jaderná energie

jadrová energia

3/4 21

ročník 2 [67] 2021

V tomto čísle, zaměřeném na pokročilé technologie „štěpných“ reaktorů, vám představíme společnost VUJE, dříve Výskumný ústav jadrových elektrární. V medailonku významných osobností zavzpomínáme na profesora Františka Dubšeka, předního odborníka v oblasti parních generátorů. Seznámíme vás s evropskými projekty přispívajícími k vývoji reaktorů Gen IV, s projekty malých modulárních reaktorů a s vývojem superkritickou vodou chlazených reaktorů. Detailně se zaměříme na dva SMR projekty Skupiny ÚJV a proces transformace energetiky na bezemisní zdroje. Na následujících stránkách tradičně najdete také další díl vzpomínek Z. Kříže na vznik a historii státního dozoru nad jadernou bezpečností a samozřejmě i aktuality z oblasti jaderné energetiky.

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 400 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
Mgr. Tereza Smékalová, 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. Aleš John, MBA – předseda
Ing. Daneš Burket, Ph.D., doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D., Ing. Jiří Duspiva, PhDr. Tomáš Ehler, MBA, Ing. Miroslav Hrehor, Ing. Jiří Hůlka, 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. Vladimír Wagner, CSc., Ing. Jan Zdebor, CSc.

Grafika, sazba, jazykové korektury a tisk:
TOP Partners, s.r.o.
Classic 7 Business Park
Jankovcova 49
170 00 Praha 7
Česká republika

Registrace MK ČR
Časopis Jaderná 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 3/2021, ročník 2 [67]
Vychází 20. 7. 2021

editorial

Vážení a milí čtenáři,

jedním z klíčových témat posledního čtvrtletí se stala aféra Vrbětice. Ta nejenže velmi vyhrotila česko-ruské vztahy, ale znamenala také definitivní vyloučení Rosatomu z chystaného tendru na výstavbu nového bloku Jaderné elektrárny Dukovany. Jaký vliv bude mít tento krok na plánovaný termín zprovoznění v roce 2036 a jak se k tomuto tématu postaví příští vláda, která vzejde z podzimních voleb, zatím můžeme jen spekulovat. Téměř jisté naopak je, že se vlastní realizace prodraží.

Dostavba Dukovan je v procesu transformace energetiky přitom jen špičkou ledovce. Českou republiku, která je dnes z hlediska výroby elektrické energie proexportním trhem, čekají v následujících třech desetiletích obří investice do moderních zdrojů energie, které budou kompenzovat instalovaný výkon postupně utlumovaných hnědouhelných elektráren. V opačném případě může být ohrožena naše energetická bezpečnost, tedy schopnost zajistit si potřebné množství energetických surovin za ekonomicky přijatelnou cenu.

V souvislosti s plněním Pařížské dohody o klimatu, kterou Česká republika ratifikovala v listopadu 2017, navíc dochází ke zpřísňování dílčích cílů a urychlování procesu transformace vedoucí k dosažení uhlíkové neutrality v roce 2050. Na konci června Evropský parlament schválil klimatický zákon a posvětil tak 55% snížení emisí CO_2 do roku 2030 na místo původních 40 %. Podobně ambiciózní plány má EU i v oblasti mobility, takže poptávka po elektrické energii bude v příštích dekádách i nadále stoupat. Transformace energetiky samozřejmě otevírá prostor i moderním technologiím. V budoucím energetické mixu by tak své pevné místo mohly najít i nové generace štěpných reaktorů, kterým se detailně věnujeme v tomto čísle.

Dovolte mi, abych vám jménem redakce, redakční rady a vydavatelů popřál příjemné čtení následujících stránek a pohodové prožití letních měsíců.

Michal Šafránek

šéfredaktor

obsah

představujeme

VUJE 04
Ing. Matej Korec, MSc, PhD., Ing. Branislav Hatala, PhD.

medailonek významných osobností

Prof. Ing. František Dubšek, DrSc. 07
Oldřich Matal, Jiří Sobotka, Jan Fiedler, Zdeněk Skála, Aleš John

výzkum, vývoj a nové technologie

Evropské projekty přispívají k vývoji pokročilých jaderných reaktorů Gen IV 10
Ing. Jana Kalivodová, Ph.D.

Přehled současného stavu projektů malých modulárních reaktorů ve světě 15
Ing. Lubor Žežula

Vysokoteplotné reaktory a vodík vo svetle svetových trendov 22
Ing. Branislav Hatala, PhD., Ing. Andrej Hanzel, prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc.

Výzkumný program technologie GFR v ÚJV Řež, a. s. 27
Ing. Petr Vácha, Ing. Roman Koryčanský, Ing. Petr Hájek, CSc., Mgr. Jan Klouzal, RNDr. Václav Tyrpekl, Ph.D., Jan Pokorný, Ing. Martin Kratochvíl

Aktuálny pohľad na projekt ALLEGRO 33
Ing. Slavomír Bebjak, Ing. Branislav Hatala, PhD., prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc.

Energy Well – český modulární reaktor 39
Ing. Marek Ruščák

Vývoj superkritickou vodou chlazeného jaderného reaktoru v Evropě 42
Ing. et Ing. Markéta Kryková, Ph.D., Ing. Mariana Arnoult Růžičková, Ph.D., Ing. Monika Šípová, Ph.D.

Evaluation of the Effectiveness and Economics of Varying Renewable Energy as a Means for Abating Global Warming (Part 2) 50
Agustin Alonso, Barry Brook, Juan Eibenschutz, Carlo Lombardi, Kazuaki Matsui, Jozef Mišák, Guido Possa, Jan van Erp

Infrastruktura horkých komor Centra výzkumu Řež – díl pátý 56
Mgr. David Zoul, Ing. Markéta Koplová, Ph.D., Petra Krejčová

Malé jaderné reaktory – uranem proti uhlíku 67
Ing. Jakub Líman, Ph.D.

okno do historie

Z knihy o historii jaderné energetiky (6. část) 76
Ing. Zdeněk Kříž

aktuality

Česká jaderná asociace: Jádro je součástí naší budoucnosti (Tomáš Kovalovský) 80
Energy Well míří do Dubaje (Michal Šafránek) 81

04

VUJE

Dokument predstavuje spoločnosť VUJE, a.s. so 44ročnou históriou na medzinárodnom trhu jadrovej energetiky. VUJE je lídrom na Slovensku, má silné meno v Európe a renomé vo svete. VUJE, a.s. realizuje projekty komplexne formou dodávky na kľúč od úvodnej dokumentácie až po realizáciu diela.

Ing. Matej Korec, MSc, PhD.

27

Výzkumný program technologie GFR v ÚJV Řež, a. s.

ÚJV Řež, a. s. se již více než 10 let zabývá vývojem technologie rychlého plynem chlazeného reaktoru (GFR). Za tuto dobu se v této oblasti vypracovala mezi evropskou špičku, což dokládá množství dokončených i probíhajících národních a mezinárodních projektů, ve kterých zastává klíčovou roli.

Ing. Petr Vácha

47

Vývoj superkritickou vodou chlazeného jaderného reaktoru v Evropě

Superkritickou vodou chlazený jaderný reaktor je jedním z konceptů reaktorů IV. generace. Navazuje na provozní zkušenosti s lehkovodními reaktory a v souladu s principy moderní energetiky nabízí zvýšenou termodynamickou účinnost.

Ing. et Ing. Markéta Kryková, Ph.D.

67

Malé jaderné reaktory – uranem proti uhlíku

V současnosti je vyvíjen ekonomický a politický tlak na odstavení zdrojů spalujících uhlí, které nahradí většinou plyn, protože jiné typy zdrojů nemohou uhlí v daném čase plnohodnotně nahradit.

Ing. Jakub Líman, Ph.D.

VUJE

Ing. Matej Korec, MSc, PhD.,
Ing. Branislav Hatala, PhD.
VUJE, a.s., Trnava

Dokument predstavuje spoločnosť VUJE, a.s. so 44ročnou históriou na medzinárodnom trhu jadrovej energetiky. VUJE je lídrom na Slovensku, má silné meno v Európe a renomé vo svete. VUJE, a.s. realizuje projekty komplexne formou dodávky na kľúč od úvodnej dokumentácie až po realizáciu diela.

The document presents the company VUJE, a.s. with a 44-year history on the international nuclear energy market. VUJE is a leader in Slovakia, has a strong name in Europe and a reputation in the world. VUJE, a.s. implements projects comprehensively as the turnkey delivery from the initial documentation to the implementation of the work.

Spoločnosť VUJE, a.s. je historicky známa ako Výskumný ústav jadrových elektrární, jedinečný v Československu, so vznikom 1. 1. 1977. V roku 1994 prešla privatizáciou na akciovú spoločnosť VÚJE Trnava, a.s. a v roku 2000 sa pretransformovala na inžiniersku spoločnosť s následnou zmenou obchodného názvu na súčasný.

Za 44 rokov úspešnej histórie sa činnosti VUJE, a.s. okrem výskumu a vývoja rozšírili o projektové, inžinierske, technické, školiace, diagnostické a konzultačné. Ich súhrn dnes spolu s prácami na zabezpečovaní bezpečnosti jadrových elektrární, vyraďovaní jadrových elektrární a služieb na podporu a prevádzku prenosových a distribučných sústav, tvorí jadro aktivít. Realizujú sa komplexne formou dodávok na kľúč od úvodnej dokumentácie až po konečné riešenia.

VUJE, a.s. je rešpektovanou a uznávanou autoritou s množstvom medzinárodných úspechov a inovatívnych riešení.

MEDZINÁRODNÉ KONZORCIÁ A DÔLEŽITÉ MÍĽNIKY – MOCHOVCE, ALLEGRO, SAFEG

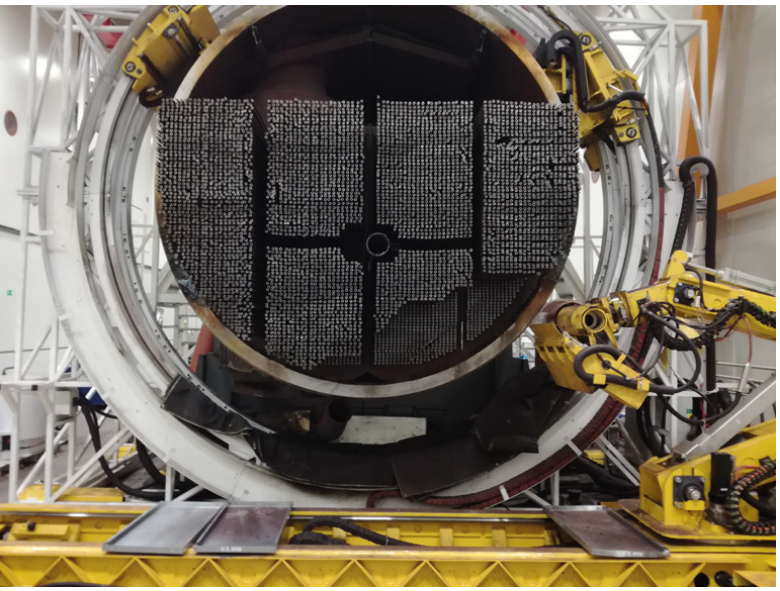
Organizačnú štruktúru VUJE, a.s. tvorí 11 divízií. Medzi najvýznamnejšie projekty súčasnosti patrí bezpochyby dostavba 3. a 4. bloku Jadrovej elektrárne Mochovce, demontáž a fragmentácia komponentov primárneho okruhu JE V1 Jaslovské Bohunice či unikátne manipulátory určené pre kontrolu parogenerátorov a zaslepovanie teplovýmenných rúrok.

Pre zabezpečovanie realizácie fyzikálnych a energetických testov pre spustenie 3. bloku JE Mochovce disponuje VUJE excelentným tímom špecialistov angažujúcich sa celosvetovo v rôznych pracovných skupinách OECD či IAEA.

VUJE je zároveň významným členom medzinárodného konzorcia V4G4 Centre of Excellence, založeného pre realizáciu koordinovaného výskumu a vývoja reaktorov IV. generácie ako jedného z vybraných perspektívnych smerov rozvoja jadrovej energetiky. V rámci medzinárodného zoskupenia Generation IV International Forum sa zaoberá vývojom prototypu nového inovatívneho reaktora chladeného héliom s rýchlym spektrom neutrónov ALLEGRO. V rámci vývoja tohto reaktora je VUJE aj lídrom konzorcia zloženého z 15 významných výskumných inštitúcií z Európy a sveta pracujúcich na projekte SafeG, financovaného z Európskej komisie (Horizon2020 – EURATOM).

DEMONTÁŽ ODSTAVENÝCH BLOKOV JE JASLOVSKÉ BOHUNICE A FRAGMENTÁCIA

Dôležitou činnosťou VUJE, a.s. je demontáž odstavených blokov jadrových elektrární a ich fragmentácia, pre ktorú navrhla, na-



Obr. 1: Manipulátor pre fragmentáciu parogenerátorov

projektovala, vyrobila a uviedla do prevádzky špecifické technologické zariadenia a momentálne zbiera reálne praktické skúsenosti s ich prevádzkou.

Ide o práce na vyraďovaní dvoch odstavených blokov JE V1 v Jaslovských Bohuniciach, ku ktorým sa Slovensko zaviazalo pri vstupe do Európskej únie. Projekt D4.2 ako bezpečnú, efektívnu a ekonomickú likvidáciu častí odstavených blokov elektrární riadi štátna spoločnosť JAVYS, a.s., spolufinancuje Európska banka pre obnovu a rozvoj, a na základe medzinárodnej súťaže realizuje konzorcium spoločností Westinghouse–VUJE.

Cieľom je demontáž a fragmentácia veľkorozmerných komponentov a zariadení primárneho okruhu, ich spracovanie do vhodnej formy pre úložisko rádioaktívneho odpadu alebo pre uvoľnenie do životného prostredia. Lídrom procesu dekontaminácie je práve VUJE, ktorého tím 30 pracovníkov nedávno prelomil hranicu dekontaminovaných 1 400 ton z celkových 3 000 ton.

Ďalších 40 odborníkov pracuje pod vedením VUJE v rámci D4.2 aj na demontáži a fragmentácii 12 parogenerátorov s využitím diaľkovo ovládaných zariadení, špeciálne vyvinutých v spolupráci s Technickou univerzitou v Košiciach. Nové technológie umožňujú fragmentáciu jedného parogenerátora za menej ako 3 mesiace. Momentálne je fragmentovaných už 5 z celkových 12 parogenerátorov.

MONTÁŽ A PREVÁDZKA SYSTÉMU MERANIA KONCENTRÁCIE VODÍKA NA UKRAJINE

VUJE sa podieľa na montáži Systému merania koncentrácie vodíka 4. bloku Rivnenskej JE (VVER-1000). Systém umožňuje nepretržitý monitoring koncentrácie vodíka v kontajnmente reaktora pri rôznych režimoch bloku. Informácie poskytované systémom umožňujú včas prijať nevyhnutné prevádzkové a bezpečnostné opatrenia vyplývajúce z ohrozenia bezpečnosti jadrového zariadenia pri prípadnom výskyte vodíka v monitorovaných priestoroch technológie.

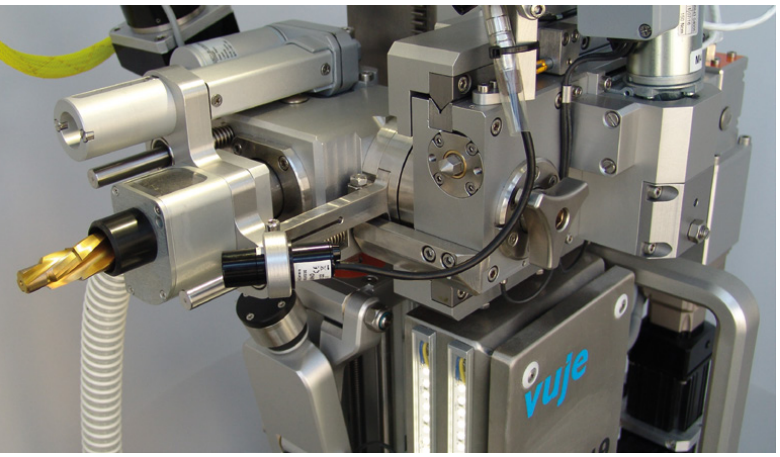
To všetko sú technologické výzvy ako príspevok VUJE, a.s. pre zvýšenie bezpečnosti jadrových blokov po celom svete.

VUJE V ZAHRANIČÍ, PRÁCA PRE ČEZ AJ ČERNOBYĽ

Medzi ďalších zahraničných zákazníkov VUJE, a.s. patria okrem Rivnenskej JE aj jadrové elektrárne Dukovany, Temelín (ČEZ) či napríklad ČEPS, E.ON, Rosatom, NAEK Energoatom, Holtec Ukraine a Černobyľská JE.

Pre Černobyľ, ako oblasť veľkého záujmu dodávateľov v oblasti jadrovej energetiky, experti VUJE vyvinuli a dodali špeciálne prečerpávacie stanice a kontajnery pre prepravu tekutého rádioaktívneho odpadu vznikajúceho počas fragmentácie palivových kaziet vyhoreného paliva z reaktorových blokov 1, 2 a 3.

