovaného vnitřního havarijního plánu ÚJV Řež. Právě podle jeho instrukcí se postupovalo i v raných fázích povodní v roce 2002. Povodeň, která mimo ÚJV Řež postihla i další ústavy a instituce v areálu, tehdy nakonec dosáhla úrovně 500leté vody a byla mnohem větší, než ochranná protipovodňová opatření (hráz, havarijní plán) uvažovala. Povodněmi byla proto zasažena podstatná část budov a zásadně narušena vnitřní technická infrastruktura areálu. Postup podle havarijního plánu a aktivní i konzervativní opatření krizového štábu naštěstí zabránily ohrožení jaderných zařízení a pracovišť s ionizujícím zářením, nedošlo k úniku radioaktivních nebo jiných škodlivých látek do okolí ani k bezprostřednímu ohrožení lidí. Velkou měrou k tomu přispěla aktivita, obětavost a nasazení

Zdroj: obec Husinec

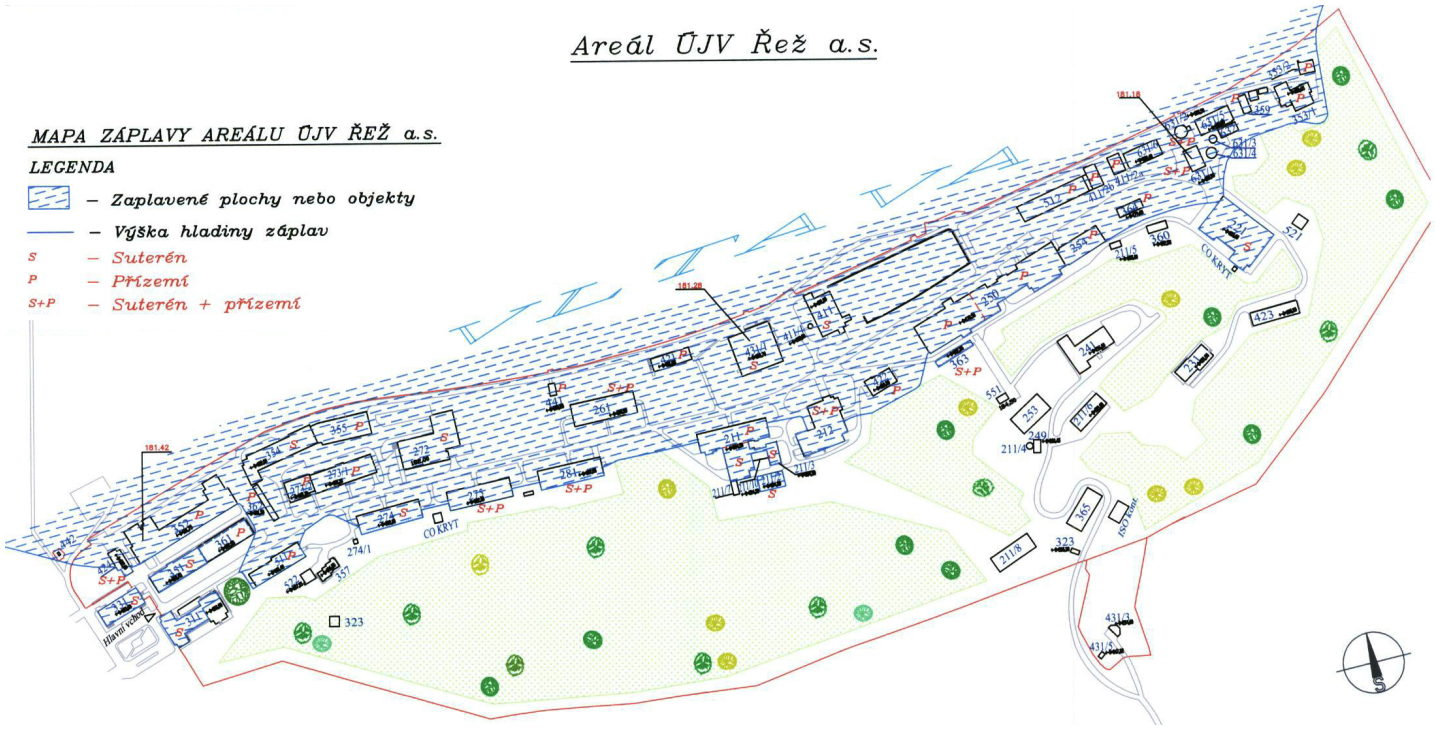
zaměstnanců při záchranných i obnovovacích pracích a výpomoc externích skupin (zejména hasičských sborů).

JAK ŠLA VODA…

Po vyhlášení povodňové aktivity povodí Vltava byly 8. srpna 2002 uzavřeny protipovodňové zpětné klapky na výtocích dešťové kanalizace z areálu do Vltavy. V té době se ještě rezerva cca 3 m do protipovodňové hráze zdála dostatečná, přestože se kvůli síle průtoku v řece už objevila voda v některých nízko položených částech areálu. Na základě dostupných informací bylo zaplavení areálu odhadnuto na úrovni protipovodňové hráze, tehdejší generální ředitel ÚJV Řež František Pazdera proto svolal krizový štáb, v areálu byla vyhlášena mimořádná událost 2. stupně a byl informován Státní úřad pro jadernou bezpečnost.

Hlavní povodňová vlna prošla areálem 13. – 14. 8. 2002. Během kulminace vody byl aktivován speciální režim fyzické ochrany areálu, jaderných zařízení a jaderných materiálů, který byl řízen ze záložního řídicího centra. Krizový štáb, vybavený telefonem, faxem, xeroxem a e-mailem byl přemístěn do výše položené ubytovny v obci, kde jeho pracovníci drželi stálé služby. První obhlídka areálu po částečném opadnutí vlny ukázala, že zatopení přesáhlo protipovodňovou stoletou hráz, byly zatopeny suterény a sklepy i části prvních pater většiny budov areálu.

Ihned po poklesu vody pod úroveň hráze začaly záchranné a rekonstrukční práce. V první fázi šlo o masivní čerpání vody z areálu, na kterém se kromě vlastního hasičského sboru podílelo i sedm útvarů dobrovolných



Obr. 1: Mapa záplavy areálu ÚJV Řež (zdroj ÚJV Řež)

Zdroj: archiv knihovny ÚJV Řež

hasičských sborů z okolních obcí. Vyčerpávaná voda byla průběžně dozimetricky kontrolována, měření zvýšené hodnoty naštěstí nezaznamenala. Speciální pozornost byla v průběhu záplavové vlny a likvidace následků věnována objektu Radiochemie, ve které je umístěna infrastruktura horkých a polohorkých komor pro manipulaci s ozářenými materiály. Ventilace budovy byla v provozu ze zvláštního přívodu, průběžně zde probíhala dozimetrická měření. Jaderná zařízení v areálu, tj. reaktory LVR-15 a LR-0 a sklad vysoce aktivních odpadů (VAO), nebyly z hlediska jaderné bezpečnosti ohroženy. Voda v nich zasáhla pouze přízemí a suterény; sklad VAO nebyl povodní dotčen vůbec. Příznivý radiační stav lze přičíst i důslednému přemístění všech potenciálně ohrožených radioaktivních zdrojů ještě před povodní.

V dalších fázích sanace následků pokračovala mytím komunikací, vyklízením zatopených prostor, sběrem a odvozem odpadů. Veškeré práce probíhaly za přísných hygienických opatření a zaměstnanci, kteří se na nich podíleli, absolvovali očkování proti žloutence A a B a gamaglobulinem. Řežský areál se nakonec podařilo zprovoznit v relativně krátké době, jakkoliv dozvuky následků povodně bylo nutné řešit ještě řadu měsíců poté.

Zdroj: archiv knihovny ÚJV Řež

Zdroj: archiv knihovny ÚJV Řež

SOLIDARITA A OCENĚNÍ OBĚTAVOSTI ZAMĚSTNANCŮ

Záchranné práce byly koordinovány i s místním krizovým štábem obce Husinec-Řež, jeho zástupce byl členem krizového štábu ÚJV Řež. Na ubytovně ÚJV Řež byli dočasně ubytováni obyvatelé obce ze zatopených domů. Výrazem solidarity byla i společná sbírka ve prospěch 13 zaměstnanců, závažně postižených povodněmi. Obětavost a úsilí zaměstnanců při přípravě a zvládání následků povodně vysoce ocenil generální ředitel ÚJV Řež F. Pazdera v děkovném dopise.

NA ZLEPŠENÍ PROTIPOVODŇOVÉ OCHRANY AREÁLU SE PRACUJE I DNES

Hlavní část protipovodňové ochrany ÚJV Řež tvoří i nadále ochranná hráz v délce 0,995 km. Prochází jí šest výpustí dešťových odpadních vod z areálu, na břehové části jsou osazeny protipovodňovými uzávěry. S ohledem na zkušenosti z povodně v srpnu 2002 a zejména na nedávný rozsáhlý geofyzikální průzkum hráze, který prokázal její problematická místa, se ÚJV Řež rozhodlo se pro opravu částí hráze. Zahrnuje instalaci návodního těsnění hráze z bitumenové geomembrány (kompozitní prefabrikovaná membrána z mechanicky odolné výztužné geotextilie, penetrované asfaltovou směsí), která bude chráněna kamenným záhozem, a obnovu oplocení. V rámci opravy budou provedeny i drenáže pěti úseků na vzdušné straně hráze, opravena opevnění sedmi koryt od hrázových výustí a obnovena komunikace. Cílem rozsáhlé investiční akce je obnovení projektové ochranné funkce hráze proti pronikání vody při povodňových stavech do areálu.

Zdroj: Souhrnná zpráva o následcích povodně 2002 v areálu ÚJV Řež, a. s.

Ing. Alena Rosáková

alena.rosakova@ujv.cz

Vystudovala obor Automatizované systémy řízení v ekonomice na Vysoké škole ekonomické v Praze. Řadu let vedla marketing v oblasti informačních technologií a spolupracovala na partnerských projektech pro společnosti Microsoft a Apple. Její zkušenosti zahrnují i řízení obchodních aktivit v oblasti technologického vzdělávání a podíl na HR vedení specializovaných týmů. Marketingové vzdělání si doplnila kurzy v oblasti PR a mezinárodním certifikátem CIMA. Od roku 2014 pracuje na seniorní pozici specialisty pro marketing a komunikaci v ÚJV Řež, a. s.

Z knihy „Vznik a historie státního dozoru nad jadernou bezpečností“ 11. 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.

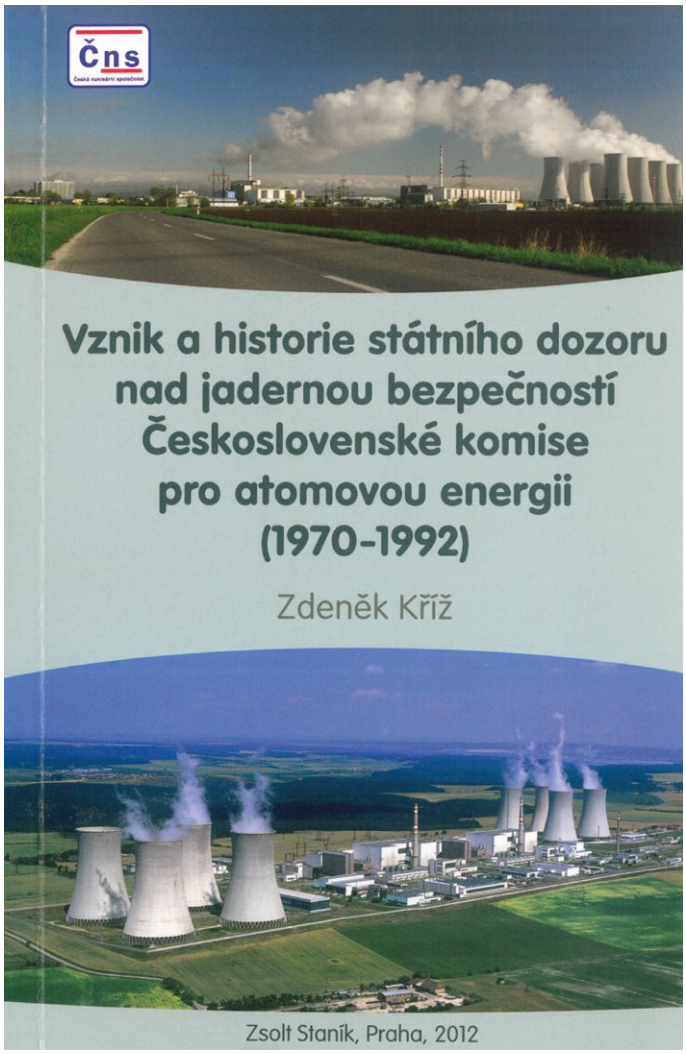
O počátcích jaderného dozoru v Československu poutavě píše Ing. Zdeněk Kříž, z jehož knihy „Vznik a historie státního dozoru nad jadernou bezpečností Československé komise pro atomovou energii (1970–1992)“ vám přinášíme některé vzpomínky na začátky tohoto mladého, ale dynamicky se rozvíjejícího odvětví.

OBSAH BEZPEČNOSTNÍ ZPRÁVY

Návod na obsah a strukturu bezpečnostních zpráv byl zpracován v MAAE poprvé v roce 1970 na základě panelu odborníků, který se konal v roce 1969. Tohoto panelu se účastnil J. Beránek spolu se známými zahraničními odborníky a zakladateli jaderné bezpečnosti, jako byli v té době A. Ganguly (Indie), A. Birkhofer (Německo), R. Gausden (Velká Britanie) a E. Iansiti (Itálie). Krátce po jeho vydání ČSKAE měla tento dokument a jeho překlad k dispozici a distribuovala ho všem organizacím, které měly připravit bezpečnostní zprávu. Postupně však bylo potřebné tento obecný dokument podrobněji specifikovat zejména v části havarijních analýz, seznamu analyzovaných událostí, tzv. design basis accident, kritérií přijatelnosti apod. Tento návod bylo nutné především aplikovat na různé typy bezpečnostních zpráv (zadávací, předběžná, předprovozní) a různá jaderná zařízení, a proto bylo dobrou praxí, že obsah každé bezpečnostní zprávy byl předem dozorem s odpovědnou organizací podrobně projednán a dohodnut. V roce 1988 byl v rámci RVHP zpracován dokument „Typový obsah technického zdůvodnění bezpečnosti (TOB)“, tj. bezpečnostní zprávy jaderných elektráren, a vydán v modré řadě jako číslo 5 v roce 1988. Tento dokument v zásadě odpovídal doporučení MAAE. Bylo proto dobré, že byl oficiálně vydán RVHP, neboť tím pádem bylo mnohem snadnější jeho uplatňování zavést do naší praxe. Později bylo snahou dozoru zavést používání bezpečnostního návodu Regulatory Guide 1.70. amerického dozoru NRC, který obsahoval velmi podrobné požadavky na zpracování bezpečnostní zprávy. Nakonec se to podařilo až SÚJB, když docházelo k revizím bezpečnostních zpráv v rámci souhlasů s dalším provozem bloků v Dukovanech a Temelíně.

ZAVEDENÍ LIMITŮ A PODMÍNEK BEZPEČNÉHO PROVOZU

Limity a podmínky bezpečného provozu jaderného zařízení (LaP) byly a jsou základním bezpečnostním dokumentem, který stano-



vuje bezpečnostní limity pro různé provozní parametry a podmínky provozuschopnosti zařízení, nastavení bezpečnostních systémů tak, aby tyto limity nebyly překročeny, požadavky na činnost obsluhy v případě jejich překročení, a dobu, dokdy má být zjednána náprava, tzv. allowed outage time (AOT), pokud událost nevede přímo k odstavení reaktoru. Je to vrcholný bezpečnostní dokument, který vychází z analýz v bezpečnostní dokumentaci (hlavně z bezpečnostní zprávy), dále z provozních předpisů, dokumentace zajištění jakosti a dalších dokumentů. Tento dokument podle zákona č. 28/1984 Sb. dozor schvaloval stejně jako každou jeho změnu. Porušení limitů a podmínek i bez jakýkoliv následků bylo považováno za závažnou událost, která musí být dozoru hlášena a analyzovány příčiny porušení. S cílem získat co nejvíce informací o bezpečnosti provozu byla zavedena povinnost hlásit čerpání dob neprovozuschopnosti důležitých zařízení, které se staly později bezpečnostními indikátory dozoru. Spouštění bloků JE V-1 a jejich počáteční provoz probíhal v souladu s praxí v SSSR, kde však, jak již bylo zmíněno, dokument obdobný LaP neexistoval. V sovětské praxi se používal dokument zvaný Technologický reglement (předpis), který však neobsahoval některé důležité části LaP, jež byly uvedeny v doporučení bezpečnostního návodu MAAE „Limits and Conditions for Safe Operation of NPPs". V dokumentu MAAE však nebyly informace pro konkrétní jaderné zařízení, protože se jednalo o dokument obecného charakteru. Proto bylo rozhodnuto urychleně LaP zpracovat ještě před spuštěním JE V-2.

Sovětské vědecké vedení spouštění nám zpracování LaP nedoporučovalo s poukazem na to, že jejich dokument je dostačující. Vedení státního dozoru se ale rozhodlo radu nerespektovat a dát LaP do samostatného paragrafu připravovaného zákona a uložit provozovateli povinnost předložit tento dokument a jeho změny dozoru ke schválení. Neprodleně byly zahájeny přípravy našich prvních LaP. Důležité bylo, že se podařilo získat další významný dokument – vzorové LaP firmy Westinghouse pro reaktory typu PWR. Konkrétně je získal Jiří Suchomel z VÚJE, který s ČSKAE v oblasti jaderné bezpečnosti dlouhodobě spolupracoval a který je přeložil do češtiny. S využitím obou dokumentů společně s existujícím ruským technologickým předpisem byla tvorba tohoto dokumentu zahájena.

První návrh LaP vytvořila pracovní skupina vedená Václavem Vyskočilem ze Škody Plzeň. Posuzování prvního návrhu se účastnili odborníci JE V-1, V-2, Dukovan, dále VÚJE, ČSKAE a jako pozorovatelé i ruští experti z vědeckého vedení a provozu, kteří pracovali v Jaslovských Bohunicích. Účast sovětských expertů se podařilo zajistit až po návštěvě na ČSKAE v Praze a diskusi s vědeckým vedoucím spouštění Alexandrem Gucalovem. Měl závažné námitky, že některé hodnoty byly převzaty z finské Loviisy. Bylo zřejmé, že všichni pochopili (až na ruské experty), že LaP jsou potřebné a že je to svým způsobem zajímavá technická a pionýrská práce. Protože v té době nebyly ve světě k dispozici aplikace studie pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti (PSA) ve formě risk monitor, bylo nutné většinu časů povolujících neprovozuschopnost zařízení konzervativně odhadnout na základě inženýrského úsudku. Později se ukázalo, že obdobně na začátku postupovali v USA a v jiných zemích, ale asi o 10 let dříve. S uspokojením lze nyní konstatovat, že LaP byly u nás zavedeny do praxe jako v první zemi provozující JE s VVER.

Přijetím zákona č. 28/1984 Sb. byly Limity a podmínky postupně zavedeny na všech jaderných zařízeních. Dozor ČSKAE informoval provozovatele, že je připraven schvalovat zdůvodněné změny tohoto nového dokumentu tak, jak budou získány zkušenosti s jeho uplatňováním. Po roce 1984, kdy byly v provozu první bloky v Dukovanech, posloužily LaP jako prostředek pro udržení standardizace bloků VVER-440 (213) provozovaných na dvou lokalitách, v Jaslovských Bohunicích a v Dukovanech. Zejména zpočátku se totiž stávalo, že byly nezávisle předloženy dozoru návrhy na změny v LaP pro stejný blok JE v Jaslovských Bohunicích a v Dukovanech, které se však odlišovaly. Oběma provozovatelům jsme sdělili, že nebudeme posuzovat dva různé návrhy, a požadovali, ať nejdříve návrhy porovnají a předloží jeden návrh, o kterém se dohodli, že je lepší. Zpočátku byly tyto problémy způsobeny také rivalitou obou elektráren, která pochopitelně existovala. Fakt, že ČSKAE byla orgánem s federální působností, tj. pro elektrárny v Čechách i na Slovensku, umožnil využít schvalování změn Limitů a podmínek k udržení standardizace provozovaných bloků v bývalém Československu.

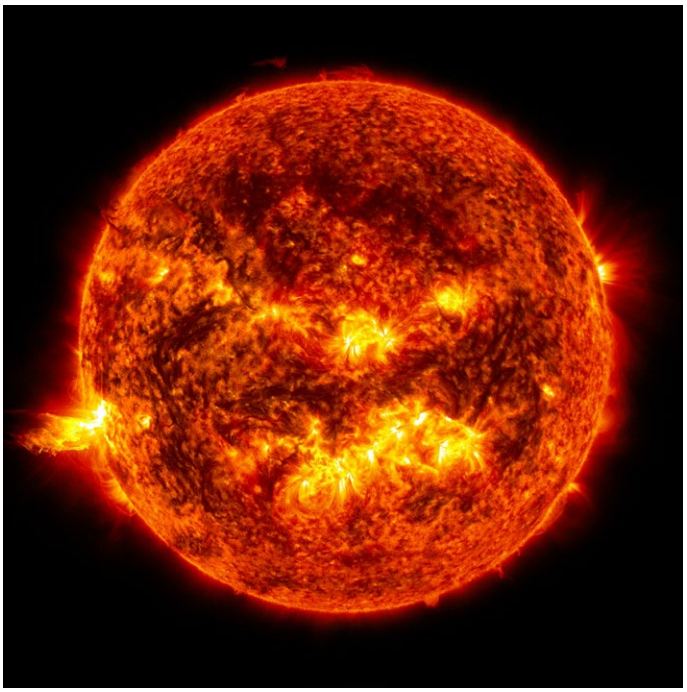
Ing. Zdeněk Kříž

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 dozorčí 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
(4. díl – využití fúze)