Z ďalších jadrových elektrární sú klientmi VUJE, a.s. Chmeľnická, Južnoukrajinská, Záporožská, Kolská, Novovoronežská JE a aj JE Paks.



Obr. 2: Modul OPZ pre zaslepovanie teplovýmenných rúrok

Pre MVM Ltd. – JE Paks tím konštruktérov VUJE vyvinul a v roku 2020 dodal manipulátor ZOK-OPZ 19 na zaslepovanie teplovýmenných rúrok parogenerátorov, umožňujúci diaľkovo ovládané zaslepovanie netesných rúrok zváraním.

Podobné typy manipulátorov pre kontrolu parogenerátorov a zaslepovanie teplovýmenných rúrok boli vyvinuté aj v rámci zákazky pre ČEZ a dodané v lokalitách Dukovany a Temelín. Na svete jedinečný manipulátor IRIS-20, odovzdaný do JE Dukovany začiatkom tohto roka, zabezpečuje okrem zaslepovania aj kontroly rúrok, ultrazvukovú kontrolu vnútorných povrchov, vizuálnu kontrolu aj vnútorných povrchov kolektora ako aj vizuálnu kontrolu samotných teplovýmenných rúrok zvnútra. Boli v ňom použité najnovšie dostupné technológie a momentálne sa pracuje na výcvikovom manipulátore tohto typu.

ŠKOLENIE PERSONÁLU JADROVÝCH ELEKTRÁRNÍ

Školiace a výcvikové stredisko personálu jadrových zariadení VUJE, a.s. zaisťuje prípravu odborníkov pre energetiku. Realizuje teoretickú prípravu zamestnancov a ich výcvik na simulátoroch. Na základe nadobudnutých vedomostí a v súlade s legislatívou vydáva zamestnancom Osvedčenia o odbornej spôsobilosti. Zabezpečuje výcvik a vzdelávanie zamestnancov z oblasti klasických elektrární, elektrizačnej sústavy a ďalších užívateľov. Trvale vykonáva vývoj a zdokonaľovanie systémov vzdelávania personálu jadrových a klasických elektrární a elektrických rozvodných staníc.

ODKAZ DO 45. ROKU EXISTENCIE: BEZ JADRA TO JEDNODUCHO NEJDE

V roku 2020 vzrástli tržby VUJE, a.s. na viac než 140 miliónov eur. Za obrovskú devízu považuje svojich ľudí, až 63 % zo 625 zamestnancov predstavuje odborníkov s akademickým a vysokoškolským vzdelaním.

Spoločnosť je popularizátorom jadrovej energetiky ako nízkoemisného zdroja energie. Aktívne sa podieľa na osvete jadrového odvetvia s tým, že ochrana klímy a ciele, ktoré si Európska komisia dáva, nie je možné pre najbližších 50 a viac rokov dosiahnuť bez jadrovej energetiky.

Ing. Matej Korec, MSc, PhD.

matej.korec@vuje.sk

Vyštudoval Ekonomickú univerzitu v Bratislave a medzinárodný manažment na Univerzite v Oxforde. Do spoločnosti VUJE, a.s. nastúpil ako finančný špecialista, od roku 2008 zastáva pozíciu generálneho riaditeľa a člena predstavenstva a naďalej buduje spoločnosť s cieľom presadenia sa na medzinárodnej úrovni.

Prof. Ing. František Dubšek, DrSc.

Oldřich Matal, Jiří Sobotka, Jan Fiedler, Zdeněk Skála, Aleš John

Narodil se v Dobrušce v roce 1929. Po studiích v Hradci Králové a na ČVUT v Praze zahájil profesní kariéru v tehdejším Státním výzkumném ústavu kotlů (SVÚK) v Hradci Králové. Podstatnou část svého tvůrčího života věnoval profesor Dubšek problematice využití kapalných kovů jako nosičů tepla v energetice (zejména pak sodíku v energetice jaderné), a to ve výměnících tepla typu kov–kov a kov–voda/vodní pára – tedy v parních generátorech. Této problematice se věnoval již od roku 1954 ve SVÚK a později i ve Výzkumném ústavu energetických zařízení (VÚEZ) při První brněnské strojírně, kam byl SVÚK v roce 1958 převeden. Je spoluautorem patentového návrhu na článkové řešení parních generátorů pro první československou jadernou elektrárnu A-1, kde byl jako nosič tepla v primárním okruhu použit plynný CO_2 a v sekundárním okruhu voda a vodní pára. Komplet parogenerátoru pro A-1 pak První brněnská vyrobila a do Jaslovských Bohunic dodala.

Počátkem šedesátých let minulého století se uskutečnila jeho první pracovní cesta do FEI Obninsk (Ústav pro fyziku a energetiku), která zahájila dlouholetou spolupráci s tehdejšími sovětskými pracovišti, zejména s Výzkumným ústavem atomových reaktorů (NIIAR) v Dimitrovgradu, za všestranné podpory československé Komise pro atomovou energii. Výsledkem této spolupráce bylo například odzkoušení funkčního modelu a následné uvedení parogenerátoru československé koncepce do provozu v komplexu sovětského výzkumného reaktoru BOR-60 v roce 1973.

V sedmdesátých letech minulého století vzniklo ve VÚEZ pod jeho vedením nové řešení parního generátoru, tzv. obrácený parní generátor (OPG) s novým provedením článků, kdy sodík proudí v trubkách a voda a vodní pára v mezitrubkovém prostoru. Parogenerátor označený OPG1 vyrobila PBS a byl uveden do provozu na výzkumném reaktoru BOR-60 v září 1981. Po zkušenostech s jeho bezproblémovým provozem VÚEZ připravil konstrukčně a technologicky nové řešení – OPG2, který byl spuštěn v březnu 1991. Oba parní generátory úspěšně pracují na BOR-60 v Dimitrovgradu dodnes.

V roce 1975 byl jmenován náměstkem pro výzkum a v roce 1979 ředitelem Výzkumného ústavu Závodů energetického strojírenství při VHJ Škoda a v roce 1981 se stal ředitelem obnoveného VÚEZ. V těchto letech také

Účastníci spouštění OPG1 na BOR-60 (rok 1981) – pracovníci VÚEZ a NIIAR před budovou BOR-60 (prof. Dubšek vpředu uprostřed)

obhájil vědeckou hodnost DrSc. a v roce 1985 byl jmenován profesorem na VUT v Brně. Od roku 1985 vedl Katedru termomechaniky a jaderné energetiky, po roce 1989 přednášel v Energetickém ústavu VUT a významně se podílel na výchově studentů a doktorandů v energetice.

Jeho celoživotní práce na téma článkových parních generátorů jaderných elektráren s rychlými reaktory chlazenými tekutým sodíkem byla oceněna Státní cenou.

Byl autorem či spoluautorem několika desítek vynálezů a autorských osvědčení a autorem celé řady učebnic, odborných článků a publikací.

Profesor Dubšek zemřel náhle v roce 1999 ve věku sedmdesáti let.

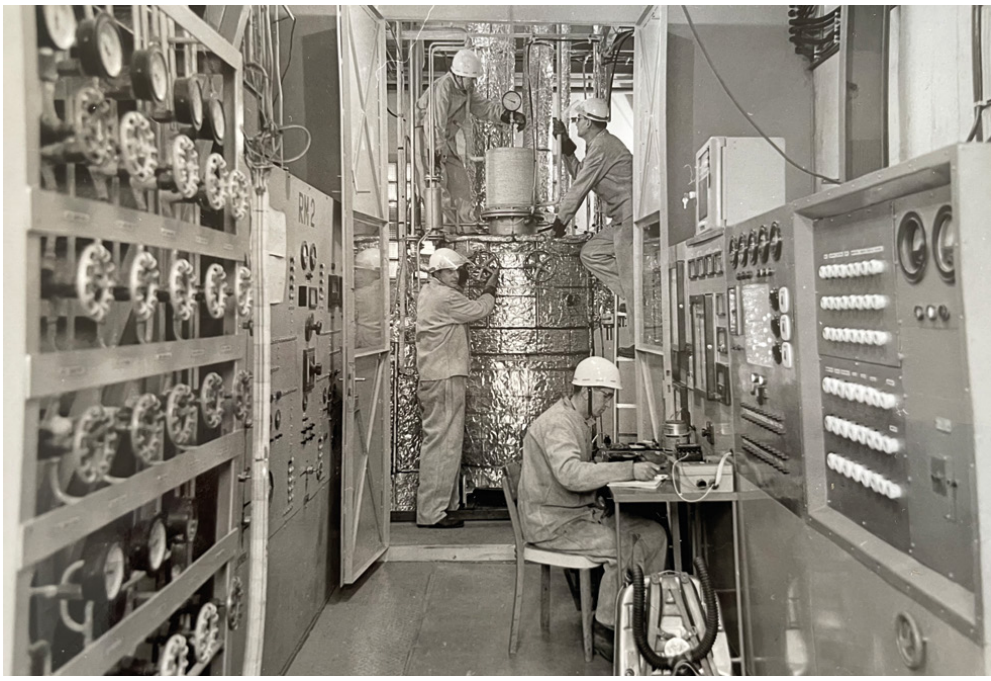
Vzpomínka doc. Ing. Zdeňka Skály, CSc. na prof. Dubšeka

S profesorem Dubšekem jsem se potkal ve dvou různých životních situacích. V roce 1961, kdy jsem končil studium oboru Stavba energetických strojů na tehdejší Strojní fakultě, přednášel v posledním ročníku studia předmět Jaderná energetika externí odborník z praxe, Ing. František Dubšek z Výzkumného ústavu energetických zařízení v Brně. Jeho přednášky o jaderné energetice byly poutavé a velmi zajímavé. Dovedl studenty nadchnout pro moderní technologii jaderných reaktorů. V roce 1990 přešel na katedru KTEJZ, kde jsem působil jako docent na odboru tepelně energetických zařízení, specializace parní kotle. Prof. Dubšek vedl odbor jaderných zařízení. Poznal jsem ho jako staršího kolegu, který se uměl podělit o životní zkušenosti. Byl to člověk společenský, rád se účastnil besed a porad, vždy byl ochoten pomoci mladším kolegům radou a svými zkušenostmi.

Na profesora Dubšeka vzpomíná doc. Ing. Jan Fiedler, CSc.

S panem profesorem jsem se setkal nejdřív jako student, kdy nás jako externista učil v sedmdesátých letech na Strojní fakultě v Brně předmět Jaderná energetika. Dodnes pamatuji, že pan profesor byl vysoký a působil přísným dojmem. Měl velký nadhled a dovedl zajímavě vyprávět, zkrátka zkušený člověk z praxe. Jak začal přednášet, tak byla přísnost

Prof. Dubšek (nahoře vpravo) se spolupracovníky kontroluje stav prvního sodíkového okruhu KAS vybudovaného ve VÚEZ (rok 1967)



pryč. Ještě mám schované zápisky z jeho přednášek z roku 1979, kdy si byl zřejmě dobře vědom, že učí přehledový předmět pro nás ve specializaci Tepelné turbíny a rovnou vynechal jadernou fyziku. Místo ní nám vykládal perličky o stavbě a provozu tehdejších atomových elektráren. V poznámkách mám například napsáno, že reaktory RBMK mají velkou budoucnost, protože vyrábí přehřátou páru a palivo lze měnit za provozu, to ještě nikdo neznal město Černobyl… Na zkoušku jsme šli k němu do výzkumáku První brněnské strojírny, kde pracoval. Bylo to až ve Slatině, kam tehdy nejezdila ani MHD. Dřevěné baráky měly honosný název VÚZES Brno a zkouška proběhla jako přátelské povykládání. Tehdy jsem si myslel, že se vidíme jistě naposled.

Pak jsem právě v té v První brněnské strojírně 12 roků pracoval v konstrukci parních turbín. Když jsem po roce 1991 nastoupil zpět na katedru Tepelných a jaderných energetických zařízení, setkal jsem se s panem profesorem znovu. To už byl interním učitelem ve specializaci Jaderně energetická zařízení. Jeho studenti ho měli rádi i pro lidský přístup. Do odpoledních cvičení občas brával kytaru a pro odlehčení složitých výpočtů zpíval se studenty trampské písničky. Utkvělo mi v paměti, jak například v prosinci 1992 se studenty oslavoval 50. výročí spuštění prvního reaktoru v Chicagu za války. Mě brzy nabídnul tykání a sedávali jsme spolu jako – jak rád zdůrazňoval – „staří prvobrňáci" v jeho pracovně a diskutovali o tehdejším překotně se vyvíjejícím energetickém průmyslu, ale taky o přírodě a životě. Později jsem za ním občas přijel na jeho malou dřevěnou chatu, kterou měl v romantickém údolí řeky Svratky na Březinách. U ohníčku jsme opékali buřty a koukali dolů na řeku. Tehdy mi říkal: „Jendo, já už nikam nepojedu, tady je moje Amerika". Jezdil jsem tam k němu na kole. A jednou když byla zima a pršelo, tak mě napájel něčím pro zahřátí tak, že mě musel při odjezdu přidržet, abych udržel balanc. Ještě za mnou volal: „Jak se rozjedeš, tak to už bude dobrý" – bylo. V zimě se kolem jeho chaty jezdívala „Březinská padesátka", já tehdy na lyžích závodil, a tak jsem tam měl domluvenou privátní občerstvovačku.

Pan profesor učil do konce života, školu a studenty měl moc rád a říkal, že s nimi vždycky omládne. O prázdninách 1999 jsem s ním, jako tajemník ústavu ještě ladil rozvrh na zimní semestr. Pak jeden den v září už nepřišel do práce…

Evropské projekty přispívají k vývoji pokročilých jaderných reaktorů Gen IV

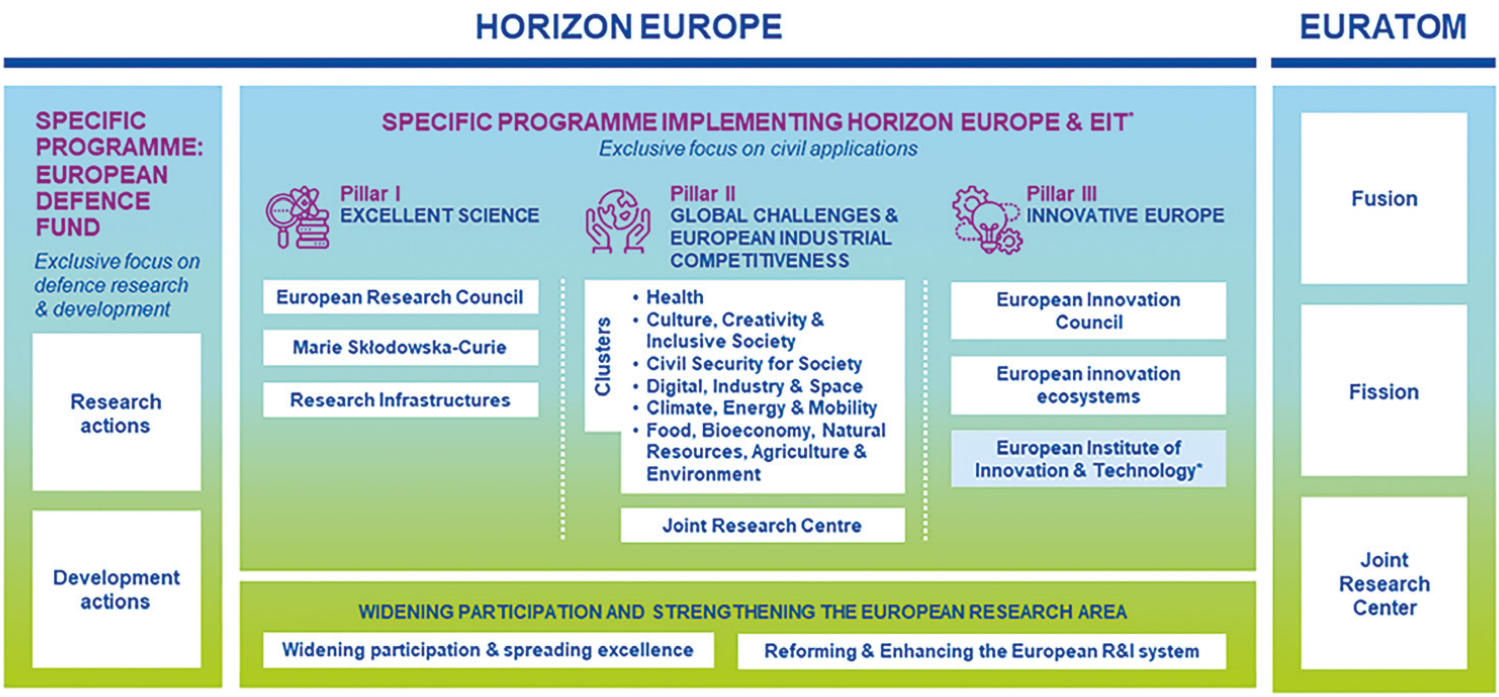
Ing. Jana Kalivodová, Ph.D.
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Jaderná energie je druhým největším zdrojem nízkouhlíkové energie [1] a hraje významnou roli v energetického mixu ve 14 z 28 členských států Evropské unie, což představovalo 25 % elektřiny vyrobené v EU (2017) [2]. Evropská komunita se dlouhodobě zabývá také vývojem pokročilých jaderných technologií, pracujících s rychlými neutrony a uzavřeným palivovým cyklem, které umožňují efektivnější využití jaderného paliva a zároveň snížení množství radioaktivních odpadů. Článek shrnuje dotační evropské projekty zabývající se právě vývojem pokročilých jaderných reaktorů, které pomohou řešit stávající ekonomické, bezpečnostní a environmentální problémy v oblasti energetiky.