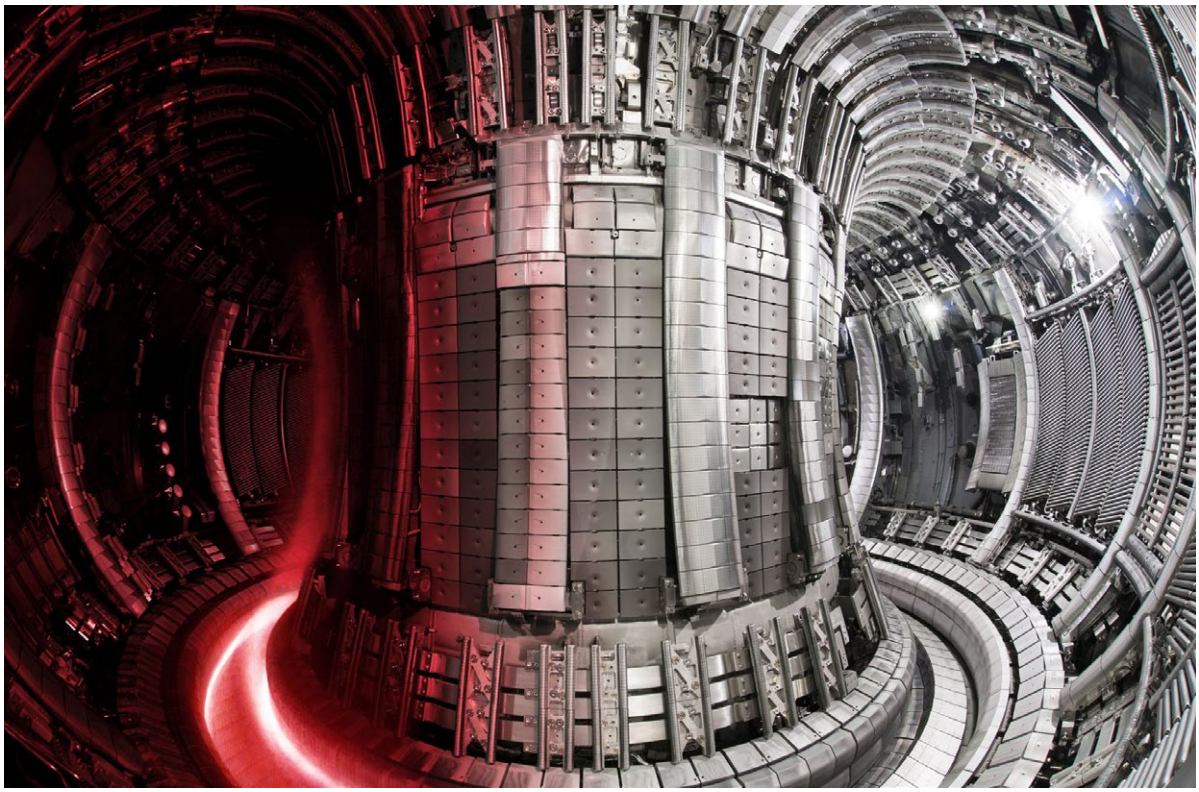
RNDr. Vladimír Wagner, CSc.
Ústav jaderné fyziky AV ČR, v. v. i.

Cesta k ještě vyšším výkonům ve vesmíru by mohla vést přes termojadernou fúzi. Bez tohoto zdroje se jen velmi těžko dostaneme, byť třeba jen k nejbližším hvězdám. Na rozdíl od radionuklidových zdrojů a štěpných reaktorů, fungující fúzní reaktor se lidem zatím sestavit nepodařilo a na kosmických lodích tak zatím žádný nebyl. V této části seriálu se tak podíváme na stav současné cesty k využití jaderné fúze. Zaměříme se hlavně na využití inerciálního udržení plazmatu, které je patrně nejvhodnější pro realizaci termojaderných pohonů mezihvězdných lodí. Zároveň se právě v této oblasti podařilo nedávno uskutečnit dramatický průlom.



Obr. 1: Úspěšným termojaderným reaktorem v naši blízkosti je Slunce, zde probíhá nejen prosté slučování nukleonů, ale i fúze s přeměnou protonů na neutron (zdroj: NASA/SDO)

V předchozích částech jsme se věnovali využití radionuklidových zdrojů energie a štěpných jaderných reaktorů. Sondy Voyager, které jako zdroj energie pro zajištění tepla a elektřiny využívají radionuklidové zdroje, se dostaly z dosahu slunečního větru a začaly zkoumat mezihvězdný prostor. Ovšem pro získání pohybové energie nutné pro opuštění Sluneční soustavy využily klasické chemické raketové motory, které by však samotné k tomu nestačily. Pro dosažení potřebné rychlosti tak musely využít metodu gravitačního praku s využitím průletu kolem některých velkých planet, hlavně Jupitera a Saturnu. Jejich rychlost je však velmi malá. Do vzdálenosti nejbližších hvězd poletí řadu desítek až stovku tisíc let. Pro mezihvězdné cestování je potřeba mít daleko větší energii uvolňovanou na jednotku hmotnosti. Při radioaktivním rozpadu alfa se uvolňuje na jeden rozpad těžkého jádra, většinou transuranu, okolo 8 MeV energie. Při štěpení uranu se uvolňuje okolo 200 MeV. Ve fúzní reakci deuteria a tritia se uvolňuje 14 MeV, ale na hmotnost zhruba pěti nukleonů, což je téměř padesátkrát menší hmotnost, než je tomu v předchozích případech. Na jednotku



Obr. 2: Evropský tokamak JET je jedním z mála, které pracovaly s tritiem a deuteriem a studovaly fúzní reakce (zdroj: EUROfusion)

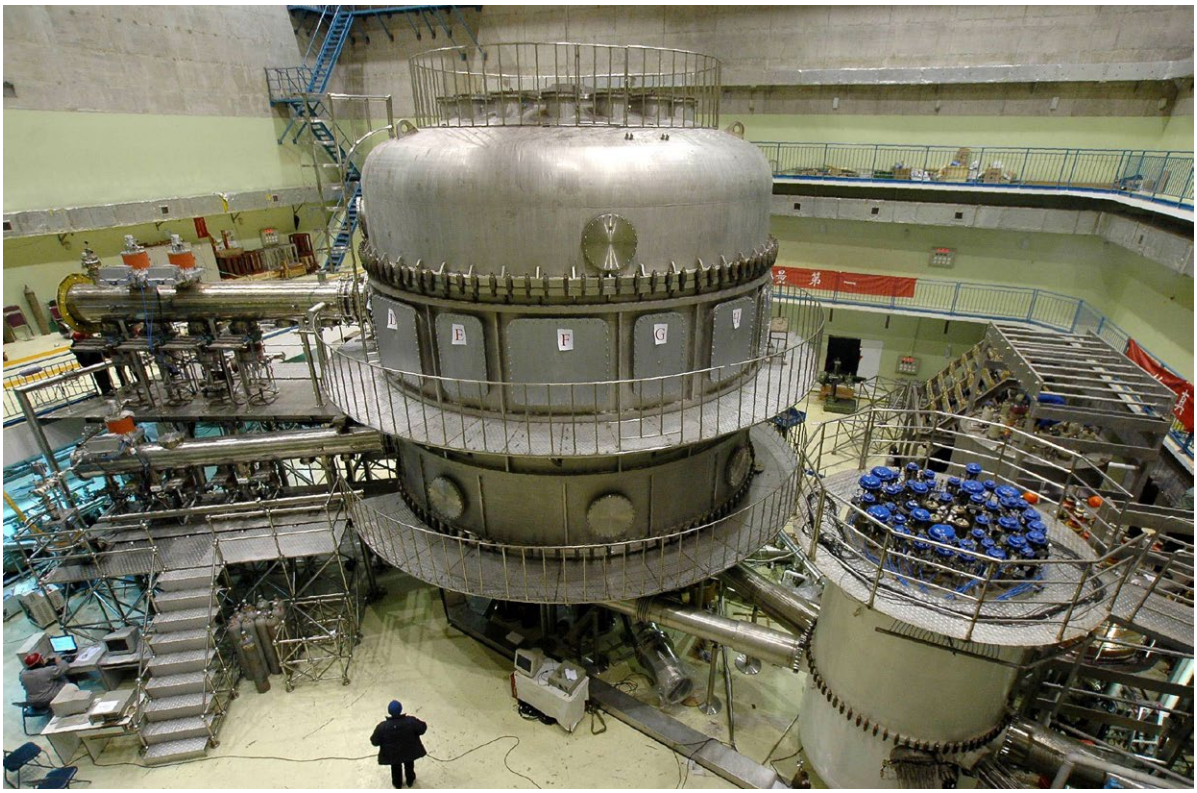
hmotnosti paliva se tak uvolní násobně více energie. Při využití fúze se také dosahuje řádově vyšších teplot a s tím spojené střední kvadratické rychlosti. To je klíčové při využití jaderného zdroje pro pohon v podobě tepelného raketového motoru. Je však třeba říci, že fúzní reaktory na rozdíl od radionuklidových zdrojů a štěpných jaderných reaktorů zatím realizovat nedokážeme a na našich vesmírných lodí se zatím nevyužívají.

ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI JADERNÉ FÚZE

Energetické využití jaderné fúze je založeno na tom, že při slučování lehkých jader se uvolňuje část vazebné energie a lze ji využít pro produkci tepla a dalších forem energie. Na jaderné fúzi je založena produkce energie i těžších prvků ve hvězdách, a je tak klíčová pro existenci života ve vesmíru. Pro překonání elektrostatické odpudivé síly dvojice kladně nabitých jader je potřeba jejich dostatečně vysoká kinetická energie. Její nutnou hodnotu snižuje možnost kvantového tunelování skrz coulombovskou bariéru. Potřebnou kinetickou energii může alespoň část jader získat chaotickým pohybem při dostatečně vysoké teplotě, tedy vytvořením velmi horkého plazmatu.

Pro efektivní průběh fúzních reakcí musí být zajištěna dostatečně vysoká teplota a hustota tohoto plazmatu. Takové plazma se musí také v těchto podmínkách udržet dostatečně dlouhou dobu. Ve hvězdách pomáhá v jejich nitru takové podmínky udržovat intenzivní gravitace způsobená jejich velkou hmotností. Probíhá tam tak celá řada fúzních reakcí, které jsou dvojího typu.