Nuclear energy is the second-largest source of low-carbon energy [1] and plays a significant role in the energy mix in 14 of the 28 member states of the European Union, representing 25 % of the electricity produced in the EU (2017) [2]. The European community has been involved in the development of advanced nuclear technologies, working with fast neutrons and a closed fuel cycle, which enables more efficient use of nuclear fuel while reducing the amount of radioactive waste for long time. The article summarizes European grant projects dealing with the development of advanced nuclear reactors, which will help to solve existing economic, safety and environmental problems in the field of energy production.

Evropská komise poskytuje finanční prostředky na širokou škálu projektů/programů, které se vztahují k různým oblastem včetně výzkumu a vzdělávání. Financování se provádí prostřednictvím decentralizovaných a centralizovaných akcí. Decentralizované akce jsou řízeny na vnitrostátní úrovni národními agenturami se sídlem v jednotlivých zemích EU. Centralizované akce jsou naproti tomu řízeny na evropské úrovni Evropskou komisí a jedná se například o rámcové programy (RP) pro výzkum a technologický rozvoj FP1 až FP9, které byly zahájeny v roce 1984 a pokračují do současnosti. Podpora projektů je zpravidla realizována formou grantů/dotací, které pokrývají nejčastěji 30–75 % projektových nákladů, pouze v některých případech dosahuje výše dotace 100 %. Tematické zaměření těchto programů je různé a pokrývá širokou škálu oblastí jako je podpora výzkumu a inovací, zavádění digitálních technologií, ochrana životního prostředí, budování evropské infrastruktury, kultura či vzdělání. Jejich společným cílem je prohlubování mezinárodní spolupráce a průřezové řešení problémů na celoevropské úrovni. Konkrétní cíle a akce se v jednotlivých obdobích financování liší. V 6. a 7. rámcovém programu byly zaměřeny na technologický výzkum. V Horizontu 2020 byl kladen důraz na inovace, rychlejší ekonomický růst a propojení výzkumu s trhem. Nejnovější program Horizont Evropa [3] (2021–2027) s rozpočtem 95,5 mld. euro se zabývá se změnou klimatu, pomáhá dosáhnout cílů OSN v oblasti udržitelného rozvoje a zvyšuje konkurenceschopnost a růst EU.

Program **Euratom** (Evropské společenství pro atomovou energii pro výzkum a odbornou přípravu) je integrální součástí programu Horizont Evropa, doplňuje rámcový program pro výzkum a inovace v oblasti jaderné energie (jaderné štěpení a jaderná fúze). V květnu tohoto roku EU přijala program Euratomu pro výzkum a odbornou přípravu na období 2021–2025. Program má rozpočet 1 382 milionů EUR a doplní program Horizont Evropa. Bude



* The European Institute of Innovation & Technology (EIT) is not part of the Specific Programme

podporovat výzkum a inovace v oblastech fúze a štěpení a jaderné bezpečnosti, klade zvýšený důraz na bezenergetické použití jaderné technologie – podpoří evropský plán boje proti rakovině, velký potenciál má také aplikace jaderné vědy v oblastech jako zemědělství, životní prostředí a vesmír. Program posílí evropské jaderné odborné znalosti a kompetence prostřednictvím mobility, vzdělávání a odborné přípravy (viz např. akce „Marie Sklodowska-Curie"), jakož i šíření a transfer technologií.

Specifické cíle jsou zaměřeny na podporu bezpečnosti jaderných systémů, a to jak stávajících jaderných elektráren, tak také bezpečnosti pokročilých reaktorových konceptů generace IV. (Gen IV). Dále jsou zaměřeny na bezpečné nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivním odpadem, na vyřazování JE z provozu, na udržování odborných znalostí v jaderné oblasti, radiační ochranu a připravenost na jaderné havárie, na mezisektorové synergie a nové aplikace ionizujícího záření a jaderných technologií, na vývoj jaderných materiálů, na demonstraci proveditelnosti jaderné syntézy a v neposlední řadě na zajištění dostupnosti a využívání výzkumných infrastruktur celoevropského významu.

Tento článek shrnuje evropské projekty, které přispěly k vývoji pokročilých jaderných reaktorů Gen IV. Jedná se o šest návrhů typů jaderných reaktorů definovaných Mezinárodním fórem pro IV. generaci (GIF) z roku 2001 a patří mezi ně:

VHTR – vysokoteplotní reaktor (Very-High-Temperature Reactor)
SFR – sodíkem chlazený rychlý reaktor (Sodium fast Reactor)
GFR – plynem chlazený rychlý reaktor (Gas Fast Reactor)
LFR – olovem chlazený rychlý reaktor (Lead Fast Reactor)
SCWR – reaktor chlazený superkritickou vodou (SuperCritical Water Reactor)
MSR – reaktor chlazený roztavenou solí (Molten Salt Reactor)

K chlazení by už většina konceptů neměla využívat vodu, ale látky umožňující provoz s mnohem vyšší teplotou, a tím i účinností. Reaktory Gen IV jsou zatím předmětem vývoje a jde převážně o první demonstrační reaktory, pracující s rychlými neutrony a uzavřeným palivovým cyklem, které umožňují efektivnější využití jaderného paliva a zároveň

rozmezí provozních teplot	korespondující typ reaktoru
<300 ˚C	LWR, LFR, SCWR, GFR, MSR, V/HTR
300–500 ˚C	EPR, LFR, SCWR, GFR, MSR, V/HTR
500–1 000 ˚C	GFR, MSR, V/HTR
>1 000 ˚C	žádný

Tab. 1: LWR – stávající vodou chlazené jaderné reaktory; EPR – tlakovodní reaktory generace III

snížení množství radioaktivních odpadů (LFR, SFR, GFR). Patří sem však i některé technologie pracující s tepelnými neutrony a otevřeným palivovým cyklem (V/HTR, MSR).

Z tabulky 1 je patrno, že reaktory Gen IV mají provozní teploty primárního okruhu vyšší ve srovnání se současnými reaktory a lze je doporučit pro i pokrytí potřeby tepla v širokém teplotním rozsahu v mnoha neelektrických aplikacích (vytápění/chlazení, odsolování, výroba procesního tepla, chemický průmysl, rafinerie a produkce vodíku).

Existuje však několik výzev v oblasti výzkumu a vývoje Gen IV, zahrnujících vývoj a testování konstrukčních materiálů a jejich kompatibilitu s chladivy, zajištění bezpečnosti a proces palivového cyklu.

Evropské projekty, které se vývoji pokročilých reaktorů věnovaly již v šestém a sedmém rámcovém programu (FP6 a FP7) jsou shrnuty v tabulce níže společně s aktuálními projekty H2020 [5].

Z tabulky 2 vyplývá, že jedním z důležitých témat ve vývoji jaderných reaktorů je výzkum a vývoj konstrukčních jaderných materiálů a paliva, zejména pro pokročilé systémy Gen IV, které budou provozovány při extrémních provozních podmínkách (vysoké teploty, tlaky, pokročilá chladiva – tekuté kovy, roztavené soli, plyn nebo nadkritická voda). Výzkum jaderných materiálů v Evropě je organizován společným programem pro jaderné materiály (JPNM) v rámci Evropské aliance pro energetický výzkum (EERA), která evropský energetický výzkum a vývoj koordinuje. Mezi běžící projekty podpořené JPNM patří GEMMA, M4F či PUMMA, ty pokrývají kvalifikaci jaderných materiálů, svarových spojů a paliva, která je experimentálně ověřena (včetně expozice materiálů ve vysoké teplotě, vysoce korozivním prostředí a intenzivním toku rychlých neutronů) a numericky modelována. Experimentální data budou transformována do pravidel pro designéry systémů a komponent (RCC-MRx kód). Výzkumu zaměřujícímu se na recyklaci vyhořelého paliva, výrobu a testování inovativního paliva MOX pro rychlé EU demonstrátory (ASTRID, ALLEGRO, ALFRED) se věnují projekty INSPYRE, GENIORS i PUMMA.

Pro udržení kontinuity evropského materiálového výzkumu vytvoří základy pro přípravu spolufinancovaného evropského partnerství v rámci HEU pro jaderné materiály a palivo reaktorů všech generací projekt ORIENT-NM.

V rámci H2020 probíhají dále projekty podporující výzkum bezpečnosti a studie licenčních postupů a norem pro budoucí pokročilé jaderné systémy reaktorů chlazených roztavenými solemi (SAMOSAFER), superkritickou vodou (ECC-SMART), tekutými kovy (PASCAL) nebo sodíkem (ESFR-SMART). Projekt H2020 SafeG řeší vybrané úkoly pro podporu bezpečného provozu rychlého plynem chlazeného reaktoru ALLEGRO, včetně pracovního balíčku materiálového výzkumu, jehož lídrem je Centrum výzkumu Řež, které tak může využít dosud získané znalosti a především výzkumnou infrastruktury v oblasti vysokoteplotní koroze; vývoje a testování vysokoteplotních komponent (s využitím smyček HTHL a S-Allegro). Projekty H2020 MYRTE a PATRICIA podpoří vývoj transmutačních systémů a rozvoj výzkumného zařízení MYRRHA. Projekt MYRTE řešil proveditelnost transmutace vysoce aktivního odpadu v průmyslovém měřítku.

Tab. 2: EU projekty související s vývojem Gen IV jaderných reaktorů

Projekt	Odkaz	Reaktor systém	RP
The Gas Cooled Fast Reactor Project	https://cordis.europa.eu/project/id/12773	GFR	FP6
European Lead-cooled System	https://cordis.europa.eu/project/id/36439	LFR	
Assessment of LIquid Salts for innovative applications	https://cordis.europa.eu/project/id/44809	MSR	
ReActor for Process heat, Hydrogen And ELectricity generation	https://cordis.europa.eu/project/id/516508	V/HTR	
Plutonium and Minor Actinides Management by Gas-Cooled Reactors	https://cordis.europa.eu/project/id/36457	V/HTR	
Basic Research for Innovative Fuels Design for GEN IV systems	https://cordis.europa.eu/project/id/211690	Materiály – palivo	
Advanced fuelS for Generation IV reActors: Reprocessing and Dissolution	https://cordis.europa.eu/project/id/295825	Materiály – palivo	FP7
European Gas Cooled Fast Reactor	https://cordis.europa.eu/project/id/249678	GFR	
Gen IV and Transmutation MATerials	https://cordis.europa.eu/project/id/212175	Materiály	
MATerials TEsting and Rules	https://cordis.europa.eu/project/id/269706	Materiály	
Thermal-hydraulics of Innovative Nuclear Systems	https://cordis.europa.eu/project/id/249337	všechny	
Preparation of ALLegro – Implementing Advanced Nuclear Fuel Cycle in Central Europe	https://cordis.europa.eu/project/id/323295	GFR	
Nuclear Cogeneration Industrial Initiative – Research and Development Coordination	https://cordis.europa.eu/project/id/605167	V/HTR	
Collaborative Project on European Sodium Fast Reactor	https://cordis.europa.eu/project/id/232658	SFR	
Visegrad Initiative for Nuclear Cooperation	https://cordis.europa.eu/project/id/662136	GFR	H2020
GEneration IV Materials MAturity (GEMMA)	https://cordis.europa.eu/project/id/755269	Materiály	
GEN IV Integrated Oxide fuels Recycling Strategies (GENIORS)	https://cordis.europa.eu/project/id/755171	Materiály – palivo	
European Sodium Fast Reactor Safety Measures Assessment and Research Tools (ESFR-SMART)	https://cordis.europa.eu/project/id/754501	SFR	
Investigations Supporting MOX Fuel Licensing in ESNII Prototype Reactors (INSPYRE)	https://cordis.europa.eu/project/id/754329	Materiály – palivo	
MYRRHA Research and Transmutation Endeavour (MYRTE)	https://cordis.europa.eu/project/id/662186	MYRRHA	
Safety of GFR through innovative materials, technologies and processes (SafeG)	https://cordis.europa.eu/project/id/945041	GFR	
A Paradigm Shift in Reactor Safety with the Molten Salt Fast Reactor	https://cordis.europa.eu/project/id/661891	MSR	
Severe Accident Modeling and Safety Assessment for Fluid-fuel Energy Reactors (SAMOSAFERS)	https://cordis.europa.eu/project/id/847527	MSR	
Plutonium Management for More Agility (PUMMA)	https://cordis.europa.eu/project/id/945022	Materiály – palivo	
MULTISCALE MODELLING FOR FUSION AND FISSION MATERIALS (M4F)	https://cordis.europa.eu/project/id/755039	Materiály	
Joint European Canadian Chinese development of Small Modular Reactor Technology (ECC-SMART)	https://cordis.europa.eu/project/id/945234	SCWR	
High-Performance Advanced Methods and Experimental Investigations for the Safety Evaluation of Generic Small Modular Reactors	https://cordis.europa.eu/project/id/945063	všechny	
Organisation of the European Research Community on Nuclear Materials (ORIENT-NM)	https://cordis.europa.eu/project/id/899997	Materiály	
Partitioning And Transmuter Research Initiative in a Collaborative Innovation Action (PATRICIA)	https://cordis.europa.eu/project/id/945077	MYRRHA	
Research and Development in support of the GEMINI Initiative	https://cordis.europa.eu/project/id/755478	V/HTR	
Proof of augmented safety conditions in advanced liquid metal cooled systems (PASCAL)	https://cordis.europa.eu/project/id/945341	LFR	

Závěr

Společným cílem reaktorů Gen IV je udržitelnost, zlepšení využívání štěpného materiálu a uzavření palivového cyklu. Nicméně vývoj a výzkum Gen IV systémů je dlouhodobý a neobejde se bez finanční podpory. Tento článek shrnuje EU projekty, které v uplynulých letech přispěly a přispívají právě k vývoji pokročilých jaderných reaktorů Gen IV. Významným průřezovým výzkumným tématem pro všechny pokročilé systémy je vývoj a kvalifikace jaderných inovativních materiálů.

Reference:
[1] World Nuclear Performance Report 2019. Contify Energy News, 2019
[2] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Nuclear_energy_statistics
[3] https://www.horizontevropa.cz/cs
[4] https://arhiv.djs.si/proc/port2004/htm/pdf/0903.pdf
[5] https://cordis.europa.eu/projects/en

Ing. Jana Kalivodová, Ph.D.

jana.kalivodova@cvrez.cz

Působí jako vědecká tajemnice ve společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o. Je absolventkou VŠCHT v Praze s více než 15letou zkušeností v oblasti vysokoteplotní degradace materiálů v energetice a dalších aplikacích. Je členkou správní rady Programu pro jaderné materiály pod EERA (EERA JPNM). Dále zastupuje EU v mezinárodní organizaci GIF v systému V/HTR projektu Materiály, je pozorovatelkou v systému GFR a také členkou evropské průmyslové iniciativy pro jadernou kogeneraci (NC2I).

JADERNÉ DNY 2021 na ZČU v Plzni
15. 9. - 20. 10.
Soutěže o tablety při každé prezentaci
Přednáší experti z oboru
ŠKODA JS
CENEN
ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Zajímá vás jaderná energie?
Znáte energetické problémy současnosti?
Chcete vědět, jak funguje jaderný reaktor?
Je jaderná energie bezpečná?
Ekologická? Užitečná? Zjistěte to sami!
Navštivte originální výstavu v prostorách ZČU v Plzni.

Přehled současného stavu projektů malých modulárních reaktorů ve světě

Ing. Lubor Žežula
ÚJV Řež, a. s.

Politici, elektrárenské společnosti, odborná i laická veřejnost z celého světa projevují rostoucí zájem o problematiku malých modulárních reaktorů (MMR) jako o konkurenceschopnou nízkouhlíkovou energetickou technologii s potenciálem být součástí budoucích integrovaných energetických systémů řešících přechod na nízkouhlíkovou energetiku do roku 2050. Malé modulární reaktory, které lze nasadit buď jako jedno, nebo vícemodulové elektrárny, nabízejí možnost kombinovat jadernou energii s alternativními zdroji energie, včetně obnovitelných zdrojů. V článku je uveden reprezentativní přehled projektů malých modulárních reaktorových systémů vyvíjených ve světě a podrobnější informace o slibných projektech, které jsou v provozu, v realizaci, nebo jsou k realizaci připraveny. Podmínkou úspěšného nasazení MMR ve světě je vznik globálního dodavatelského řetězce, který představuje také významnou příležitost pro zapojení českého průmyslu a globální základna zákazníků. K tomu je zapotřebí sjednocené nadnárodní sítě pro licencování a koordinovaných mezinárodních kódů a standardů pro výrobu systémů a komponent MMR.

Politicians, utilities, professional and non-professional public from all over the world are showing a growing interest in small modular reactors (SMR) as a competitive low-carbon energy technology with the potential to be part of future integrated energy systems addressing the transition to low carbon energy by 2050. Small modular reactors, which can be used as either single or multi-module power plants, offer the possibility to combine nuclear energy with alternative energy sources, including renewables. The article provides a representative overview of small modular reactor system projects developed worldwide and more detailed information on promising projects that are in operation, in implementation or are ready for implementation. The condition for the successful deployment of SMR in the world is the creation of a global supply chain, which also represents a significant opportunity for the involvement of Czech industry and a global customer base. This requires a unified transnational licensing network and coordinated international codes and standards for the production of SMR systems and components.

1. ÚVOD

Malé modulární reaktory představují další generaci technologických inovací v oblasti jaderné energetiky s potenciálem pomoci řešit výzvy a příležitosti související se změnou klimatu a hospodářským růstem. MMR mohou poskytnout zdroj bezpečné, čisté a dostupné energie při řešení přechodu na nízkouhlíkovou energetiku do roku 2050 jak ve světě, tak i v ČR.

Malé modulární reaktory (angl. Small Modular Reactors – SMR) jsou definovány jako technologicky vyspělé moderní jaderné reaktory/elektrárny, které vyrábějí elektrickou energii s výkonem do 300 MW_e. MMR s elektrickým výkonem do 10 MW_e se označují jako mikro-modulární reaktory. Rozlišují se dva typy modulů, a to modul ve významu jaderného ostrova s malým reaktorem, který je vyroben a zkompletován v továrně a kterých je možné postavit v dané lokalitě několik vedle sebe (např. NuScale Power Module™) nebo modul ve významu kompaktního „boxu“, který je kompletně vyroben v továrně a po přivezení do lokality JE ho lze v krátké době uvést do provozu (např. MMR™).

Primárně, díky svému malému výkonu a kompaktní konstrukci zařízení či zvýšené úrovni bezpečnosti s využitím pasivních přístupů, může mít MMR a související infrastruktura rozlohu území elektrárny výrazně menší než u velkých reaktorů. MMR jako takové mohou umožnit, aby se jaderně energetický zdroj s MMR vešel do menší enviromentální obálky než velký reaktor, a tak minimalizoval dopa-

Projekt	Výkon na modul (MW_e)	Počet modulů	Typ	Projektant	Země	Stupeň rozpracovanosti
Jednomodulové tlakovodní MMR (PWR-SMR)						
CAREM	30	1	PWR	CNEA	Argentina	ve výstavbě
SMART	100	1	PWR	KAERI	Korea	certifikovaný projekt
ACP100	125	1	PWR	CNNC	Čína	výstavba začala v roce 2019
SMR-160	160	1	PWR	Holtec International	USA	„conceptual design“
BWRX-300	300	1	BWR	GE Hitachi	USA - Japonsko	zahájení licenčního procesu v USA a Kanadě
CANDU SMR	300	1	PHWR	SNC-Lavalin	Kanada	„conceptual design“
UK SMR	450	1	PWR	Rolls Royce	Velká Británie	„conceptual design“
Vícemodulové tlakovodní MMR (PWR-SMR)						
NuScale	50	4 až 12	PWR	NuScale Power	USA	US NRC design approval received in August 2020
RITM-200	50	2	PWR	OKBM Afrikantov	Rusko	Land-based nuclear power plant – koncepční projekt
Nuward	170	2 až 4	PWR	CEA/EDF/ Naval Group/ TechnicAtome	Francie	„conceptual design“
Mobilní MMR						
ACPR50S	60	1	Floating PWR	CGN	Čína	ve výstavbě
KLT-40S	35	2	Floating PWR	OKBM Afrikantov	Rusko	komerční provoz

Tab. 1: Reprezentativní přehled projektů MMR tlakovodního typu

dy na životní prostředí. Ve srovnání s velkými reaktory MMR také umožňují menší zóny havarijního plánování, a proto mohou být umístěny v blízkosti obydlených center (pokud je malá vyloučená zóna považována za přijatelnou) nebo v blízkosti komunit v izolovaných oblastech v závislosti na jejich využití.

MMR lze využít k více účelům než jen k výrobě elektřiny. Teplo generované z MMR může být využito pro různé průmyslové aplikace, které jsou k dispozici ve stejné lokalitě v závislosti na typu MMR a výstupní teplotě jeho chladiva. Mezi potenciální aplikace v podmínkách ČR patří nasazení MMR jako zdroje tepla pro systémy centralizovaného zásobování teplem (CZT), a dále výroba procesního tepla a výroba vodíku. Pro poskytování procesního tepla jsou vhodnější MMR, které nejsou chlazeny vodou, jako jsou vysokoteplotní plynem chlazené reaktory (HTGR nebo GFR).

2. STAV VÝVOJE MALÝCH MODULÁRNÍCH JADERNÝCH REAKTORŮ VE SVĚTĚ

V současné době je ve světě v různém stupni rozpracovanosti více než 70 projektů malých modulárních reaktorů různých typů a koncepcí. Potenciál světového trhu s MMR k roku 2035 se odhaduje v rozsahu cca 65–85 GW_e. Velká většina projektů se nachází pouze ve fázi „pre-conceptual design [1]“ nebo „conceptual design [2]“. Málo projektů se nachází ve fázi „basic design [3]“ s výhledem na realizaci v blízkém časovém horizontu. V nejpokročilejší fázi vývoje jsou v současné době jaderné elektrárny tlakovodního typu Generace III+ s malými modulárními reaktory o jednotkovém výkonu cca 20–300 MW_e.

V následujících tabulkách 1 a 2 je uveden reprezentativní přehled projektů malých modulárních reaktorových systémů ve světě převážně dle výběru OECD NEA [4].

Projekt	Výkon na modul (MW_e)	Počet modulů	Typ	Projektant	Země	Stupeň rozpracovanosti
GEN IV MMR						
Xe-100	80	1 až 4	HTGR	X-energy LLC	USA	„conceptual design“
ARC-100	100	1	LMFR	Advanced Reactor Concepts LLC	Kanada	„conceptual design“
KP-FHR	140	1	MSR	Kairos Power	USA	„pre-conceptual design“
IMSR	190	1	MSR	Terrestrial Energy	Kanada	„basic design“
HTR-PM	210	2	HTGR	China Huaneng/CNEC/ Tsinghua University	Čína	ve výstavbě
EM2	265	1	GMFR	General Atomics	USA	„conceptual design“
Stable Salt Reactor	300	1	MSR	Moltex Energy	Velká Británie	„pre-conceptual design“
Natrium	345	1	SFR	Terrapower/ GE Hitachi	USA	„conceptual design“
Westinghouse Lead Fast Reactor	450	1	LMFR	Westinghouse	USA	„conceptual design“
Mikro-modulární reaktory						
eVinci	0,2–5	1	Heat pipe reactor	Westinghouse	USA	„basic design“
Aurora	2	1	LMFR	Oklo	USA	žádost o licenci podaná v USA
U-Battery	4	1	HTGR	Urenco and partners	Velká Británie	„basic design“
MMR	5–10	1	HTGR	USNC	USA	„basic design“

Tab. 2: Reprezentativní přehled projektů MMR Generace IV

3. PROJEKTY MMR REALIZOVANÉ NEBO V REALIZACI V SOUČASNÉ DOBĚ

V následujícím odstavci jsou představeny tři projekty MMR, které jsou již v provozu, ve fázi uvádění do provozu nebo ve fázi výstavby.

PROJEKT KLT-40S

Reaktor KLT-40S je tlakovodní reaktor lehkovodního typu, projektovaný pro plovoucí jadernou elektrárnu s tepelným výkonem 150 MW_t a elektrickým výkonem 35 MW_e. Projekt byl vyvinut firmou JSC „Afrikantov OKBM“ z Ruské federace. Plovoucí elektrárna „Akademik Lomonosov“ využívající dva tlakovodní reaktory KLT-40S o celkovém výkonu 300 MW_t (70 MW_e) byla v roce 2019 po moři přepravena do lokality Pevek, kde byla 19. prosince připojena k síti a 22. května 2020 uvedena do komerčního provozu.

PROJEKT HTR-PM

Vysokoteplotní reaktor HTR-PM o výkonu 250 MW_t byl vyvinut firmou CNNC v Číně. Demonstrační elektrárna v lokalitě Shidaowan s dvěma vysokoteplotními reaktory HTR-PM o celkovém výkonu 2 × 250 MW_t (oba reaktory jsou připojeny k jednomu parnímu turbogenerátoru s výkonem 210 MW_e) je v současné době ve fázi spouštění s plánovaným uvedením do provozu tento rok (2021).

PROJEKT CAREM

Reaktor CAREM25 [5] (Central ARgentina de Elementos Modulares) je modulární integrovaný tlakovodní reaktor o výkonu 100 MW_t (34 MW_e brutto). Prototypový (First of a kind) blok o čistém elektrickém výkonu 25 MW_e je v současné ve výstavbě v lokalitě JE Atucha na řece Paraná v Argentině. Projekt byl vyvinut CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica).

Obr. 1: Projekt KLT-40S (zdroj: https://rosatom.ru/en/press-centre/news/heat-from-a-floating-npp-was-first-delivered-to-the-city-heating-network-in-pevek/?sphrase_id=1894211)

4. PROJEKTY MMR VYBRANÉ PRO REALIZACI DO ROKU 2030

V této kapitole je uveden výběr šesti projektů MMR u kterých bylo schváleno financování jejich výstavby a u kterých je reálný předpoklad, že budou uvedeny do provozu před rokem 2030.

PROJEKT NUSCALE

Reaktor NuScale [6] je modulární integrovaný tlakovodní reaktor o výkonu 250 MW_t (77 MW_e brutto). Projekt byl vypracován firmou NuScale Power, LLC v USA. V současnosti probíhá v USA (NRC) proces „design certification" na základě žádosti podané společností NuScale Power, LLC. v prosinci 2016. US NRC v září 2020 vydala schválení standardního projektu (SDA – Standard Design Approval). Výstavbu první komerční 12modulové elektrárny NuScale s výkonem 924 MW_e (netto) připravují společnosti Fluor, NuScale Power a Utah Associated Municipal Power Systems v lokalitě Idaho National Laboratory v USA s plánovaným uvedením do provozu prvního modulu v roce 2029.

PROJEKT ACP100

Reaktor ACP100 je modulární integrovaný tlakovodní reaktor o výkonu 385 MW_t (125 MW_e brutto). Projekt byl vypracován firmou CNNC v Číně. ACP100 se stal prvním projektem SMR, který v roce 2016 prošel posouzením bezpečnosti od Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA) [7]. Zahájení výstavby bylo oznámeno v roce 2019 s přepokládaným „prvním litím betonu" v roce 2021 v lokalitě Changjiang v Číně.

PROJEKT NATRIUM

Reaktor Natrium™ (Natrium™ Reactor and Integrated Energy Storage) je rychlý sodíkem chlazený reaktor (SFR) s tepelným výkonem 1 100 MW_t a elektrickým výkonem 345 MW_e. Projekt byl vyvinut firmami TerraPower a Hitachi v USA. Součástí projektu je úložiště energie, které může v případě požadavku sítě zvýšit výkon systému systému na 500 MW_e po dobu delší než pět a půl hodiny. Projekt byl vybrán v roce 2020 americkým ministerstvem energetiky (US DOE) v rámci programu Advanced

Reactor Demonstration Programme (ARDP) k podpoře realizace demonstračního sodíkem chlazeného reaktoru a energetického systému Natrium™ s jadernou technologií GE Hitachi. Tato státní podpora je určena na vybudování demonstrační elektrárny, která bude spuštěna do sedmi let od doby jejího udělení.

PROJEKT XE-100

Reaktor Xe-100 je vysokoteplotní reaktor s tepelným výkonem 200 MW_t a elektrickým výkonem 82,5 MW_e (brutto). Projekt byl vyvinut firmou X-energy v USA. Také společnost X-energy byla v roce vybrána americkým ministerstvem energetiky (US DOE) v rámci programu Advanced Reactor Demonstration Programme (ARDP) k realizaci projektu reaktoru Xe-100. Podpora je určena na vybudování demonstrační elektrárny, která bude také funkční do sedmi let. X-energy dodá komerční čtyřmodulovou elektrárnu založenou na vysokoteplotním plynem chlazeném reaktoru Xe-100. Zahájení výstavby se předpokládá v roce 2025 konzorciem TRi Energy Partnership (Energy Northwest, Grant County Public Utility District and X-energy) v existující lokalitě Energy Northwest u Richlandu, Washington.

PROJEKT HERMES

Reaktor Hermes Reduced-Scale Test Reactor je demonstrační reaktor chlazený roztavenými solemi s tepelným výkonem 280 MW_t a elektrickým výkonem 140 MW_e. Projekt byl vyvinut firmou Kairos Power v USA. I tento projekt byl vybrán americkým ministerstvem energetiky (US DOE) k podpoře vývoje demonstrační-

Obr. 2: Projekt HTR-PM (zdroj: https://inews.gtimg.com/newsapp_bt/0/12160031411/1000)

Obr. 3: Projekt CAREM (zdroj: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2021/07/21_7_5_carem_cnea_nasa.jpg)

ho roztavenými solemi chlazeného reaktoru Hermes v rámci ARDP. Podpora je určena pro vývoj bezpečné a cenově dostupné technologie reaktorů, které lze licencovat a nasadit v průběhu příštích 10–14 let. Společnosti Kairos Power a Tennessee Valley Authority (TVA) oznámily 6. 5. 2021 záměr realizace tohoto reaktoru v lokalitě East Tennessee Technology Park (ETTP) v Oak Ridge, Tennessee.

MICRO MODULAR REACTOR (MMR™)

Reaktor MMR™ ENERGY je mikro-modulární reaktor (MMR™ ENERGY) s tepelným výkonem 15 MW_t a elektrickým výkonem 5 MW_e. Projekt byl vyvinut společností Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC) v USA. Společnost Global First Power Ltd. (společný podnik USNC a Ontario Power Generation) v listopadu 2020 podepsala dohodu s Canadian Nuclear Laboratories (CNL) o podpoře projektu MMR, který bude umístěn v lokalitě CNL v Chalk River, vlastněné společností Atomic Energy of Canada Limited (AECL) a spravované CNL. Zahájení výstavby je plánováno na rok 2021 a uvedení do provozu na rok 2026.

5. VYBRANÉ PROJEKTY MMR S POTENCIÁLEM NASAZENÍ PO ROKU 2030

PROJEKT SMART

Reaktor SMART (System-integrated Modular Advanced ReacTor) je modulární integrovaný tlakovodní reaktor o výkonu 330 MW_t (100 MW_e brutto), který nabízí na světovém trhu nabízí společnost SMART Power Co., Ltd. (Korea). Projekt v roce 2012 získal od korejského regulátora certifikaci „Standard design approval" (SDA), ale prozatím se nepodařilo najít investora pro realizaci. Intenzivní jednání byla vedena se Spojenými arabskými emiráty, ale zatím bez konkrétního výstupu.

PROJEKT BWRX-300

Reaktor BWRX-300 [8] je modulární varný reaktor o výkonu 300 MW_e. Projekt byl vypracován společností GE Hitachi Nuclear Energy [9] v USA a je odvozen od velkého reaktoru ESBWR (Economic Simplified Boiling-Water Reactor), který projektovou certifikaci od US NRC obdržel již v roce 2014. V současnosti byl zahájen licenční proces tohoto reaktoru jak v USA [10], tak v Kanadě (pre-licensing vendor design review) [11].

PROJEKT NUWARD

Reaktor NUWARD je tlakovodní reaktor s tepelným výkonem 500 MW_t a elektrickým výkonem 170 MW_e. Jaderné zařízení s reaktorem NUWARD lze zařadit do generace III+ tlakovodních (PWR) systémů. Zařízení, tj. jaderná elektrárna, je projektováno s elektrickým výkonem 340 MW_e se dvěma nezávislými reaktory po 170 MW_e, které umožňují flexibilní provoz. Projekt vyvíjí konzorcium CEA, EDF, Naval Group and TechnicAtome.

PROJEKT U-BATTERY

Reaktor U-Battery Single Power Unit vysokoteplotní mikro-modulární reaktor chlazený plynem (He) s tepelným výkonem 10 MW_t a elektrickým výkonem 4 MW_e. Reaktor je schopen dodávat procesní teplo o teplotě 750 °C. Projekt vyvíjí firma U-Battery Limited ve Velké Británii.

6. ZÁVĚR

Z uvedeného přehledu MMR vyvíjených ve světě je zřejmé, že první jaderné elektrárny s MMR lehkovodního typu nebo s reaktory IV. generace budou nasazeny do provozu před rokem 2030 a budou nabízeny k exportu po roce 2030. Nicméně je zřejmé, že další pokrok ve vývoji a praktickém nasazení MMR ve světě bude vyžadovat rozsáhlejší mezinárodní spolupráci a státní podporu pro vybudování globálního robustního trhu s MMR. To je zásadní příležitost pro zapojení českého energetického průmyslu. Ekonomický potenciál globálního trhu s MMR k roku 2040 je odhadován až na 100 mld. EUR ročně.

V současné době se problematikou nasazení MMR v ČR zabývá ÚJV Řež, a. s. v projektu TK03010119 „Uplatnitelnost malých a středních jaderných reaktorů v energetice ČR" řešeném v rámci programu TA ČR THÉTA a to ze všech relevantních pohledů jako je posouzení možnosti nasaditelnosti malých a středních jaderných reaktorů v ČR pro výrobu elektřiny a tepla z technicko-ekonomických a legislativních hledisek, analýza regulatorního a povolovacího rámce ČR a širších ekonomických souvislostí (např. zapojení energetického průmyslů v ČR do dodavatelských řetězců) a vypracování doporučení pro nastavení regulačního rámce pro efektivní rozvoj malých a středních reaktorů v ČR.