U prvního typu jde čistě o slepování nukleonů, které slučující se jádra obsahují. V tomto případě za tím stojí pouze silná jaderná interakce, která je velmi intenzivní, a pravděpodobnost těchto reakcí je relativně vysoká. Jako příklad mohou sloužit reakce slučování dvou deuteronů za vzniku jádra helia nebo



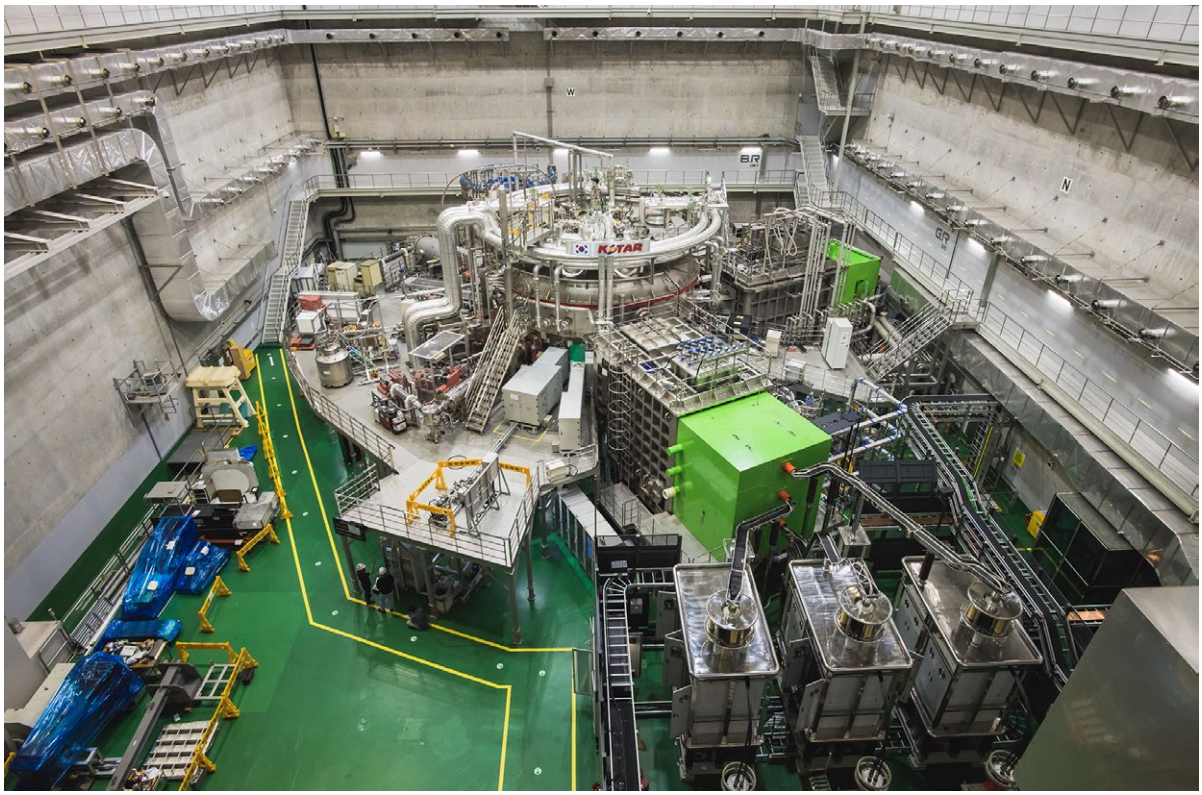
Obr. 3: Nový čínský supravodivý tokamak EAST (zdroj: www.iter.org, foto: ASIPP)

fúze deuteronu a tritonu, při které vzniká helium a neutron. Takové reakce lze v principu realizovat v budoucnu i ve fúzních reaktorech na Zemi.

Během druhého typu reakcí dochází při slučování zároveň k přeměně jednoho z protonů na neutron. V tomto případě musí dojít k přeměně jednoho kvarku u v protonu na kvark d. Takovou přeměnu nemůže realizovat silná interakce, probíhá pouze pomocí slabé interakce. Realizuje se tak s velmi malou pravděpodobností. Příkladem takové reakce je sloučení dvou protonů za vzniku deuteronu, pozitronu a neutrina. Takové reakce ve fúzních reaktorech na Zemi probíhat nemohou. Potřebují obrovské objemy a velmi dlouhodobé udržení plazmatu, které je možné pouze u hvězd.

První reakce s nejlehčími jádry využitelná pro fúzní reaktory je tak slučování dvojice deuteronů. Jednodušší je cesta fúze deuteronu a tritonu, které stačí nižší teplota blížící se ke stu milionů kelvinů. Zároveň je pravděpodobnost fúze v maximu při ideální teplotě v tomto případě řádově vyšší, než je tomu u fúze dvou deuteronů. Pro fúzi deuteronu a jádra izotopu helia 3 je maximum fúze při vyšší teplotě, ale i v tomto případě je v něm pravděpodobnost fúze těchto jader vyšší než u slučování dvou deuteronů. To jsou ty reakce, které se nejčastěji uvažují. Existují ještě další možnosti, z nichž zajímavá je z řady hledisek fúze protonu s jádrem bóru 11, při které vznikají tři jádra helia 4. Má řadu výhod, ale jednu podstatnou nevýhodu. Pro její realizaci potřebujeme násobně vyšší teploty.

Pokud dosáhneme potřebných teplot, musíme ještě splnit další podmínku. Součin hustoty plazmatu a doby jeho udržení musí být dostatečně vysoký. Limitní hodnoty se liší podle toho, kolik energie se má při fúzních reakcích uvolnit. Mluvíme pak o různých předělech. Poprvé pravidla pro takové milníky popsal v roce 1955 John D. Lawson a označují se tak jako Lawsonovo kritérium.



Obr. 4: Nový jihokorejský tokamak KSTAR (zdroj: KOREA INSTITUTE OF FUSION ENERGY)

První je pro podmínky, kdy výkon produkovaný ve fúzi je stejný jako ztráty vznikající ochlazováním plazmatu. V tomto případě vyrovná výkon potřebný k ohřevu plazmatu a mluvíme o vědeckém vyrovnání. Poměr mezi fúzní energii a energií potřebnou k ohřevu plazmatu se označuje většinou jako Q.

Druhým je situace, kdy část fúzního výkonu, která se v plazmatu absorbuje, vyrovná potřebný výkon na ohřev plazmatu. Při fúzní reakci deuteria a tritia vzniká helium 4, tedy částice alfa, a neutron. Čistě z kinematiky plyne, že z celkové produkované energie 17,6 MeV získá vzniklá částice alfa 3,5 MeV a neutron si odnese 14,1 MeV. Neutrony nemají elektrický náboj a opouštějí plazma bez toho, aby mu svou energii předaly. K jeho ohřevu tak přispívá pouze vzniklé helium. Tento předěl se označuje jako zápalné vyrovnání. V případě fúze tritonu a deuteronu se tak poměr mezi fúzní energií předanou vzniklým částicím alfa a energií potřebnou k udržení teploty plazmatu označuje většinou jako Q_α.

Poslední je, když produkovaný hrubý výkon pokrývá celkovou spotřebu fúzní elektrárny. Tento předěl se označuje jako inženýrské vyrovnání. První předěly jsou zajímavé z hlediska vědeckého zkoumání plazmatu a fúze. Poslední je pak kritický pro případné budování termojaderné elektrárny.

Pro využití fúze deuteria a tritia je optimální teplota 165 milionů kelvinů a Lawsonovo kritérium pro zápalné vyrovnání přesahuje 10^{20} $m^{-3}s$. Lawsonowo kritérium naznačuje dva velmi rozdílné přístupy k udržení plazmatu, kterými se dá naplnit. První možností je relativně malá hustota plazmatu a dlouhá doba udržení. V tomto případě se k udržení plazmatu využívá magnetická past a mluvíme o magnetickém udržení. Druhou možností je velmi vysoká hustota plazmatu, při které stačí pro splnění Lawsonova kritéria i velmi krátká doba udržení. V tomto případě mluvíme o inerciálním udržení plazmatu. Existují i možnosti využít kombinaci obou těchto přístupů, dosažená hustota plazmatu pak ne-

musí být tak velká, jako je u inerciálního udržení, a doba udržení nemusí být tak dlouhá jako u magnetického udržení. Mluvíme pak o magneticko-inerciálním udržení plazmatu.

MAGNETICKÉ UDRŽENÍ PLAZMATU

V případě magnetického udržení vytváří magnetické pole past, která dokáže nabité ionty a elektrony tvořící horkou plazmu udržet. Nejdříve se využívaly otevřené systémy s magnetickými zrcadly na obou otevřených koncích pasti. Zde však byl problém s úniky plazmatu právě přes tyto konce. Řešením se ukázaly být uzavřené magnetické pasti ve tvaru dutého prstence, které žádné konce nemají. V nich lze docílit hustoty plazmatu až mezi 10^{19} až 10^{20} částic/m^3, doba udržení plazmatu tak je potřeba v řádu jednotek až desítek sekund.

Jako první z těch uzavřených se začaly využívat magnetické pasti typu tokamak. Jedná se o ruský koncept z počátku padesátých let, za kterým stojí Igor Jevgenějevič Tamm a Andrej Sacharov. Toroidní vakuová komora je umístěna na transformátorovém jádru. Transformátor generuje v plazmatu, které je v daném případě tím jeho sekundárním vinutím, elektrický proud. Ten pak vytváří poloidální magnetické pole. Zároveň má tokamak elektromagnety, které vytváří toroidální magnetické pole. Kombinace těchto polí vytváří magnetické pole ve tvaru šroubovice a uzavřené dráhy pohybu částic plazmatu. Umožňuje tak zachycení a udržení plazmatu uvnitř prstencové vakuové nádoby. Proud, který se v plazmatu vytváří pak lze využít i k jeho ohřevu.

Stellarátor navrhl Lyman Spitzer v roce 1950. Na rozdíl od tokamaku nevyužívá pro vytváření magnetického pole proud v plazmatu. Uzavřenost dráhy částic plazmatu je tak docílena čistě magnetickým polem formovaným vnějšími elektromagnety. Proto musí mít daleko komplikovanější strukturu cívek elektromagnetů a jimi vytvářeného magnetického pole. Toroidní geometrie nádoby je tak úmyslně zkroucená a má také poměrně komplikovaný tvar.

Nejvíce je v současné době tokamaků. Připomeňme, že v případě magnetického udržení plazmatu se dané zařízení a kvalita plazmatu dá testovat i bez fúzních reakcí a přítomnosti tritia. I proto jen výjimečně tokamaky pracují s tritiem. Při fúzních reakcích s tritiem se totiž produkují neutrony. Ty jsou neutrální, vyletují z plazmatu a v reakcích se stěnami vakuové nádoby tokamaku produkují radionuklidy. Intenzivní radioaktivita pak komplikuje práci se zařízením.