Článek se nezabývá projekty MMR Generace IV, které se vyvíjejí v rámci ČR (Energy Well, ALLEGRO, HeFASTo) a které jsou pojednány v samostatném článku.

Reference:

(1) Pre-conceptual design stanoví úvodní/předběžnou koncepci technického řešení projektu
(2) Conceptual design (koncepční projekt) stanoví základní koncepci technického řešení projektu v členění na funkční technologické celky
(3) Basic Design definuje základní technickou koncepci projektu, rozsah dodávky ve vazbě na konkrétní podmínky projektu a technické a kvalitativní požadavky na zařízení
(4) SMALL MODULAR REACTORS: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES, NEA No. 7560, © OECD 2021
(5) https://world-nuclear-news.org/Articles/Argentinean-projects-to-resume-after-hiatus
(6) https://www.nuscalepower.com/technology/technology-overview
(7) https://www.neimagazine.com/news/newscnnc-launches-smr-project-7326353
(8) https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/bwrx-300
(9) https://www.youtube.com/watch?v=H3UvxEJG308
(10) https://www.ge.com/news/press-releases/ge-hitachi-nuclear-energy-begins-nrc-licensing-process-bwrx-300-small-modular
(11) https://www.ge.com/news/press-releases/ge-hitachi-initiates-vendor-design-review-its-bwrx-300-small-modular-reactor

Ing. Lubor Žežula

lubor.zezula@ujv.cz

Je absolventem ČVUT v Praze – Fakulty strojního inženýrství (1982), specializace jaderné energetické stroje a zařízení. Od roku 1982 pracuje na různých pozicích v ÚJV Řež, a. s. V letech 2007–2016 působil jako zástupce ČEZ, a. s. v Administration Group sdružení European Utility Requirements (EUR), v letech 2007–2016 byl členem expertní skupiny Working Party on Nuclear Energy Economics (WPNE) OECD Nuclear Energy Agency (NEA) v Paříži. Od roku 2017 je členem Management Board for the Development, Application and Validation of Nuclear Data and Codes (MBDAV) OECD NEA a členem expertní skupiny IEA/NEA Projected Costs of Electricity Generation OECD NEA. Od roku 2008 je členem Technical Working Group on Advanced Technologies for LWRs (TWG-LWR) Mezinárodní agentury pro atomovou energii ve Vídni. Od roku 2010 zastává také pozici ředitele Technologické platformy „Udržitelná energetika ČR".

Vysokoteplotné reaktory a vodík vo svetle svetových trendov

Ing. Branislav Hatala, PhD.[1], Ing. Andrej Hanzel [1]
prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc.[2]

[1] VUJE, a.s., Trnava

[2] Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva FEI STU, Bratislava

Článok sa zaoberá novými požiadavkami na výrobu vodíka a možnosťami efektívnej, trvalo udržateľnej a spoľahlivej výroby vodíka.

The article deals with new requirements for hydrogen production and the possibilities of efficient, sustainable and reliable hydrogen production.

VODÍK A EURÓPSKA KOMISIA

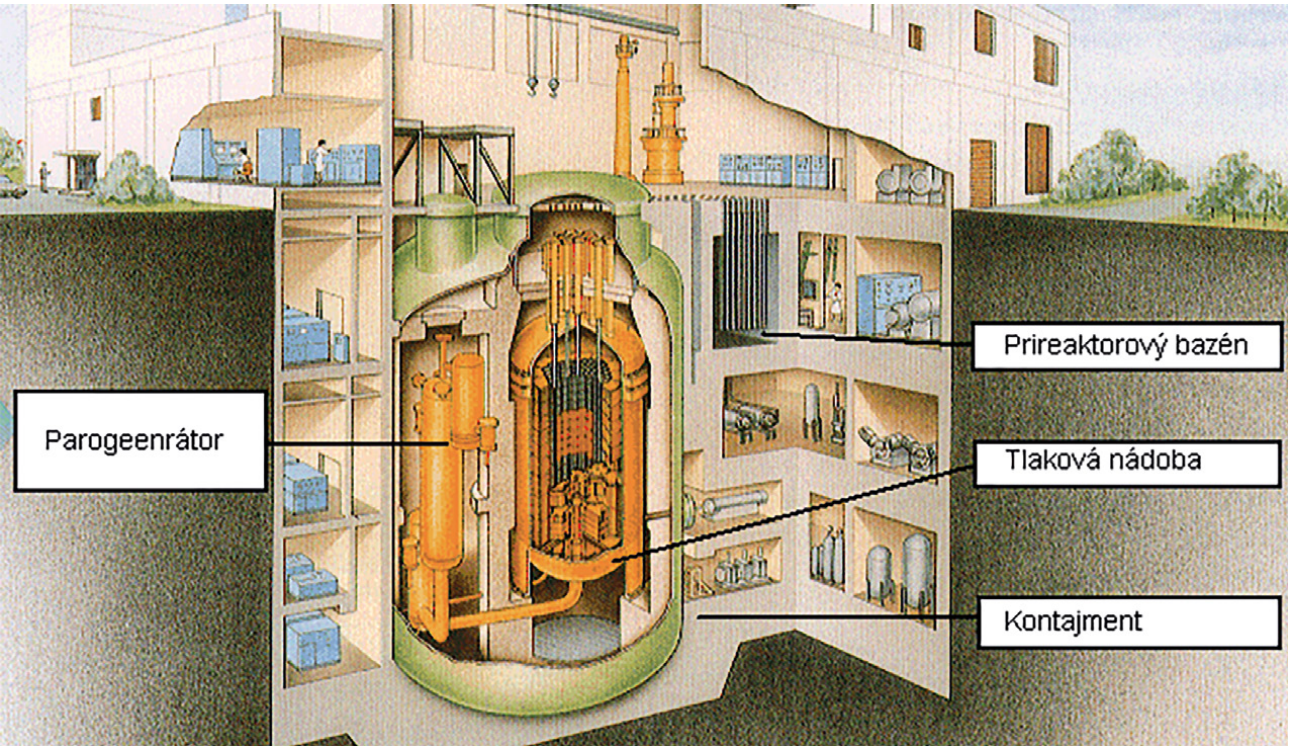
Myšlienku širokého využitia vodíka v priemysle, doprave, resp. ako média na zmysluplné skladovanie energie je možné len privítať, avšak v reálnych technických súvislostiach. Vodík je najčastejšie sa vyskytujúci prvok na zemeguli. Pre energetické využitie sa javí ako veľmi výhodný, má veľmi vysokú výhrevnosť, najvyššiu zo všetkých organických zlúčenín 141,7 MJ/kg, čo je šesťkrát viac ako zemný plyn. Jeho veľkou nevýhodou je, že sa v prírode samostatne nevyskytuje a musí sa vyrábať. Dnes sa vodík väčšinou vyrába zo zemného plynu, čo je však ekologicky neprijateľné. Pri takejto výrobe vzniká CO_2 aj metán. Ekologická budúcnosť vodíka môže byť zabezpečená udržateľným spôsobom len v prípade jeho výroby:

- elektrolýzou z obnoviteľných zdrojov,
- v jadrových reaktoroch.

Európska zelená dohoda je plánom na zabezpečenie udržateľnosti hospodárstva EÚ, ktorý do roku 2050 predpokladá klimatickú neutralitu. Podľa Európskej zelenej dohody bude od roku 2020 do roku 2024 v EÚ podporená inštalácia elektrolyzérov pre výrobu obnoviteľného vodíka s minimálnym výkonom 6 GW a podporená tak výroba až jedného milióna ton vodíka ročne z obnoviteľných zdrojov. Pre výrobu jedného milióna ton vodíka je potrebných približne 60 TWh elektrickej energie ročne.

Výroba takého objemu vodíka teda vyžaduje veľkého množstva elektrickej energie. Pre lepšiu predstavu, obidva bloky v JE Jaslovské Bohunice vyrobia v priemere 7,5 TWh za rok. Nové typy JE (napr. AP1000) vyrobia ročne približne 9 TWh elektrickej energie. Ak teda chce EÚ zabezpečiť výrobu jedného milióna ton vodíka prostredníctvom elektrickej energie, je potrebné vybudovať aspoň 7 nových jadrových elektrární s elektrickým výkonom 1 200 MW_e. Uvádzame len počet jadrových elektrární, pretože jadrová elektráreň je zdroj, ktorý vie vyrobiť energiu na relatívne malej ploche v porovnaní s fotovoltikou a zabezpečuje spoľahlivú dodávku elektrickej energie počas celého roka, bez ohľadu na vplyv počasia. Na porovnanie, Slovenské elektrárne majú približne 1 MW inštalovaného výkonu fotovoltických elektrární na pozemku vo Vojanoch s rozlohou takmer 3 ha, kde koeficient využitia je cca 12 %. Vyrobiť 60 TWh elektrickej energie ročne prostredníctvom fotovoltiky by teda zabralo viac ako milión hektárov plochy.

Obr. 1: Rez japonským HTTR reaktorom [4]



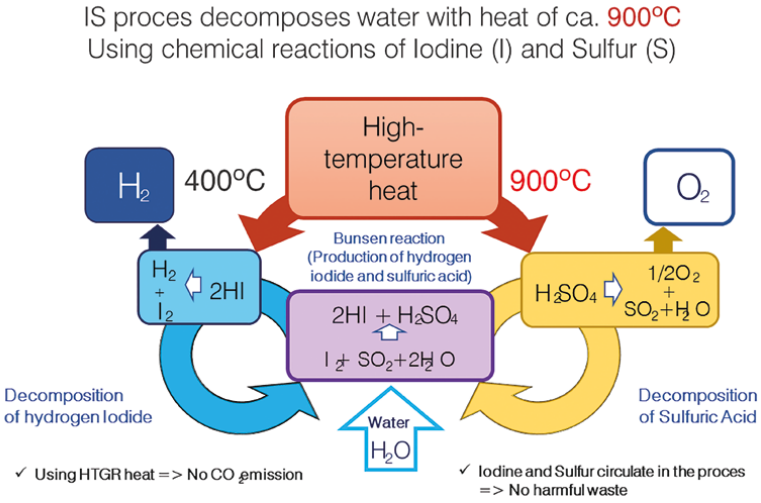
Európska zelená dohoda politicky stanovila ambiciózne ciele extrémne vysoko, chýba však analýza ako stanovené ciele v nasledovnom období do roku 2024 dosiahnuť.

Európske výskumné centrum Joint Research Centre (JRC) v Ispre už v roku 1969 študovalo možnosti výroby a použitia vodíka, na čo nadväzoval kompletný výskumný program. Pri uvážení všetkých fyzikálnych a chemických zákonov, vedci a inžinieri po mnohých analýzach, testoch a demonštráciách dospeli k záveru, že nízka účinnosť a vysoké ekonomické náklady limitujú priestor pre priemyselné využitie vodíka ako nosiča energie.

Prípad Nemecka, kde sú vo veľkej miere rozmiestnené nestabilné obnoviteľné zdroje energie, poukazuje na výrazné obmedzenia, ktoré s rozmiestnením súvisia. Stratégia Energiewende, ktorá je nákladná (25 miliárd € dotácií ročne na obdobie 20 rokov, čo zodpovedá približne 1 000 € na rodinu ročne), má z hľadiska dekarbonizácie prakticky nulový dopad, veterná energia a solárne panely vyrábajú iba 4,3 % primárnej energie. Výsledkom rozsiahleho nasadenia týchto technológií je buď nadmerná alebo nedostatočná výroba elektrickej energie v porovnaní s dopytom. V prípade nedostatku, ku ktorému dochádza po väčšinu času, sa Nemecko, pri jeho postupnom vyraďovaní jadrovej energie, spolieha na fosílne palivá, hnedé alebo čierne uhlie, alebo dovážaný ruský plyn, čo vysvetľuje nízky dopad stratégie na dekarbonizáciu. V ideálnom prípade by bolo potrebné pri nadmernej výrobe zabezpečiť prostriedky na masívne ukladanie „zelenej" obnoviteľnej elektriny na jej neskoršie použite. Ale na uskladnenie elektriny vyrobenej z veternej energie a solárnych panelov počas obmedzenej doby, kedy pracujú, existuje iba zopár spôsobov: batérie, vodné prečerpávacie elektrárne, alebo použitie vloženého nosiča energie, ako je vodík.

Oveľa väčší zmysel má preto využívanie jadrovej energie, jedinej plne dekarbonizovanej primárnej energie, kde sú jadrové elektrárne schopné masívne vyrábať distribuovateľnú elektrinu a optimalizovať tak prerušované nasadenie obnoviteľných zdrojov.

Na Slovensku bola vypracovaná a v marci 2021 Vládou SR aj schválená „Národná vodíková stratégia" s podnadpisom „Pripravení na budúcnosť". Tento materiál predpokladá, že výroba vodíka bude zabezpečovaná elektro-



Obr. 2: Princíp jódovodíkového kyselino-sírneho cyklu

lýzou v nasledovných množstvách. Do roku 2030 sa predpokladá ročná spotreba 178 kt a do roku 2050 až 400–1 740 kt vodíka ročne.

Účinnosť elektrolýzy sa uvádza v rôznych materiáloch od 60–80 %. Ďalšia potreba energie na distribúciu a prípadnú kompresiu znižuje celkovú účinnosť výroby vodíka na hodnotu 30–40 %. Ak sa bude vodík následne používať na jednoduché spaľovanie, bude to cenovo neefektívne. Dnešné využívanie vodíka v palivových článkoch jeho energiu ďalej degraduje. Vodík sa v palivových článkoch využije len na 50 % na reálnu prácu, ostatých 50 % predstavujú tepelné straty.

Národná vodíková stratégia predpokladá výrobu vodíka z OZE. Z tohto materiálu však priamo aj nepriamo vyplýva, že OZE nie sú vhodné na žiadnu samostatnú výrobu elektrickej energie. Problém je v tom, že výroba elektriny pomocou veternej energie alebo slnečných panelov má ročné využitie maxima (load factor) iba 11–20 %. Navyše, kvôli neustálemu prerušovaniu vetra a slnečného žiarenia by potrebná elektrolýza musela tiež pracovať prerušovane a to by do ekonomiky vnieslo ďalšie problémy.

VÝROBA VODÍKA VO VYSOKOTEPLOTNÝCH JADROVÝCH REAKTOROCH

V súčasnosti je verejnosti známa predovšetkým výroba vodíka prostredníctvom elektrolyzérov. Elektrolýzou je možné vyrábať vodík buď z vody, alebo efektívnejšie, z vodnej pary pri vysokých teplotách, kde ide o vysokoteplotnú elektrolýzu. S rastúcou teplotou potrebujeme oveľa menej elektrickej energie pre napájanie elektrolyzérov.

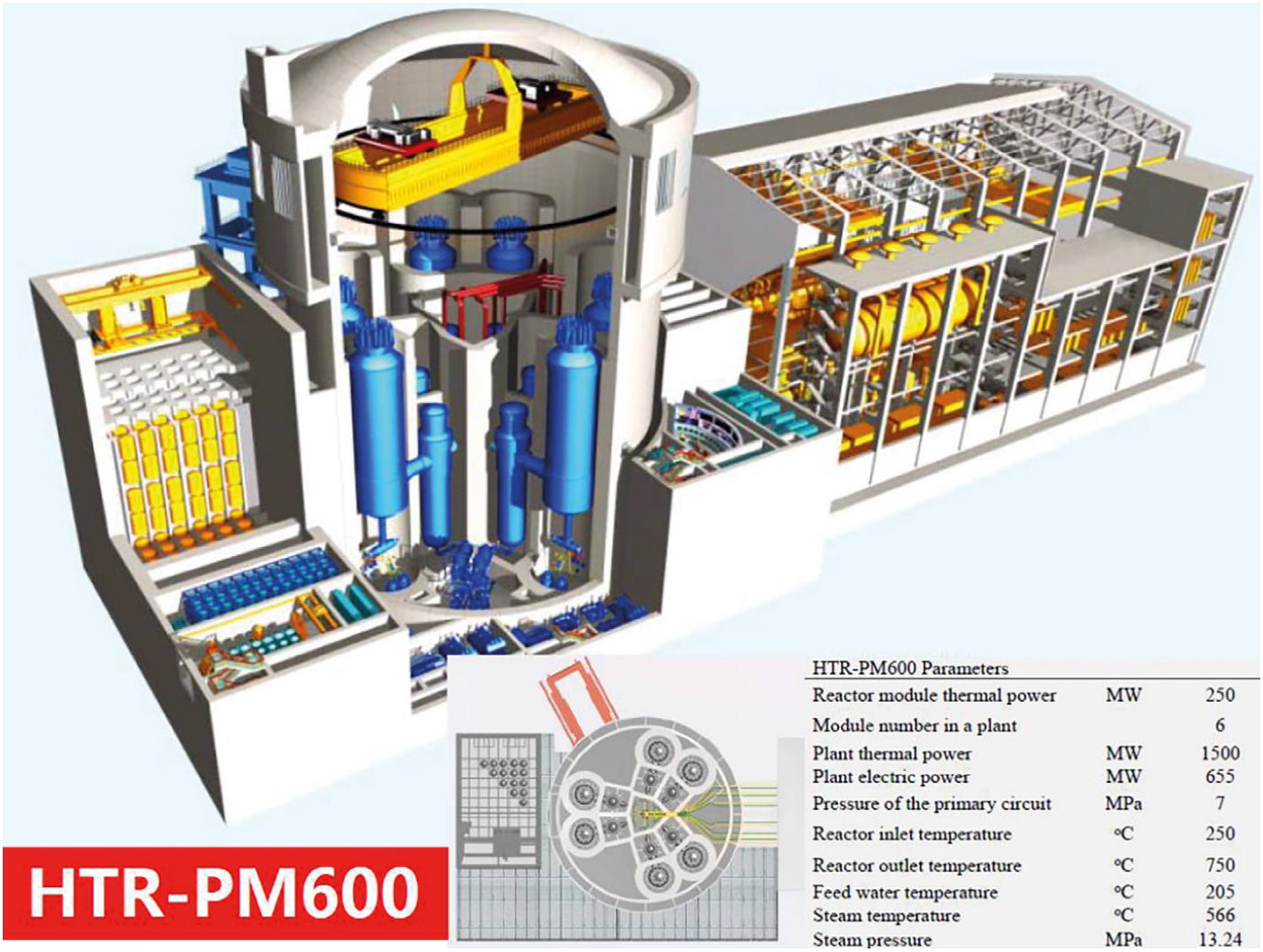
Pre pripomenutie, účinnosť výroby elektrickej energie v tepelných elektrárňach je približne 35 %. Následne takto vyrobenú elektrickú energiu použijeme na výrobu vodíka v elektrolyzéroch z vody, kde účinnosť výroby vodíka je cca 60 %. Na výrobu 1 kg vodíka elektrolýzou je potrebných 9 litrov vody a 60 kWh elektrickej energie.