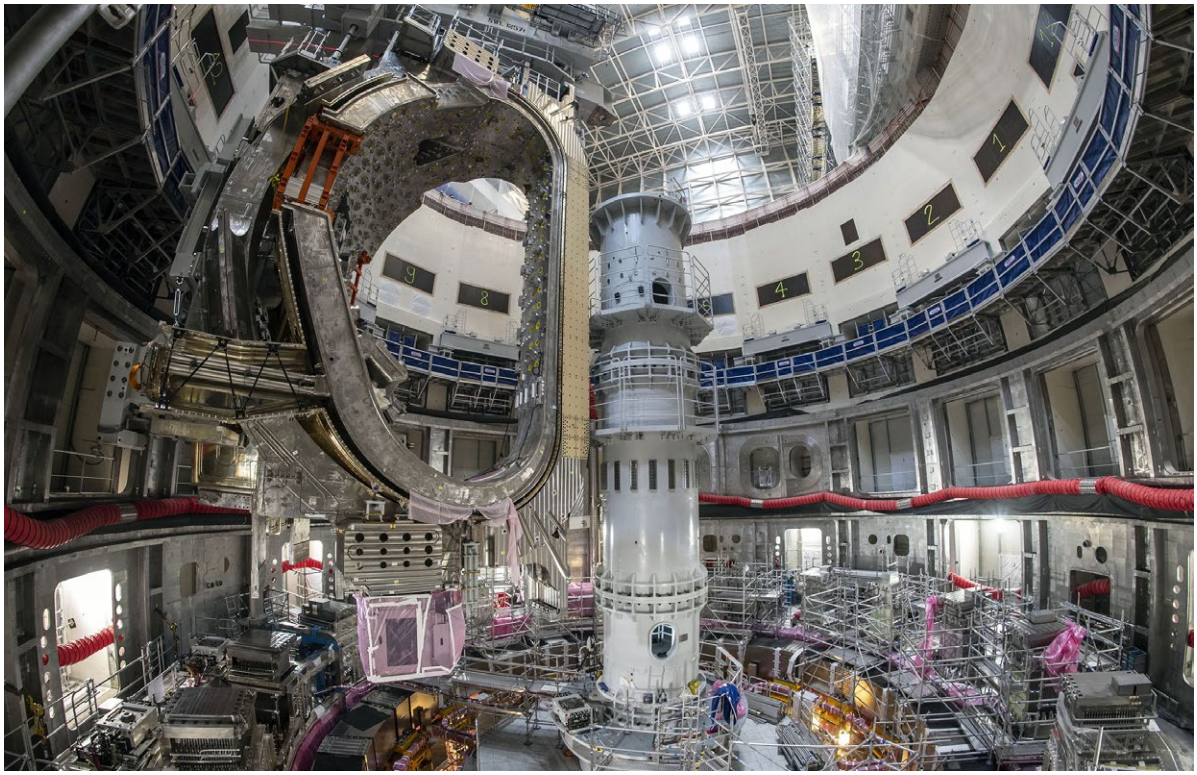
V posledních letech bylo ve světě postaveno několik nových velice moderních tokamaků. Některé z nich už mají supravodivé všechny magnety. Do čela se postupně dostává hlavně Asie. Velmi moderní tokamak KSTAR (Korean Superconducting Tokamak Reactor) byl vybudován v Jižní Koreji. Jeho hlavní poloměr je 1,8 m a vedlejší 0,5 m. Dosažená intenzita magnetického pole je 3,5 T a doba výboje až stovky sekund. Na začátku roku 2019 se mu podařilo udržet plazma na teplotě 100 milionů kelvinů po dobu jeden a půl sekundy.

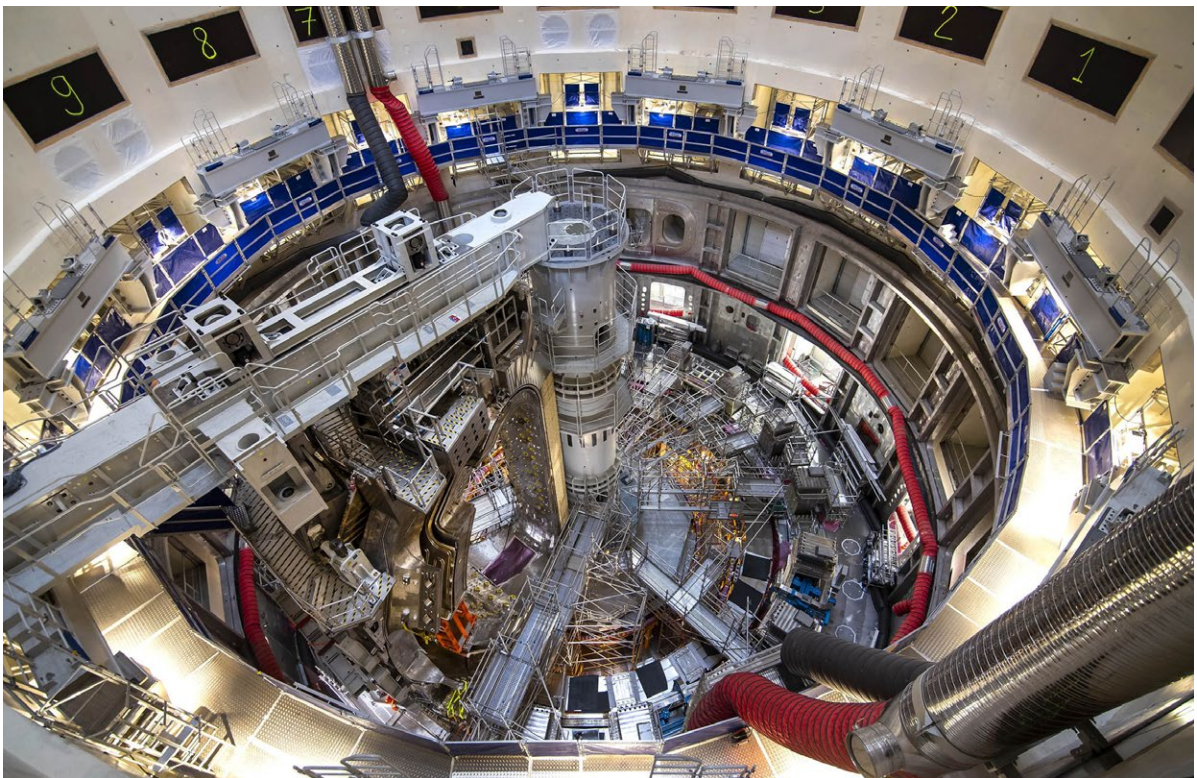
Od roku 2006 pracuje v Číně tokamak EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak), jehož hlavní poloměr je 1,85 m a vedlejší 0,45 m. Intenzita magnetického pole dosahuje 3,5 T a jeho výkon ohřevu je 7,5 MW. Do konce roku 2018 se mu podařilo dosáhnout doby udržení 100 s a teploty 100 milionů kelvinů. V budoucnu by měl mít intenzitu magnetického pole až 5 T a dosáhnout doby udržení i 1 000 s.

Obr. 5: Letecký snímek staveniště tokamaku ITER (zdroj: www.iter.org)

Obr. 6: Instalace prvního segmentu vakuové komory tokamaku ITER dne 11. 5. 2022 (zdroj: www.iter.org)

Obr. 7: Stav montáže tokamaku ITER ze dne 17. 10. 2022 (zdroj: www.iter.org)



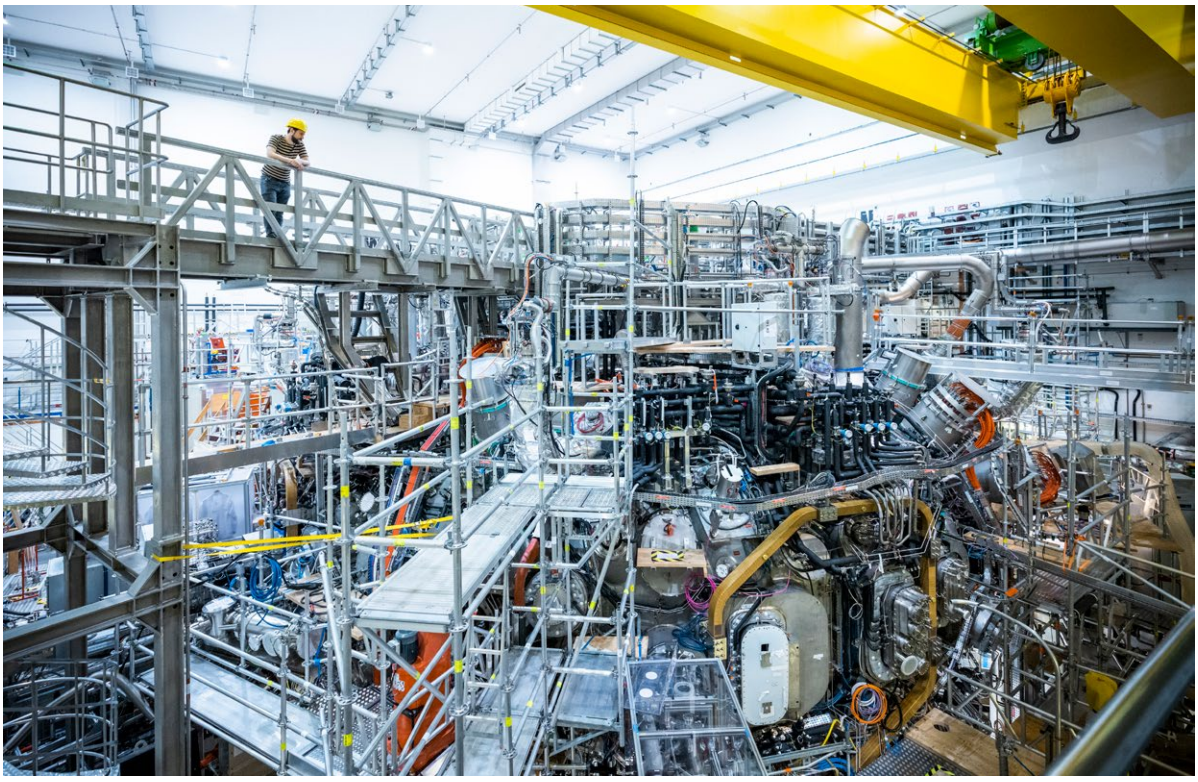


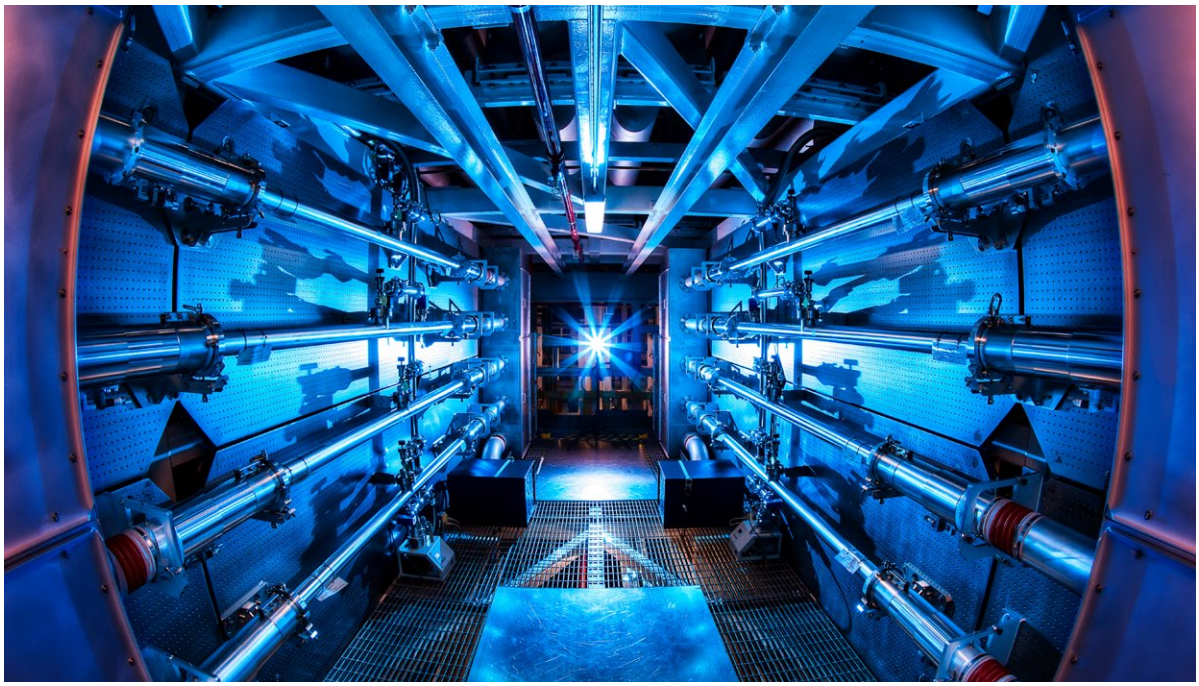
Japonci navázali na zkušenosti s tokamakem JT-60U (Japan Torus) s objemem 60 m^3 a na přelomu roku dokončili plně supravodivý tokamak JT-60SA. Ten by měl mít objem plazmatu o teplotě až 200 milionů kelvinů až 135 m^3. V současné době se uvádí do provozu. Je to jeden z největších a nejmodernějších tokamaků, který připravuje půdu pro dokončení a provozování tokamaku ITER.