Elektromobil potrebuje na 100 km približne 20 kWh elektrickej energie a automobil využívajúci vodík potrebuje 1 kg vodíka a teda cca 60 kWh elektrickej energie.

Otázka znie: Oplatí sa nám vyvíjať vodíkové autá, keď elektrická energia je vysoko kvalitná a exkluzívna forma energie? Má význam vyvíjať vodíkové technológie? Má toto riešenie logické opodstatnenie, keď 1 km vo vodíkovom aute je trikrát drahší ako v aute poháňanom baterkami? Alebo... vieme vyrobiť vodík aj iným spôsobom a zároveň efektívne? Áno, vieme.

Vo svete sú aj iné technológie ako vyrobiť vodík z vody. Riešením sú vysokoteplotné jadrové reaktory. Žiaľ, spojenie jadrového reaktora a výroby vodíka je v Európskej únii nepochopené a teda zatiaľ aj neakceptovateľné, hoci výsledky analýzy Európskeho výskumného centra JRC neuvádzajú žiadne vedecky podložené dôkazy o tom, že jadrová energia škodí viac ľudskému zdraviu alebo životnému prostrediu ako iné technológie na výrobu elektriny.

Vysoká výstupná teplota z aktívnej zóny vysokoteplotného reaktora umožňuje efektívne vyrábať vodík prostredníctvom známych technológií vysokoteplotnej elektrolýzy. Ďalší spôsob výroby vodíka je termochemickou cestou tzv. jódovodíkovým kyselino-sírnym cyklom (IS cyklus), ktorý je taktiež používaný na produkciu vodíka s účinnosťou celého výrobného cyklu v rozmedzí 40–50 %. V po-



Obr. 3: Znázornenie HTR-PM reaktora [2]

rovnaní s elektrolýzou má vyššiu účinnosť, pretože vyrobené teplo nie je nutné meniť na elektrickú energiu so značnými stratami. Vysokoteplotný reaktor umožňuje kombinovanú výrobu vodíka a elektrickej energie, kde účinnosť veľkého cyklu značne rastie.

Uvedený spôsob výroby vodíka je prakticky overený v Japonsku vo výskumnom ústave Japan Atomic Energy Agency (JAEA) v Oarai, kde je prevádzkovaný reaktor HTTR. Výkon reaktora je 30 MW_t a demonštruje efektívnu výrobu vodíka pri teplote 850 °C. Túto teplotu sa darí dosahovať vďaka využitiu hélia ako primárneho chladiva aktívnej zóny [4].

V areáli Inštitútu technológie jadrovej energetiky Univerzity Tsinghua v Číne bol predne-

dávnom sprevádzkovaný nový typ vysokoteplotného reaktora HTR-PM, kde chladiacim médiom je tiež hélium, ktoré teda umožňuje dosahovať extrémne vysoké teploty [5].

Výstavba testovacej elektrárne v čínskej provincii Shandong sa začala v roku 2012. Projekt tvoria dva héliom chladené modulárne reaktory HTR-PM s tepelným výkonom 250 MW_t a turbína s 210 MW_e generátorom [2].

Aktívna zóna tohto reaktora je veľmi špecifická a je tvorená palivom guľového tvaru s časticami TRISO. V klasických ľahkovodných reaktoroch je palivo uložené v palivových prútikoch. V tomto type reaktora je palivo guľového tvaru priemeru 6 cm a pozostáva z množstva malých častí obalených grafitom

a kremíkom. Čína má samozrejme zvládnutú aj technológiu výroby tohto špecifického typu paliva.

Aktívna zóna reaktora má priemer 3 m a výšku 11 m, pričom nádoba reaktora má priemer 5,7 m a výšku 25 m. Každý reaktor má tri slučky. Aktívna zóna reaktora je konštruovaná s negatívnym teplotným koeficientom reaktivity, s cieľom zvýšenia bezpečnosti.

V EÚ by mohol byť reprezentantom vysokoteplotnej technológie prototyp reaktora ALLEGRO, jeden zo šiestich typov reaktorov IV. generácie. Héliom chladený rýchly reaktor ALLEGRO predstavuje unikátnu kombináciu technológií. Ide o reaktor s rýchlym spektrom neutrónov, ktorý umožňuje vyrobiť vysokoparametrické teplo s možnosťou rôznych aplikácií, akými sú výroba vodíka, dodávka tepla pre energeticky náročné chemické technológie, alebo výroba elektrickej energie s vysokou účinnosťou. Výstupná teplota z aktívnej zóny reaktora môže byť až 850 °C. Reaktor ALLEGRO je v súčasnosti predmetom výskumu a vývoja zoskupenia krajín Francúzsko, Slovensko, Česko, Maďarsko a Poľsko. Otázka výstavby tohto typu reaktora v Európe je na rozdiel od čínskeho reaktora stále otvorená.

Výhodou jadrových technológií je trvalo udržateľná a spoľahlivá výroba a tiež veľmi dlhá životnosť jadrových reaktorov. Reaktory, ktoré sú v súčasnosti vo výstavbe majú plánovanú životnosť 60 rokov s možnosťou predĺženia až na takmer 80 rokov.

Ak aj Európska únia túži po vodíkových technológiách, môžeme s plnou vážnosťou konštatovať, že technológie na výrobu vodíka v EÚ nie sú ani zďaleka konkurencieschopné v porovnaním s ostatným svetom. Aj autá poháňané vodíkom ponúkajú predovšetkým zatiaľ len výrobcovia mimo EÚ (Honda FXC Clarity, Toyota Mirai, Hyundai Nexo).

ZÁVER

Je nespochybniteľné, že dopyt po vodíku, využiteľnom v doprave a aj v ťažkom chemickom priemysle, bude na celom svete neustále narastať.

Dnes je priemyselná výroba vodíka takmer úplne založená na fosílnych palivách. Množstvo energie potrebnej na rozklad vody, pre takéto aplikácie, je možné zabezpečiť priamym teplom vyrobeným v plne dekarbonizovaných vysokoteplotných jadrových reaktoroch. Výskum a demonštrácia takýchto reaktorov prebieha v Číne, Japonsku a USA.

Ak sa chce Európska komisia, ale aj vláda SR, vyhnúť geopolitickému vytesneniu inými regiónmi, kde je takýto vývoj na dennom poriadku, mala by sa tejto téme dôkladne venovať, ale predovšetkým do tejto technológie zmysluplne investovať. Ak je skutočný záujem vyrábať vodík v uvedenom množstve, bez jadrových elektrární to nebude technicky možné.

Ing. Branislav Hatala, PhD.

branislav.hatala@vuje.sk

V roku 1995 vyštudoval elektrotechnické a silnoprúdové inžinierstvo na Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave. V roku 2008 dosiahol titul PhD. v jadrovej energetike. V spoločnosti VUJE, a.s. pracuje od roku 1995, v súčasnosti je riaditeľom Divízie jadrovej bezpečnosti, výskumu a vývoja, kde je v rámci významných bezpečnostných projektov zodpovedný najmä za súbor bezpečnostných analýz určených pre vypracovanie licenčnej dokumentácie. Svoje skúsenosti uplatňuje pri zostavovaní koncepčných návrhov projektov, vedení tímu pri vypracovaní bezpečnostných termo-hydraulických analýz, a tiež v rámci výskumných projektov venovaných termo-mechanickým vlastnostiam jadrového paliva. Bol zodpovedný za riadenie viacerých veľkých projektov pre slovenské jadrové elektrárne, bol členom riešiteľských tímov niekoľkých európskych výskumných projektov. Viac ako desať rokov sa angažuje v medzinárodnom jadrovom výskume a je európskym zástupcom Medzinárodného fóra pre výskum reaktorov IV. generácie (GIF).

Výzkumný program technologie GFR v ÚJV Řež, a. s.

Ing. Petr Vácha, Ing. Roman Koryčanský, Ing. Petr Hájek, CSc., Mgr. Jan Klouzal, RNDr. Václav Tyrpekl, Ph.D., Jan Pokorný, Ing. Martin Kratochvíl
ÚJV Řež, a. s.

ÚJV Řež, a. s. se již více než 10 let zabývá vývojem technologie rychlého plynem chlazeného reaktoru (GFR). Za tuto dobu se v této oblasti vypracovala mezi evropskou špičku, což dokládá množství dokončených i probíhajících národních a mezinárodních projektů, ve kterých zastává klíčovou roli, stejně jako účast expertů ÚJV Řež v mnoha projektech a výborech prestižních mezinárodních organizací. Dosavadním vrcholem výzkumného a vývojového programu GFR v rámci společnosti je představení vlastního konceptu pokročilého modulárního reaktoru s názvem HeFASTo v roce 2021.

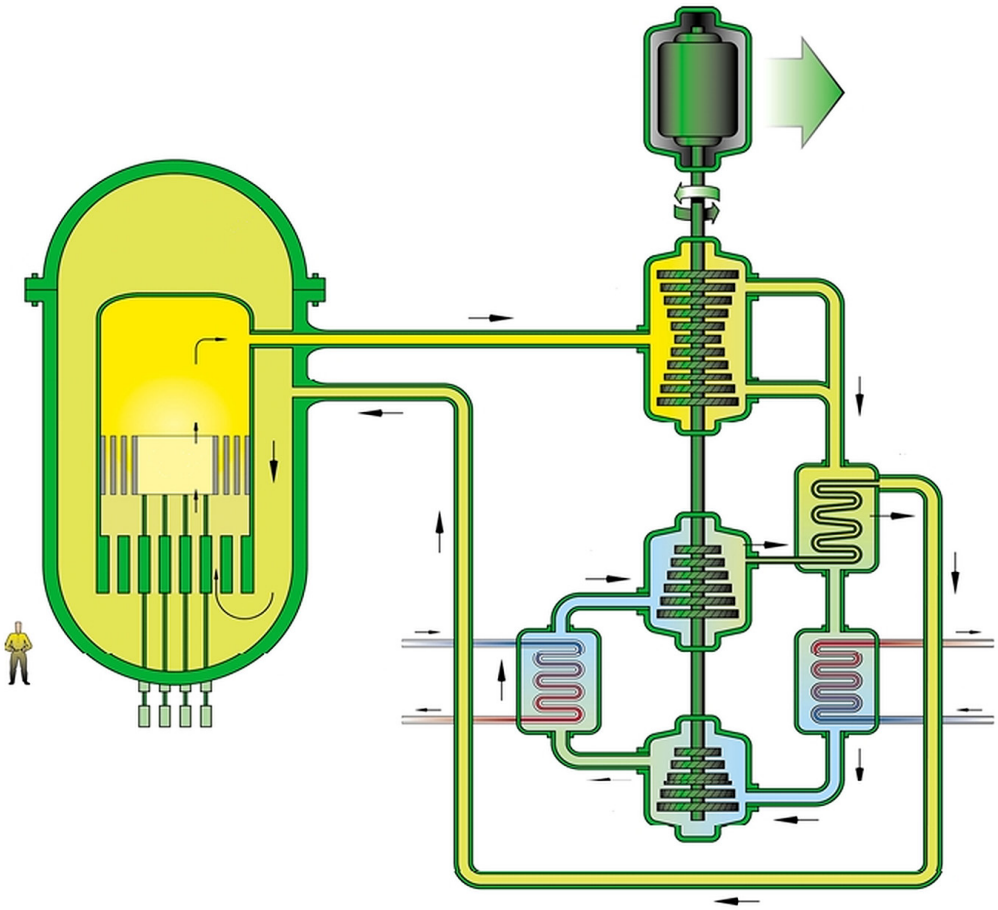
ÚJV Řež has a tradition of more than 10 years in research and development of the Gas-cooled Fast Reactor (GFR) technology. During this period, it has gradually become one of the leading European organizations in this field, which is demonstrated by a number of successfully finished or ongoing national and international projects, in which ÚJV Řež plays a key role, as well as by involvement of ÚJV Řež experts in various projects and bodies of prestigious global organizations. The pinnacle of the GFR R&D program in ÚJV Řež so far is the official start of work on an own concept of advanced modular reactor named HeFASTo in 2021.

ÚVOD

Jaderná energie je v současné době stále jediným stabilně produkujícím nízkoemisním zdrojem energie, který lidstvo dokáže využívat [1]. Kvůli rostoucí poptávce po ekologických zdrojích elektřiny a tepla se v příštích dekádách buď podaří vyřešit problematiku efektivního vysokokapacitního ukládání energie z obnovitelných zdrojů, nebo přijde nová vlna rozvoje jaderné energetiky, s níž bude neodvratně svázána i otázka množství dostupných světových zásob uranu [2]. Nedělitelnou součástí této problematiky je i produkce vyhořelého jaderného paliva v reaktorech s otevřeným palivovým cyklem. Jakkoliv nyní dominují jaderné energetice velké lehkovodní reaktory s otevřeným palivovým cyklem, vývoj odolnějších materiálů a inovativních výrobních postupů umožnuje oživit myšlenku použití rychlých reaktorů pro úplné uzavření palivového cyklu, nebo alespoň pro dlouhodobý provoz aktivních zón s poměrem spotřebovaného ku vytvořenému štěpitelnému materiálu blízkému jedné.

Jednou z technologií těchto reaktorů, které do budoucna slibují přinést udržitelný, inherentně bezpečný a nízkoemisní zdroj energie, je koncept rychlého reaktoru chlazeného plynem (GFR – Gas-cooled Fast Reactor) [3]. Ten kombinuje výhody jaderných reaktorů s rychlým spektrem neutronů s vysokou výstupní teplotou chladiva známou z technologie (V)HTR (Very High-Temperature gas-cooled Reactor). Nezanedbatelnou výhodou je na poměry rychlých reaktorů bezpečné a predikovatelné neutronické chování aktivní zóny.

Krom výše uvedených nesporných výhod se GFR vyznačuje i několika ne zcela příznivými vlastnostmi. Pravděpodobně nejvýznamnější z nich je efektivita plynu jako chladiva primárního okruhu, která je znatelně nižší než v případě vody, roztavených kovů či solí. Zároveň aktivní zóna GFR nemá jako celek tak vysokou tepelnou kapacitu jako v případě HTR, kde většinu masy tvoří moderátor ve formě grafitu. Důsledkem je nutnost zajistit neustá-



Obr. 1: Schéma technologie GFR [3]

lý průtok chladiva skrz aktivní zónu, a to i ve všech potenciálních havarijních scénářích. Další oblastí představující výzvu při projektování GFR jsou extrémní nároky na použité materiály, především co se týče teplotní a radiační odolnosti.

HISTORIE GFR

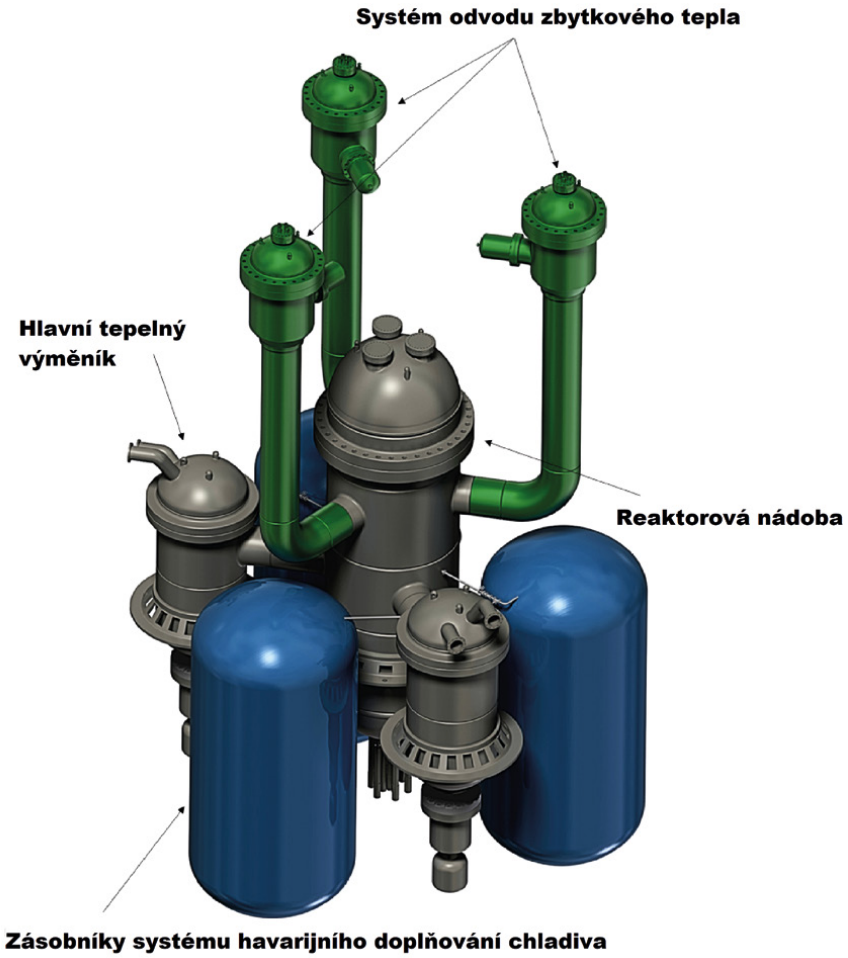
Zatímco rychlých jaderných reaktorů bylo či stále je ve světě provozováno již více než 20, a plynem chlazené reaktory dodnes tvoří páteř energetické soustavy ve Velké Británii, kombinace obou těchto technologií v podobě GFR nikdy realizována nebyla. Přesto má za sebou bohatou historii výzkumných a vývojových projektů, sahající až do konce 60. let 20. století. Vývoj probíhal v Evropě, SSSR, USA i Japonsku [4] [5]. Limitujícím faktorem však zůstávaly dostupné materiály a technologie, a s rozvojem sodíkem chlazených rychlých reaktorů vývoj GFR postupně ustal úplně.

Obnoven byl až v 21. století. V roce 2001 zvolila prestižní mezinárodní organizace Generation IV International Forum (GIF) GFR jako jednu z šesti nejperspektivnějších tzv. GEN IV technologií budoucnosti. Znovu se tak rozběhl výzkum a vývoj, a to především v Evropě, USA a Japonsku.

ALLEGRO

Od roku 2002 byl v návaznosti na to v Evropě pod vedením francouzské CEA zahájen vývoj demonstrační jednotky GFR, která by umožnila prokázat životaschopnost celé technologie, ověřit její bezpečnost a spolehlivost, a sloužit i jako reaktor pro kvalifikaci materiálů, technologií a systémů v reprezentativních podmínkách, s konečným cílem připravit technologii GFR pro komerční aplikace.

Reaktor byl původně vyvíjen s názvem ETDR – Experimental Technical Demonstration Reactor, a výkonem 50 MW_t [6]. V ALLEGRO se projekt proměnil v roce 2008, uvažovaný výkon byl zvýšen na 75 MW_t [7]. CEA byla vedoucí organizací programu do roku 2010, poté postupně převzala zodpovědnost za do-



Obr. 2: Primární okruh reaktoru ALLEGRO

končení projektu ALLEGRO organizace V4G4 Centre of Excellence, složená z šesti organizací z pěti evropských zemí (ČR, Francie, Maďarsko, Polsko, Slovensko). ÚJV Řež je jedním ze zakládajících členů, přidruženým členem se následně stalo Centrum výzkumu Řež (CVŘ) poskytující zejména díky projektu SUSEN experimentální infrastrukturu.

VÝZKUM A VÝVOJ GFR V ÚJV ŘEŽ

Výzkum a vývoj technologie GFR v ÚJV Řež začal v roce 2010 v rámci interních rozvojových projektů. Po založení V4G4 CoE se úspěšně zapojila do prací na konceptu ALLEGRO v rámci této organizace, následovalo zapojení se do několika národních i mezinárodních výzkumných projektů a spolupráce s CVŘ na definici cílů a uskutečnění unikátního experimentálního programu. Tyto aktivity nabraly na dynamice v roce 2018 spolu s vyhlášením programu Technologické agentury ČR (TA ČR) THÉTA, jehož jedním z prioritních cílů je i výzkum GEN IV reaktorů. V současné době je ÚJV Řež různým způsobem zapojeno do sedmi národních a tří mezinárodních vývojových projektů týkajících se GFR, navíc významnou část z těchto aktivit vede.

PRIORITY VÝZKUMU A VÝVOJE GFR

Největší pozornost při výzkumu a vývoji reaktorů GFR musí být nutně věnována těm oblastem, které jsou pro ně unikátní, a není tak možné ani částečně převzít již existující a ověřená řešení. S VHTR má GFR společné chladivo (He o stejné cílové výstupní teplotě i tlaku), proto je možné využít v HTR vyzkoušená řešení pro normální provoz, jako jsou těsnění, armatury a dmychadla.

V případě havarijních podmínek je ale chování obou systémů odlišné. HTR spoléhá na odvod tepla vedením a radiací do z vnějšku chlazené masy moderátoru, ale pro kompaktní zónu GFR je nutné dodat systémy udržení tlaku a cirkulace chladicího plynu. Návrh tohoto řešení tak, aby neomezoval ekonomiku

provozu GFR, ale přitom poskytoval požadovanou bezpečnost, je jedním z hlavních cílů aktivit ÚJV Řež.

Neutronický návrh aktivní zóny GFR je oproti sodíkem chlazeným rychlým reaktorům výrazně usnadněn absencí fázových přechodů v chladivu. Na druhou stranu kombinace vysokých teplot, tlaku a radiačního poškození klade vysoké nároky na materiály paliva a aktivní zóny. Zde byl vývoj dlouho zakonzervovaný a demonstrátor ALLEGRO počítal s aktivní zónou z paliva stejného, jaké bylo použito v prvních rychlých reaktorech v 70. letech. Nicméně po havárii JE Fukušima se ukázalo, že i tento vývoj může být akcelerována díky celosvětovému úsilí vyvinout materiály aktivní zóny odolné havarijním podmínkám (ATF – Accident Tolerant Fuels), z kterého těží i GFR, zejména díky pokroku ve výrobě kompozitů ze SiC.

SPOLUPRÁCE V RÁMCI ČR

ÚJV Řež spolupracuje v rámci výzkumných a vývojových aktivit GFR s více než 15 tuzemskými univerzitami, akademickými institucemi, i soukromými společnostmi a výrobními podniky. V posledních letech tak v rámci běžících projektů vznikla široká základna pokrývající většinu z priorit vývoje GFR, od vývoje a testování nových materiálů a komponent, přes vývoj bezpečnostních i provozních systémů reaktoru, až po výpočtové a experimentální studie termohydrauliky a jaderné bezpečnosti konceptu GFR.

V rámci Skupiny ÚJV probíhá v oblasti výzkumu a vývoje technologií GEN IV dlouhodobá spolupráce s jednou z dceřiných společností – Centrem výzkumu Řež. To disponuje rozsáhlým know-how v mnoha oblastech výzkumu GFR, stejně jako nejmodernějším experimentálním vybavením, k němuž patří i elektricky vyhřívaný mock-up GFR s názvem S-ALLEGRO, který je provozován v Plzni a slouží k výzkumu termohydrauliky i k testování komponent a systémů GFR v prototypických podmínkách.

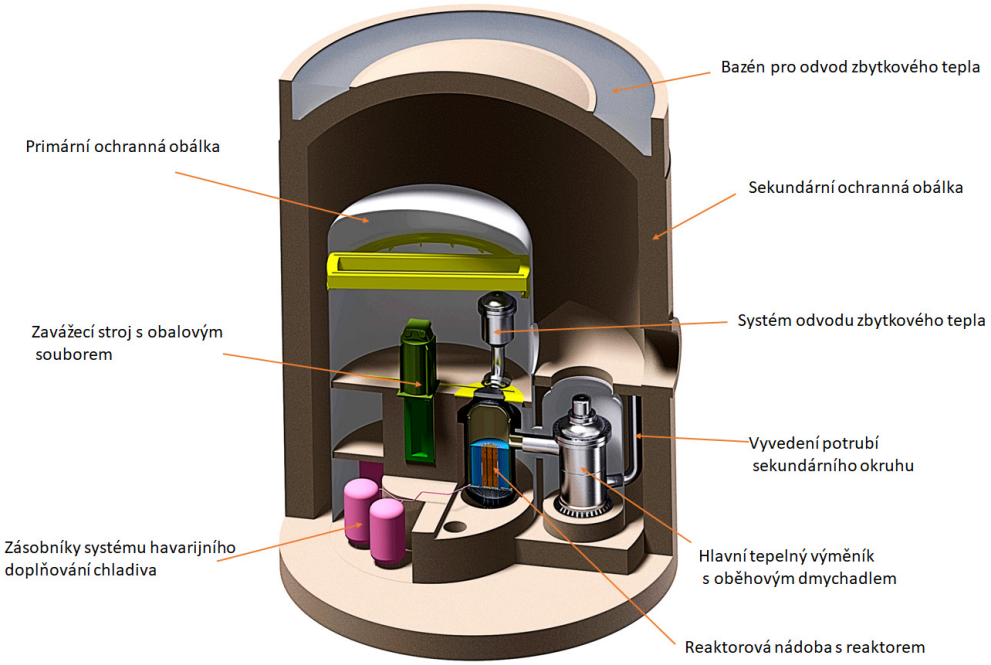
MEZINÁRODNÍ SPOLUPRÁCE

V rámci mezinárodní spolupráce se ÚJV Řež, mimo aktivit V4G4 CoE, účastní tří probíhajících projektů. Nejrozsáhlejší z nich je projekt spolufinancovaný Evropskou komisí v rámci programu Horizon 2020 s názvem SafeG, v jehož rámci od roku 2020 spolupracuje 15 prestižních organizací ze sedmi evropských zemí a Japonska. Je zaměřený na celkem 18 oblastí výzkumu a vývoje GFR, s cílem dosáhnout významného pokroku v designu a bezpečnosti, a přilákat nové mladé vědce a inženýry. ÚJV Řež v rámci projektu vede několik aktivit a koordinovalo přípravu technické náplně přihlášky projektu.

Experti ÚJV Řež se dále účastní projektů v rámci Generation IV International Forum, a nadějné výsledky projektu TA ČR NOVA daly vzniknout bilaterální spolupráci mezi ÚJV Řež a JRC Karlsruhe na společném projektu vývoje tzv. obětních materiálů core catcheru pro GFR.

Název	Trvání	Zaměření
NOVA	2018–2022	Vývoj obětního materiálu pro core catcher GFR
REDEAL	2018–2024	Expozice kovových konstrukčních materiálů v plynných prostředích a vyhodnocení vlivu na jejich vlastnosti
MKM	2018–2024	Vývoj nových zirkoniových slitin a vysokoentropických slitin pro použití v jaderném průmyslu
ALLEGRO	2018–2025	Design a testování komponent a systémů pro ALLEGRO
MATPRO	2020–2024	Vývoj náhrady betonu pro ztížené podmínky (chemické, radiační)
KOBRA	2020–2023	Vývoj pasivního bezpečnostního systému pro plynem chlazené reaktory
PMATF	2020–2023	Vývoj metodik a testovacích zařízení pro charakterizaci pokročilých pokrytí paliva (ATF)

Tab. 1: Přehled běžících projektů TA ČR zaměřených na GFR s účastí ÚJV Řež



Obr. 3: Vizualizace reaktoru HeFASTo

HeFASTo

Projekt ALLEGRO má sloužit jako demonstrátor komerčního GFR. V době vzniku projektu to byl velký reaktor s výkonem 2 400 MW_t, ovšem změna požadavků trhu i nemožnost škálovat některé systémy navržené pro ALLEGRO (75 MW_t) bez výrazného omezení výkonu cílového GFR logicky vyústila v design malého modulárního GFR. Ten získal po období příprav v ÚJV Řež konkrétní obrysy, a proto mohl být v roce 2021 představen pod názvem HeFASTo (Helium-cooled Fast Reactor). Aby mohl ekonomicky koexistovat s LWR SMR využívajícími prověřené existující technologie, je konstruován jako vysokoteplotní — výstupní teplota z aktivní zóny dosáhne 900 °C a cílí tak i na aplikaci v chemickém průmyslu a efektivní výrobu vodíku. Jeho zásadní výhodou proti HTR (které nabízí podobné teploty) je, že generuje minimum jaderného odpadu a umožňuje efektivní uzavření palivového cyklu včetně využití plutonia z LWR.

Celkový tepelný výkon zařízení bude 200 MW, řadí se tedy do rodiny reaktorů menšího výkonu. Design HeFASTo je založen především na maximální míře modularity a sázce na využití moderních materiálů. Naprostá většina komponent je designována ve formě typizovaných částí, u kterých se počítá s výrobou v továrně, v místě výstavby budou tyto moduly pouze sestaveny do požadované formace, což výrazně sníží investiční náklady. Vysoká bezpečnost navrženého reaktoru je podpořena celou škálou inovativních pasivních bezpečnostních systémů, které fungují výhradně na základě fyzikálních jevů jako je např. gravitace nebo rozdíl tlaků.

S komerčním nasazením reaktoru se počítá hlavně v souvislosti s růstem poptávky po masové výrobě vodíku, a také s potřebou zpracování nahromaděného vyhořelého paliva z lehkovodních reaktorů, tedy výhledově po roce 2040. V současné době už probíhá vývoj reaktoru v rámci tzv. předkoncepční fáze, prostor pro vstup strategického investora se očekává po roce 2025.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Tepelný výkon	200	MW_t
Teplota vstupní/výstupní	450/900	°C
Primární chladivo	He	–
Primární tlak	7,5	MPa
Sekundární chladivo	N_2+He	–
Sekundární tlak	8,0	MPa
Palivo	UC, případně (U,Pu)C	–
Obohacení paliva	UC – 19,5 (U,PU)C – 30	%
Provoz s jednou palivovou vsázkou	5	let
Koeficient využití	> 95	%

Tab. 2: Technické parametry konceptu reaktoru HeFASTo

Reference:
[1] International Panel on Climate Change (IPCC). Report AR5, 2014
[2] Uranium 2020: Resources, Production and Demand, Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency, 2020
[3] Gas-Cooled Fast Reactor (GFR), online, https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9357/gfr
[4] Simon, R. H. et al: Gas-cooled fast breeder reactor demonstration plant, Proceedings of the ANS Topical Meeting on Gas-cooled Reactors, Gatlinburg, USA, 1974
[5] Chermanne, J. et al.: Past and future programmes of the GBR Association, Proceedings of the IAED Study Group Meeting on Gas-cooled Fast Reactors, IAEA, Minsk, Belarus, 1972
[6] Poette, C. et al.: The European Union's experimental gas-cooled fast reactor project, International conference on the physics of reactors, Interlaken, Switzerland, 2008
[7] Poette, C. el al.: ALLEGRO: the European gas fast reactor demonstrator project, Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering ICONE17 July 12–16, 2009, Brussels, Belgium

Ing. Petr Vácha

petr.vacha@ujv.cz

Absolvoval Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze (Bc. v oboru jaderná zařízení) a Fakultu elektrotechnickou ČVUT v Praze (Ing. v oboru elektroenergetika), od roku 2013 působí v ÚJV Řež, a. s. v oblasti vývoje reaktorů čtvrté generace, od roku 2018 je vedoucím skupiny vývoje reaktorů GEN IV. Je klíčovým expertem v řadě národních i mezinárodních projektů výzkumu a vývoje, zástupcem ČR v několika expertních skupinách IAEA a jedním ze zástupců EURATOM v Generation IV International Forum.

Aktuálny pohľad na projekt ALLEGRO

Ing. Slavomír Bebjak[1], Ing. Branislav Hatala, PhD.[1], prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc.[2]

[1] VUJE, a.s., Trnava

[2] Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva FEI STU, Bratislava

Projekt ALLEGRO predstavuje prototyp experimentálneho reaktora, ktorý je chladený plynom a pracuje s rýchlym spektrom neutrónov. Výstavba demonštrátora ALLEGRO predstavuje nevyhnutný krok k ďalšej etape výstavby reaktorov IV. generácie. Dôležitou súčasťou tejto etapy je získavanie experimentálnych údajov pomocou výskumných zariadení, akou je aj experimentálna héliová slučka STU, a takisto aj vykonanie veľkého množstva bezpečnostných analýz nevyhnutných pre výskum fyzikálnych javov a procesov demonštrátora ALLEGRO. Tomuto cieľu prispieva aj práve prebiehajúci projekt SafeG, ktorý je zameraný na vyriešenie otvorených otázok v koncepcii bezpečnosti plynom chladených rýchlych reaktorov (GFR) a návrhu kľúčových bezpečnostných systémov demonštrátora ALLEGRO.