Největším tokamakem v Evropě je JET (Joint European Torus) ve vesničce Culham nedaleko Oxfordu ve Velké Británii. Ten byl uveden do provozu v roce 1983. Jeho hlavní poloměr je 2,98 m a vedlejší horizontální 1,25 m a vertikální 2,10 m. Objem plazmatu je okolo 100 m^3 a intenzita magnetického pole 3,45 T. Na svém kontě má řadu fúzních rekordů. Pracoval i s tritiem a v kampani v letech 1991 až 1997 uskutečnil první masivnější produkci fúzní energie. Dosáhl při něm výkonu 1,7 MW při dosažené teplotě paliva 200 milionů kelvinů. Po úpravách a instalaci nového divertoru se v roce 1997 dosáhlo dvou typů rekordních výstřelů. V prvním z nich se dosáhlo výkonu až 15 MW, ale nepodařilo se udržet stabilitu plazmatu a proběhl pouze jako pík trvající okolo sekundy. V tomto případě se dosáhl poměr Q mezi energií uvolněnou ve fúzních reakcích a energií spotřebovanou na ohřev plazmat mezi 0,6 až 0,7, hodnoty Q_a pak byly 0,12 až 0,14.

U druhého typu výstřelů se podařilo zajistit dlouhodobé udržení plazmatu, které bylo omezeno pouze konstrukcí zařízení. Pro tokamak JET je tato maximální délka okolo 5 sekund. Výkon zařízení však byl nižší, méně než 5 MW. Hodnota Q byla v tomto případě okolo 0,2 a celkově se realizovalo 22 MJ. Dosahovaná teplota plazmatu překračovala u obou typů výstřelu 100 milionů stupňů. Je třeba zdůraznit, že na tokamacích se s tritiem a fúzními reakcemi experimentuje jen výjimečně. Kromě tokamaku JET je prová-

Obr. 8: Německý stellarátor Wendelstein 7-X je nejmodernějším zařízením tohoto typu (zdroj: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, foto: Jan Hosan)





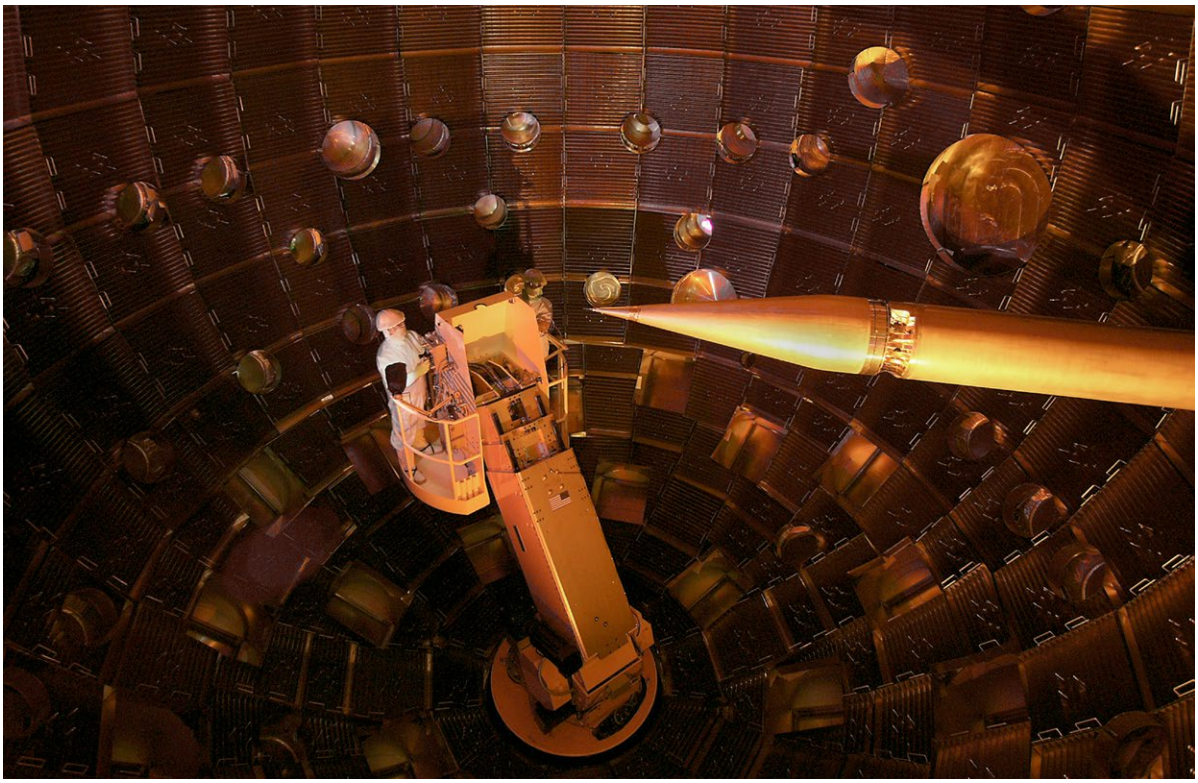
Obr. 9: Americké zařízení NIF je v současné době tím největším v oblasti inerciální fúze (zdroj: Lawrence Livermore National Laboratory, foto: Damien Jemison)

dělo ještě americké zařízení TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor). Pro zkoumání vlastností plazmatu a možností i podmínek jeho udržení fúzní reakce nepotřebujeme. Pokud se s nimi experimentovat začne, musíme pak řešit jeden významný problém. Během fúzních reakcí deuteria a tritia se produkují neutrony s relativně vysokou energií 14 MeV. Ty v reakcích s materiály produkují radionuklidy. Během experimentů tak vzniká intenzivní radioaktivita a radiace. Vznikají tak velmi náročné podmínky, které je třeba řešit.

Tokamak JET se tak na konci devadesátých let vrátil do režimu experimentování bez využívání tritia. V roce 2011 došlo k přestavbě jeho vnitřní stěny tak, aby odpovídala konstrukci, která bude využita v případě tokamaku ITER. Ta by měla být z beryllia a v oblasti divertoru z wolframu. Po náročné rekonstrukci by se v roce 2021 začal opět věnovat experimentování s fúzí deuteria a tritia.

V roce 2021 proběhla zhruba šestiměsíční experimentální kampaň. Uskutečnila se řada výstřelů, u kterých se podařilo dosáhnout maximální délky zmíněných 5 sekund. Stabilní výkon překračoval i významně 10 MW. U několika se podařilo realizovat až 59 MJ energie, což významně překročilo předchozí hodnoty. Ukazuje se, že se daří plnit předpokládané parametry a dosahovat potřebných podmínek. To je velmi dobrý příslib pro budoucí fungování zařízení ITER. Nová data ze zařízení JET testují modely a výpočetní programy využívané právě při přípravě tokamaku ITER. Experimenty by měly probíhat nejméně do roku 2023 a budou obrovským přínosem pro přípravu experimentů se zařízením ITER.

Zařízení, které by mělo produkovat pomocí fúze více energie, než je potřeba na ohřev plazmatu, bude již zmiňovaný mezinárodní tokamak ITER, který se buduje ve francouzském Cadarache. Do projektu je oficiálně



Obr. 10: Vnitřek komory zařízení NIF (zdroj: Lawrence Livermore National Laboratory)

zapojeno 35 států. V této lokalitě je v provozu od roku 1988 i francouzský tokamak Tore Supra. Ten má hlavní poloměr 2,25 m a vedlejší 0,7 m, intenzita magnetického pole je 4,5 T. V roce 2003 zde proběhl výboj, při kterém udržení plazmatu trvalo 390 s při teplotě v řádu sto milionů kelvinů. V letech 2013 až 2016 proběhla jeho rekonstrukce, kdy se přebudovalo chlazení, vnitřní stěna a přidal se divertor z wolframu. Tokamak také dostal nový název WEST (W Environment in Steady-state Tokamak). V tomto případě W na začátku názvu znamená chemickou značku wolframu. Stal se tak dalším tokamakem, který testuje budoucí podmínky na tokamaku ITER.

Samotný ITER začalo konsorcium založené v roce 2007 reálně budovat v roce 2013. Jeho hlavní poloměr by měl být 6,2 m a vedlejší 2 m. Objem plazmatu bude 840 m^3. Intenzita magnetického pole bude 5,3 T. Produkovaný výkon by měl být 500 MW. Poměr mezi získaným výkonem z fúze a tím, který má zajišťovat ohřev, by měl dosáhnout až hodnoty Q = 10, hodnota Q_α = 2. Doba udržení plazmatu by měla být i 300 s a jeho teplota 150 milionů kelvinů. Celková hmotnost zařízení bude 23 000 t.

V současné době byla dokončena většina hlavních budov a realizuje se i instalace zařízení včetně samotného tokamaku. Podrobněji byly stav fúzního výzkumu v oblasti magnetického udržení plazmatu, budování tokamaku ITER a české stopě v této oblasti rozebrány v prvním čísle Jaderné energie v tomto roce.

První plazma by v tokamaku ITER mělo vzniknout na přelomu let 2025 a 2026. Jak už bylo zmíněno, většina tokamaků zkoumá vlastnosti plazmatu, a ne fúzní reakce. Proto se v nich nemusí využívat tritium. Do plného provozu by se tokamak měl dostat a experimentování s fúzí deuteria a tritia by mělo být zahájeno až v roce 2035. Je třeba říci, že ze zkušeností

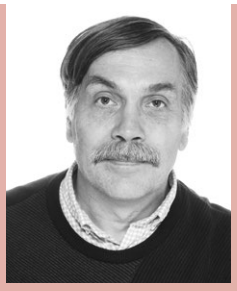
Pokrok v budování tokamaku ITER lze sledovat na stránkách: https://www.iter.org/
Pěkný český populární přehled stavu cesty za využitím jaderné fúze je v knize:
Slavomir Entler et al., Budoucnost energetiky: jaderná fúze, Středisko společných činností AV ČR, v.v.i., pro kancelář Akademie věd ČR 2019

získaných u jeho předchůdců víme, že konstrukce tokamaku ITER je velkou výzvou, ale zařízení bude fungovat. Právě jeho velikost mu umožní ukázat, že lze jadernou fúzí produkovat dostatek energie a udělat ten klíčový krok k termojaderné produkci energie.

Vzhledem k potřebě velmi komplikovaného průběhu magnetického pole u stellarátoru se začaly první sofistikovanější projekty objevovat až nyní. Jako příklad může posloužit německé zařízení Wendelstein 7-X. Právě experimenty realizované s jeho pomocí by mohly ukázat výhody stellarátorů.

Každé ze zařízení, tokamak i stellarátor, má své výhody a nevýhody. Teprve budoucnost ukáže, které z nich se prosadí. Pro vesmír je potřeba velmi kompaktní zařízení, kterým současné tokamaky nebo stellarátory nejsou. Klíčový pro budoucí kosmické aplikace je vývoj supravodivých magnetů schopných dosáhnout extrémních intenzit magnetického pole, zlomový by mohl být průlom ve výzkumu vysokoteplotní supravodivosti. Stejně tak je velmi důležitý výzkum v oblasti materiálů odolných při vysokých teplotách a intenzivních radiačních polích.

V případě vesmírných termojaderných pohonů by mohlo být výhodnější využít jako palivo helium 3 a deuterium. Už z toho hlediska, že konečnými produkty fúze jsou všechno nabitá jádra. Budoucí vesmírné termojaderné reaktory mohou v principu produkovat potřebnou elektřinu, a to i k pohonu iontového motoru. V případě tepelných termojaderných motorů bude možné využít produkované teplo k ohřevu vodíku, případně bude potřeba u magnetického udržení řešit vyvedení horkého plazmatu z fúze do trysky. Právě v tomto případě je nezbytné využití reakce helia 3 s deuteronem a produkce pouze nabitých částic. Z hlediska termojaderného raketového motoru bude možná výhodnější využití inerciálního udržení, kterému se budeme věnovat v příštím čísle.



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 možností 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 bohemica 2014) a napsal knihu Fukušima I poté (Novela bohemica 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.

Aktuality

Unikátní výměna cyklotronu – první v ČR a jedna z mála v Evropě

V květnu 2022 proběhla v PET Centru ÚJV Řež v areálu Nemocnice Na Homolce unikátní modernizace zázemí pro výrobu radiofarmak. Původní urychlovač částic – cyklotron Cyclone 18/9 od firmy IBA, který si tu odsloužil 23 let – nahradil nejnovější model Cyclone KIUBE od stejného výrobce. Jadernou technologii, která za stejný čas dokáže vyprodukovat vyšší aktivitu potřebnou pro výrobu diagnostických přípravků – radiofarmak, bylo kvůli nedostatku jiných vhodných prostor nutné umístit do stávající stíněné „kobky". Původní urychlovač, kontaminovaný ionizujícím zářením ze dvou desítek provozních let, se proto musel bezpečně vyzvednout, odvézt a připravit k likvidaci. Technologicky a logisticky náročná výměna cyklotronů v jednom umístění je první svého druhu v ČR a pravděpodobně i jedna z mála takových akcí v Evropě. Skupina ÚJV si díky úspěšně zvládnutému projektu vytvořila významnou referenci pro poradenství při likvidaci urychlovačů, a to i v mezinárodním měřítku.

Cyklotron Na Homolce, náš první v Česku, zahájil provoz v roce 1999. Od té doby technologie značně pokročily. Díky výměně získalo ÚJV Řež zařízení, které je menší rozměry, ale mnohem efektivnější z hlediska výkonu. Pro diagnostiku českých pacientů tam proto bude možné vyrobit ve stejné době více přípravků. V tradičně napjatém výrobním harmonogramu radiofarmak to společnosti poskytne cennou časovou rezervu. Nové zařízení samozřejmě s sebou nese i nejvyšší podporu ze strany dodavatele IBA, což při vysokých objemech produkce ÚJV Řež hraje také podstatnou roli. Nutný výpadek produkce cyklotronu PET Praha plně pokryjí dvě zbývající PET Centra divize Radiofarmaka — v Řeži a v Brně. Rutinní provoz nového pražského cyklotronu se po nezbytných úpravách prostor a testování nového zařízení očekává v začátku roku 2023.

Běžným postupem je pouze uzavření kobky

Při modernizaci cyklotronů se ve světě běžně postupuje tak, že se kobka cyklotronu pouze uzavře a zajistí betonem, zařízení se nedemontuje. Protože se jedná o jadernou instalaci a materiály jsou kontaminované ionizujícím zářením, je veškerá manipulace nebo demontáž náročná — technologicky i finančně. Vystavět pro nový cyklotron nové prostory je rychlejší, levnější a legislativně jednodušší. V případě PET Centra Praha by ovšem vybudování nové instalace Na Homolce naráželo

Foto: Michal Šafránek, ÚJV Řež

Foto: Lukáš Slavík, ÚJV Řež

na zásadní prostorová omezení. A navíc – Skupina ÚJV je v ČR nejpovolanější pro tento typ zakázky – jak z hlediska projektového, tak i z hlediska vlastního vyjmutí, převozu a následné bezpečné likvidace všech komponent. Plánování a realizace jednotlivých částí se v ÚJV Řež ujaly divize Radiofarmaka a Radioaktivní odpady a vyřazování, generální dodávku a zastřešení celé akce zajistila dceřiná společnost ŠKODA PRAHA.

Kobka cyklotronu je chráněna masivními betonovými stínicími deskami, jediným možným řešením byl tedy přístup shora a demontáž střechy a poté i stínění. Původní, více než dvacetitunový kolos, bylo nutné vyzvednout jeřábem a po nezbytné úpravě kobky opět stejnou cestou usadit cyklotron nový. Všechny etapy demontáže a odvozu cyklotronu byly samozřejmě předem prověřeny a povoleny ze strany Státního úřadu pro jadernou bezpečnost, i pro něj však byl tento povolovací proces zajímavou zkušeností a národní premiérou. Kontinuální monitorování prostředí a neustálá přítomnost dozimetristů byla jen finální tečkou za dlouhým seznamem bezpečnostních opatření, která bylo nutné naplánovat a dodržet.

Kam s ním?

Demontáží a naložením „zbytků" starého cyklotronu začíná druhá část příběhu, ta delší. Zařízení je během let provozu kontaminováno zářením, musí se s ním tedy podle toho nakládat. Přes dvacet tun hmoty, z toho 2,5 tuny mědi, jen tak nikam neodložíte. Navíc zatím není známá míra aktivity jednotlivých částí, tedy ani délka, po kterou mohou být pro své okolí a životní prostředí nebezpečné. Tady nastupuje specializace divize Radioaktivní odpady a vyřazování, která kromě zkušeností a technologického zázemí disponuje specializovaným Skladem vysoce aktivních odpadů (VAO), v jehož prostorách je cyklotron nyní umístěn. Celý příští rok budou probíhat práce na vzorkování jednotlivých částí a typů materiálů urychlovače. Díky spektrometrickému proměření se odhadne, za jak dlouho jejich aktivity klesnou po úroveň, kdy je možné je bezpečně uvolnit do prostředí. Zatím v Řeži pracují s kvalifikovaným odhadem 25–30 let, který vychází z jediné srovnatelné studie z Itálie. Během doby uložení budou pravidelně probíhat verifikace stavu a zpřesňování odhadů. Až bude jisté, že všechny části jsou bez známek kontaminace, teprve pak bude možné zařízení rozebrat na části, ty po kontrole zlikvidovat a uvolnit do životního prostředí.

Alena Rosáková, ÚJV Řež

Aktuality

Konference VVER 2022

V Konferenčním centru ÚJV Řež proběhla ve dnech 10.–12. října 2022 osmá konference VVER 2022 – mezinárodní setkání odborníků z jaderných elektráren s reaktory typu VVER, zástupců dozorných orgánů a tvůrců energetických strategií, projektantů, dodavatelů paliva a společností zajišťujících údržbu a další služby potřebné pro provoz těchto reaktorů, které pořádá Česká nukleární společnost – letos ve spolupráci s ÚJV Řež – každé tři roky. Podtitul konference „Provoz a údržba reaktorů VVER v EU" reagoval na aktuální situaci způsobenou agresivní válkou Ruské federace proti Ukrajině, vedoucí k přerušení dlouholetých vazeb s generálním projektantem a nositelem modernizace reaktorů VVER, ale také s hlavním dodavatelem paliva.

Již v úvodních projevech byla zdůrazněna nutnost hledat řešení dlouhodobých provozních programů (LTO) bez spolupráce s generálním projektantem a také nutnost najít alternativní dodavatele jaderného paliva. Tento imperativ rezonoval i v průběhu jednání všech čtyř sekcí, do kterých byl odborný program konference rozdělen.

Obr. 1: Mezinárodní konference VVER 2022 (zdroj: Česká nukleární společnost)

Obr. 2: Donald Hoffman bývalý prezident American Nuclear Society na konferenci VVER 2022 (zdroj: Česká nukleární společnost)

Vývoj evropských kódů a metod pro posuzování bezpečnosti VVER v rámci programu CAMIVVER s podporou Evropské komise otevře trh s VVER evropskému jadernému průmyslu a významně posílí suverenitu a bezpečnost EU v oblasti dodávek energie (sekce Bezpečný a spolehlivý provoz).

Intenzivně se pracuje na nahrazení ruského dodavatele paliva – společnost Framatome vyvíjí plán na plnou evropskou suverenitu dodávek paliva pro reaktory VVER-1000, společnost Westinghouse od roku 2023 nahradí ruské palivo vlastním, vyráběným ve Švédsku (sekce Jaderné palivo).

Aktuální trend prodlužování životnosti reaktorů VVER předpokládá dlouhodobá technická řešení. Reaktory VVER jsou robustní konstrukční zařízení, která nová technická zlepšení pro bezpečný a spolehlivý provoz i v dalších dekádách umožňují. Všichni prezentující deklarovali připravenost svých domácích institucí přispět k prodloužení životnosti VVER prostřednictvím vlastního unikátního know-how (sekce LTO a údržba, výzkum a vývoj).

Vyřazování jaderných elektráren z provozu je náročný proces, v němž se kombinují průmyslové metody vyřazování z provozu s požadavky radiační ochrany a zákony a předpisy týkajícími se konečného uložení jaderného odpadu. Finská společnost Fortum vyvinula inovativní technologii NURES® pro zpracování radioaktivní kapaliny s vyšší selektivitou a menším objemem odpadu ve srovnání s jakoukoli konkurenční organickou pryskyřicí nebo anorganickým iontoměničem na trhu (sekce Vyřazování z provozu a RAO).

Na závěr konference účastníci navštívili výzkumnou infrastrukturu CVŘ a ÚJV v Řeži a prohlédli si unikátní zařízení, poskytující významnou experimentální podporu při sledování a využívání nových trendů v mezinárodním směru výzkumu v této oblasti.

Jiří Duspiva, ÚJV Řež

Aktuality

Kontrola a výměna předpínacích lan v kontejnmentu Jaderné elektrárny Temelín

V srpnu bylo během plánované odstávky realizováno na druhém bloku temelínské elektrárny celkem 67 investičních akcí. Kromě výměny čtvrtiny palivových souborů došlo po třech letech také na kontrolu a výměnu lan vyztužujících jednovrstvý plnotlaký kontejnment reaktoru.

Mohutná železobetonová budova ve tvaru válce s výškou 56 metrů a vnitřním průměrem 45 metrů, která slouží jako bezpečnostní bariéra mezi reaktorem a životním prostředím, je u temelínských bloků protkána systémem předepjatých lan vyztužujících jeho konstrukci.

Foto: autor

Foto: autor

V případě stěn, které mají tloušťku 1,2 metru jde o 96 lan, stropní konstrukci tvořenou kulovým vrchlíkem s tloušťkou 1,1 metru vyztužuje celkem 36 lan. Všechna lana mají v průměru 20 centimetrů, tvoří je 478 nespletených drátů a v závislosti na umístění měří v rozmezí od 95 do 190 metrů.

V době výstavby, od které už uplynulo více než čtvrt století, byla lana předepjatá silou 10 MN. Vlivem stárnutí samozřejmě dochází k únavě materiálů, a aby lana plnila svou funkci, je zapotřebí pravidelně kontrolovat jejich předpětí. K tomu slouží monitorovací systémy sestávající z několika desítek tenzometrů. Jeden systém měří sílu předepnutí lan, druhý odezvu konstrukce na vnitřní přetlak.

Údaje z tenzometrů se kontrolují každý měsíc. Naměřené hodnoty, které dokladují požadované předepnutí kontejnmentu, se pak předávají Státnímu úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB). Minimální požadovaná hodnota napětí válcových lan vyztužujících svislou konstrukci pláště je 8,4 MN v případě kopule je minimem 7,7 MN. *Aktuální měření potvrdila, že průměrná hodnota napětí je téměř o 0,5 MN vyšší,* informuje Ján Bulák, vedoucí expertního týmu z ÚJV Řež, které kontrolu a údržbu temelínských kontejnmentů dlouhodobě zajišťuje.

V letošním roce bylo na kontejnmentu druhého bloku zkontrolováno celkem 46 lan, bylo vyměněno a zkalibrováno 92 tenzometrů a jedno náhodně vybrané, více než patnáctitunové lano, bylo vyměněno za nové. *Tato technicky velmi náročná výměna se provádí jak z preventivních důvodů, tak za účelem dalšího rozboru,* dodává Ján Bulák. *Kolegové z ÚJV Řež následně kontrolují jeho odolnost vůči předpětí, materiálové vlastnosti nebo chemické složení. Díky testování použitého lana máme velmi přesné informace o stavu a životnosti i ostatních lan.*

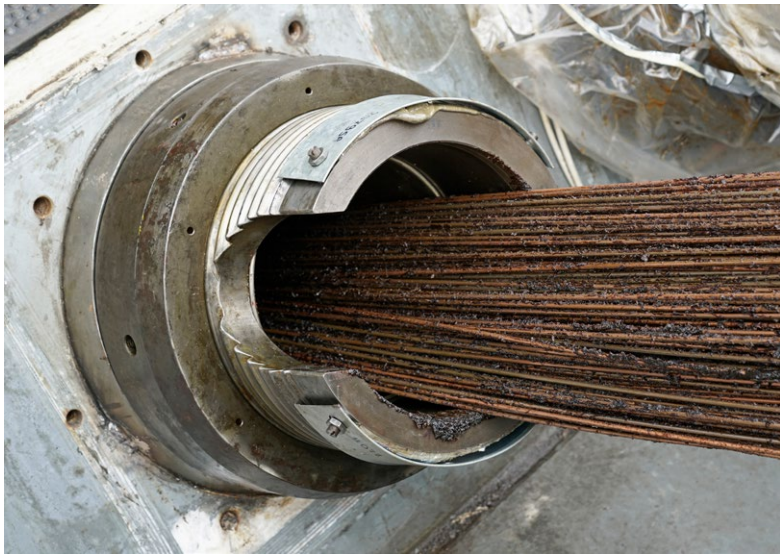


Foto: autor

Další výměna lan v kontejnmentu druhého bloku je plánovaná zhruba za pět let.

Michal Šafránek, ÚJV Řež

Časopis pro fyziku oslavil 150 let

Československý časopis pro fyziku si v říjnu připomněl 150. výročí od zahájení vydávání svého předchůdce – Časopisu pro pěstování mathematiky a fysiky, který byl od roku 1872 vydáván Jednotou československých matematiků a fyziků.

Jaderná energie přeje redakci ČČF, jeho redakční radě i vydavateli, Fyzikálnímu ústavu Akademie věd České republiky, mnoho dalších úspěchů v jejich záslužné popularizační činnosti a neustále se rozrůstající okruh spokojených čtenářů.

redakce

Zdroj: Československý časopis pro fyziku, Fyzikální ústav AV ČR

Aktuality

Jihočeský jaderný park

Jihočeský hejtman Martin Kuba, generální ředitel ČEZu Daniel Beneš a generální ředitel ÚJV Řež Daniel Jiřička ve středu 21. 9. 2022 podepsali za přítomnosti premiéra Petra Fialy smlouvu o vzniku společnosti South Bohemia Nuclear Park. Úkolem nově vzniklé společnosti je spolupráce na přípravě technologie malých modulárních reaktorů, posouzení jejich energetické, finanční a technické proveditelnosti nebo přípravě licencování. Pilotní projekt by měl vzniknout v areálu Jaderné elektrárny Temelín do roku 2032. Malé modulární reaktory aktuálně připravuje řada významných světových společností, v různé fázi vývoje je i několik tuzemských projektů. Skupina ČEZ už dříve podepsala memoranda o spolupráci v oblasti malých modulárních reaktorů s firmami NuScale, GE Hitachi, Rolls Royce, EdF, KHNP a Holtec.

Michal Šafránek, ÚJV Řež

foto: Milan Mika, ÚJV Řež

Foto: Hertzog, Samuel Joseph: CERN

30 let v CERNu

Česká a Slovenská Federativní Republika se před třiceti lety stala 19. členským státem Evropské organizace pro jaderný výzkum (CERN). Po rozdělení federace v roce 1993 pak Česká republika i Slovensko pokračují ve spolupráci samostatně. Neoficiálně se ale československí vědci do výzkumu v CERNu zapojovali už v šedesátých letech díky spolupráci se Spojeným ústavem jaderných výzkumů v Dubně. V CERNu našlo práci i několik našich emigrantů, kteří z Československa odešli po srpnu 1968.

Největší pracoviště pro výzkum elementárních částic a struktury hmoty, které bylo pod patronací UNESCO založeno v roce 1954, má dnes 23 stálých členů a na pomezí Švýcarska a Francie zaměstnává více než 2 500 stálých pracovníků a hostí více než 12 200 vědců z výzkumných institucí a ústavů ve více než 70 zemích. Za třicet let spolupráce prošlo branami CERNu i několik stovek fyziků z významných českých a slovenských laboratoří, kteří členství využívají nejen pro vlastní experimentální činnost, ale i k účasti v řadě společných výzkumných projektů.

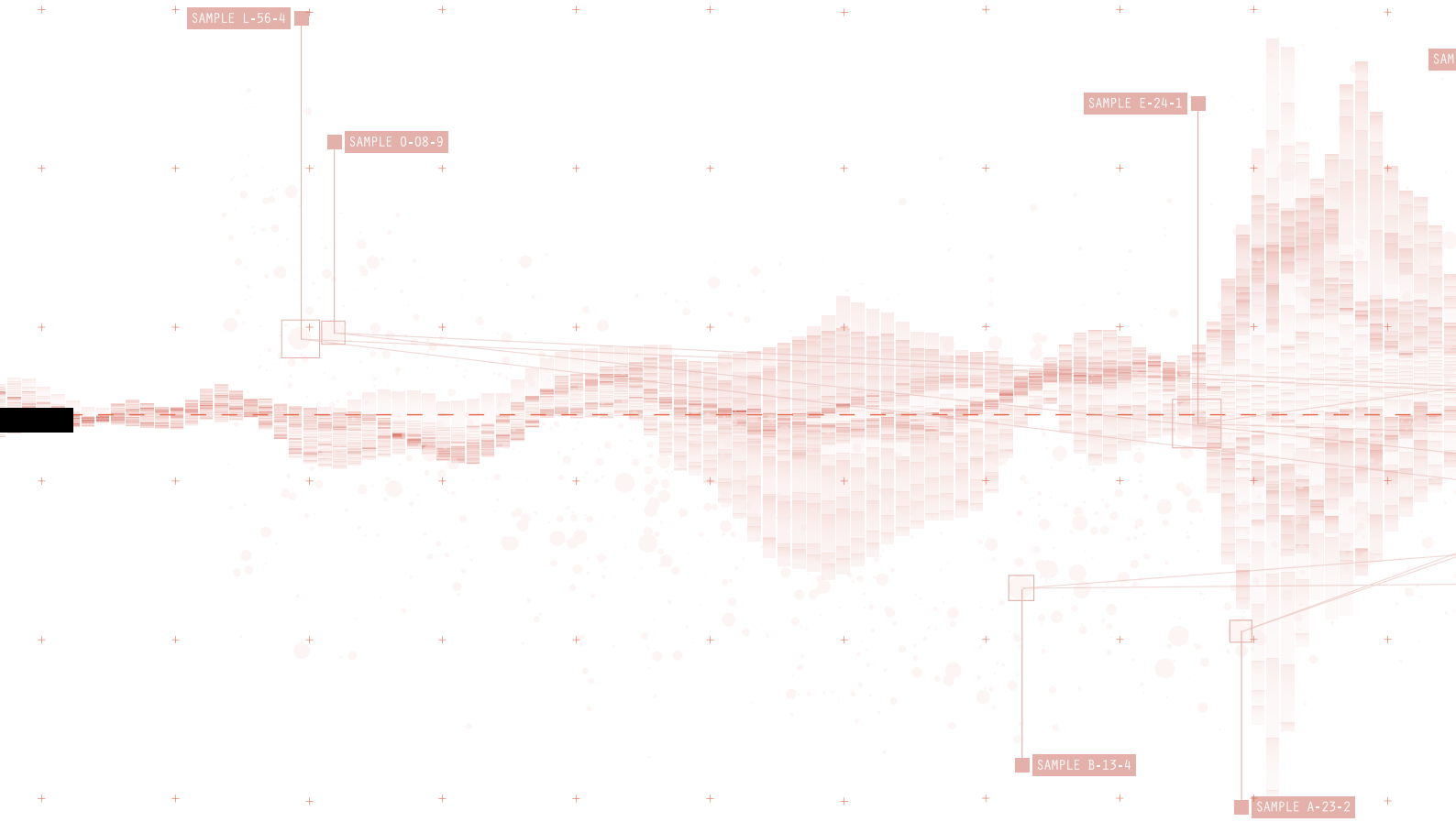
Michal Šafránek, ÚJV Řež

ČEZ dostal tři nabídky na dostavbu Dukovan

Energetická společnost ČEZ obdržela ve stanoveném termínu tři nabídky na stavbu nového jaderného bloku, který má stát v Dukovanech na Třebíčsku. Zájem mají podle očekávání francouzská společnost EDF, jihokorejská firma KHNP a severoamerický Westinghouse. ČEZ nyní nabídky zanalyzuje a bude o nich s uchazeči dál jednat. Finální nabídky by zájemci měli podat do konce září příštího roku. Dokončení nového bloku je plánováno do roku 2036.

redakce

www.jadernaenergie.online



CVŘ