The ALLEGRO project represents a prototype of gas-cooled experimental reactor working with fast neutron spectrum. The development of the ALLEGRO demonstrator represents a necessary step in construction phase of generation IV. reactors. Important part of this phase is to get an experimental data using research facilities, such as the STU experimental helium loop, as well as to perform a large number of safety analyses necessary for the investigation of physical phenomena and processes of the ALLEGRO demonstrator. The ongoing SafeG project, which aims to solve open issues in the concept of safety of gas-cooled fast reactors (GFR) and the design of key safety systems of the ALLEGRO demonstrator, also contributes to this goal.

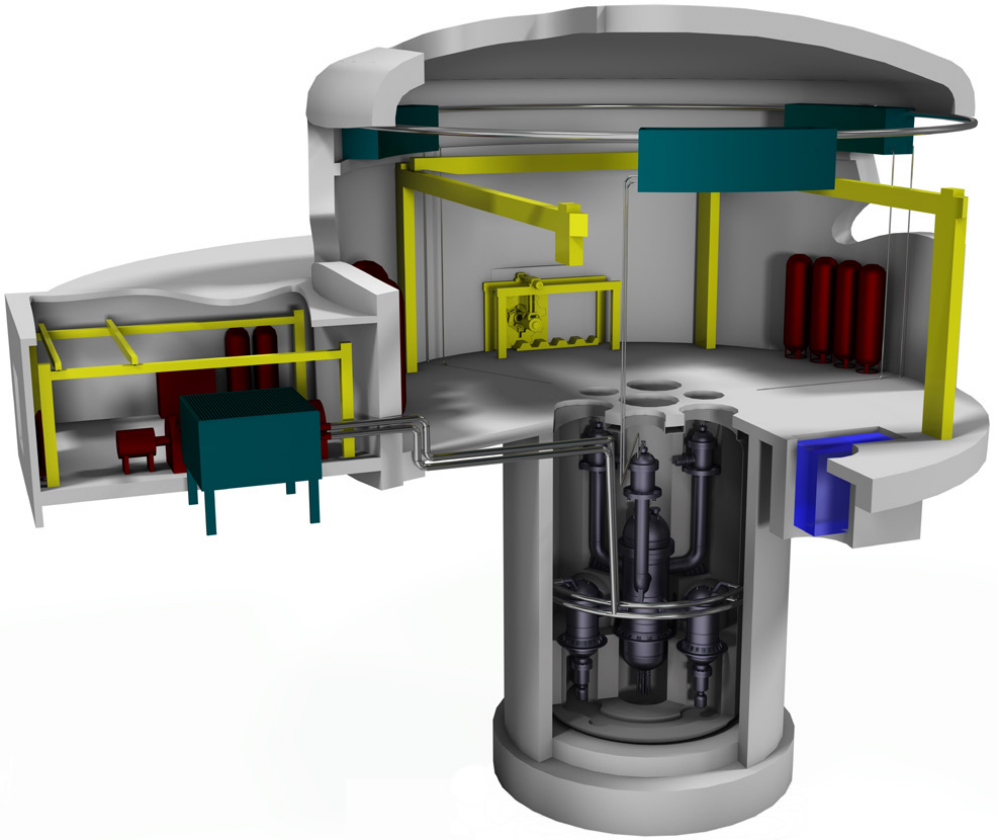
ALLEGRO – DEMONŠTRÁTOR PLYNOM CHLADENÉHO RÝCHLEHO REAKTORA 4. GENERÁCIE

ALLEGRO je jedným zo šiestich predstaviteľov reaktorov takzvanej 4. generácie. V rámci európskeho výskumu má Slovensko unikátnu šancu spolu s Českou republikou, Maďarskom, Poľskom, Francúzskom, ako aj ďalšími krajinami významne sa podieľať na jeho výstavbe. V prvom kroku je potrebné vytvoriť zodpovedajúcu technologickú platformu a aktivizovať ľudí doma i v zahraničí, ktorí majú záujem riešiť náročné technické úlohy. ALLEGRO je i šanca pre Slovensko vrátiť sa na reálnu cestu technického a ekonomického rozvoja.

Navrhovaným demonštračným reaktorom GFR je ALLEGRO – nízkoenergetický reaktor so schopnosťou prevádzky s rôznymi konfiguráciami aktívnej zóny, počnúc MOX palivom s oceľovým pokrytím a následne keramickým palivom, pri ktorom je možné dosiahnuť výstupnú teplotu až 850 °C. Rez jeho modelom je obrázku 1, technická schéma na obrázku 2.

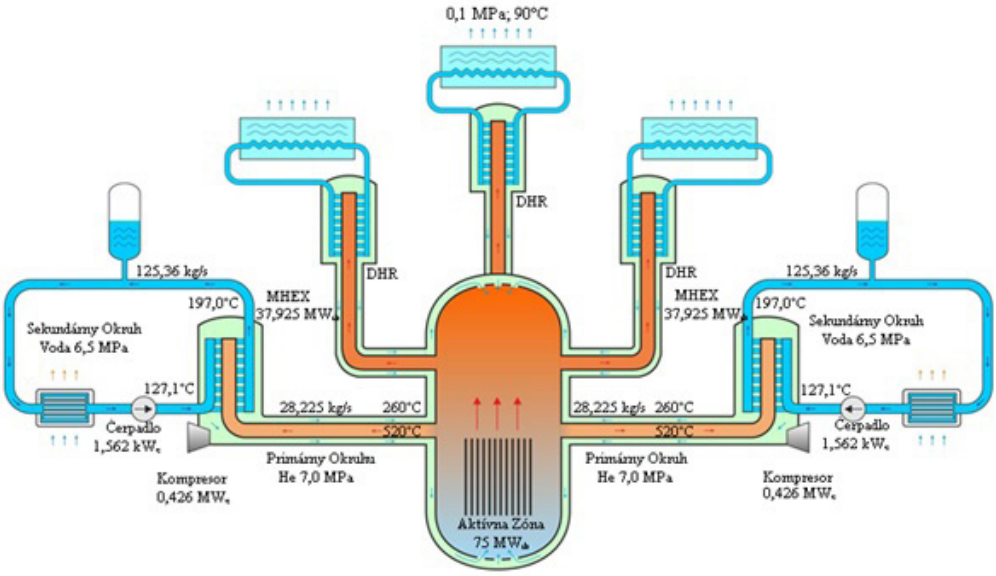
Základná koncepcia reaktora ALLEGRO bola navrhnutá francúzskou organizáciou CEA. Tepelný výkon reaktora ALLEGRO by mal byť 75 MW, bez produkcie elektrickej energie. Z primárneho okruhu je teplo v tepelnom výmenníku odovzdávané do sekundárneho okruhu a odtiaľ do atmosféry.

Demonštrátor ALLEGRO bude mať počas svojej prevádzky rozdielnu skladbu paliva v aktívnej zóne. Ako prvá, štartovacia zóna („MOX zóna"), bude použitá už existujúca technológia (kazeta obsahujúca prútiky MOX s kovovým pokrytím). Zóna MOX ALLEGRO je založená na technológii MOX palivových peletiek, oceľového pokrytie 15–15 Ti (trieda AIM1) a obalového drôtu, ktoré boli vyvinuté pre sodíkové rýchle reaktory. Druhá, „keramická" zóna (peletky z karbidu U-Pu vo vnútri SiCf/SiC pokrytia), bude slúžiť na testovanie nového dizajnu paliva a na otestovanie celkového návrhu plynom chladeného reaktora v podmienkach veľmi vysokých teplôt (850 °C). Z pohľadu bezpečnosti bude keramické palivo lepšie než MOX palivo, pretože sa taví pri vyšších teplotách.



Obr. 1: Rez modelom reaktora ALLEGRO

Obr. 2: Technická schéma reaktora ALLEGRO



Štartovacia palivová kazeta pozostáva zo 169 prútikov obklopených oceľovou (15–15 Ti) obalovou rúrou hexagonálneho tvaru hrúbky 0,2 cm. Aktívna zóna obsahuje 81 MOX kaziet a 6 experimentálnych pozícií pre testovanie nového keramického paliva.

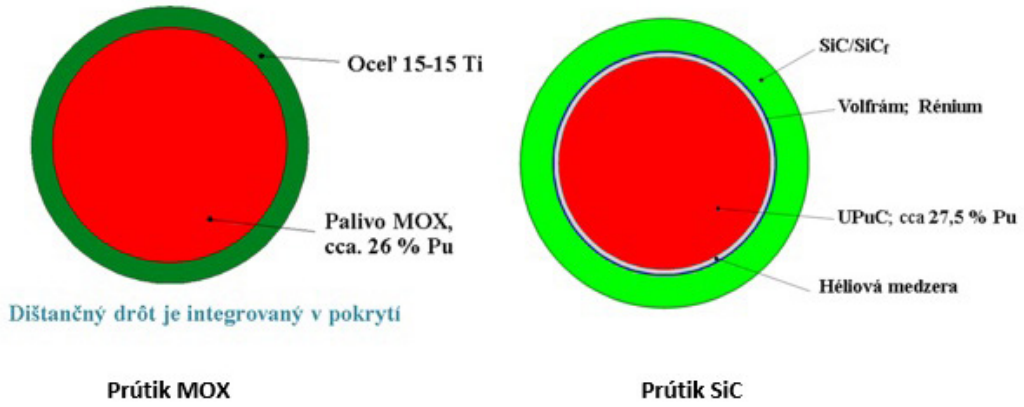
Koncept prútikovej palivovej kazety na báze karbidického paliva pochádza z prvotného návrhu energetického reaktora GFR. V prípade karbidického paliva nebolo možné navrhnúť koncept kazety s dištančným drôtom, pretože vlastnosti materiálu pokrytia SiC/SiCf nedovoľujú dištančný drôt použiť.

Na nasledujúcom obrázku je porovnanie materiálového zloženia a usporiadania konštrukčných materiálov palivového prútika štartovacej MOX kazety a palivového prútika karbidickej kazety.

V4G4 CENTRE OF EXCELLENCE

Za účelom zintenzívnenia a zefektívnenia činností pri projektovaní demonštrátora ALLEGRO sa štyri organizácie jadrového výskumu Visegrádskej štvorky rozhodli vytvoriť právny subjekt, „V4G4 Centre of Excellence“, ktorý zodpovedá za medzinárodné zastúpenie projektu a jeho technickú koordináciu. Konzorcium V4G4 bolo založené v roku 2013. Náplňou činnosti „V4G4 Centre of Excellence“ je koordinácia činností na príprave koncepčného projektu demonštrátora ALLEGRO.

Zakladajúcimi členmi konzorcia „V4G4 Centre of Excellence“ sú spoločnosti z krajín Visegrádskej štvorky – slovenská spoločnosť VUJE, a.s., česká spoločnosť ÚJV Řež, a. s., Maďarská akadémia vied MTA-EK a poľské výskumné centrum NCBJ. Asociovanými členmi konzorcia V4G4 sú francúzska spoločnosť CEA, ktorá je v pozícii technickej podpory pre členov konzorcia a česká spoločnosť Centrum výzkumu Řež, ktorá je prevádzkovateľom héliovej slučky S-ALLEGRO v Plzni.



Obr. 3: Rez palivovým prútikom kazety MOX a karbidickej kazety

Cieľom „V4G4 Centre of Excellence“ sú nasledovné činnosti:

- výskum zásadných aspektov týkajúcich sa bezpečnosti a získavanie experimentálnych výsledkov pre vývoj jadrových reaktorov IV. generácie, najmä pre inovatívny koncept GFR (plynom chladené rýchle reaktory), pre ktorý bude postavený demonštrátor ALLEGRO a bude pôsobiť v regióne V4 ,
- propagácia a popularizácia potenciálu, perspektívy, technických, politických a environmentálnych otázok týkajúcich sa reaktorov IV. generácie,
- prispieť ku zachovaniu kvalifikovaných odborníkov v oblasti jadrovej energetiky zapojením mladých vedcov a technikov do náročných výskumných a vývojových činností,
- napomáhať ku integrácii jadrového výskumu v strednej Európe.

Na národnej úrovni bolo na Slovensku vytvorené Výskumné centrum ALLEGRO [4], do ktorého bolo investované v rokoch 2014–2015 viac než 16 mil. euro zo štrukturálnych fondov EU. Popri výpočtových kódoch a posilnení infraštruktúry materiálového výskumu bola postavená i špeciálna héliová slučka STU-Helium Loop.

HÉLIOVÁ SLUČKA STU

Experimentálna héliová slučka slúži na empirické experimentálne overenie prirodzenej cirkulácie hélia a overenie schopnosti odvodu tepla z GFR v režime prirodzenej cirkulácie. Ako médium, slúžiace na odvod tepla z GFR prostredníctvom primárneho okruhu a DHR (Decay Heat Removal – slučka na odvod zvyškového tepla), je zvolené hélium. Na technologickom okruhu héliovej slučky so zdrojom tepla na simuláciu vývoja zvyškového tepla v odstavenom reaktore a s výmenníkom tepla určeným na odvod zvyškového tepla budú overené termodynamické a hydraulické vlastnosti primárneho okruhu.

Výsledkom súboru experimentov bude databáza nameraných charakteristík primárneho okruhu héliovej slučky pri rôznej teplote a tlaku hélia v studenej a horúcej vetve, na základe ktorých bude možné porovnanie výsledkov výpočtových modelov s experimentálnymi dátami.

Experimentálna héliová slučka umožňuje ohriatie hélia na požadovanú teplotu 400 ˚C až 520 ˚C. Celkový inštalovaný výkon elektroohrievačov (GFR) je 500 kW, s možnosťou regulácie tepelného výkonu. V rámci tepelného výmenníka DHR sa hélium ochladzuje na teplotu 150 ˚C až 250 ˚C. Odvod tepla je zabezpečený tepelným výmenníkom typu plyn–voda. Na správnu činnosť DHR je héliová slučka vybavená zdrojom chladiacej vody, ktorý zabezpečí dostatočný prietok cirkulačnej vody cez chladič.

PROJEKT SAFEG

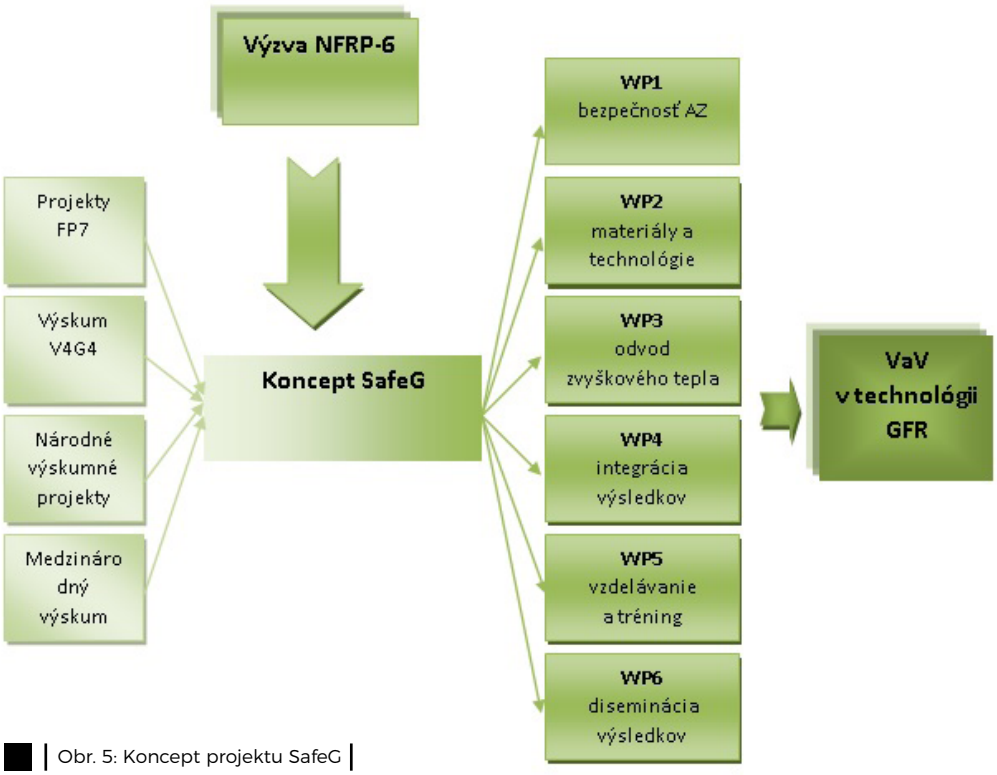
Výzva EURATOM Horizon 2020 (balík NFRP-6) bola zameraná na vývoj a technické hodnotenie bezpečnostných vylepšení systémov IV. generácie, stanovených Európskou iniciatívou trvalo udržateľného jadrového priemyslu (SNETP) a Medzinárodným fórom IV. generácie (GIF). Projekt SafeG napĺňa ciele tejto výzvy predložením výskumného a vývojového programu zameraného na výskum bezpečnosti pokročilých technológií reaktorov typu GFR.

V projekte SafeG koordinovanom VUJE, a.s. je zahrnutých 15 partnerov z ôsmich krajín sveta. Partnermi projektu sú špičkové európske výskumné organizácie a taktiež univerzity, medzi ktoré patrí aj Slovenská technická univerzita v Bratislave.

Projekt SafeG je navrhnutý na vyriešenie otvorených otázok v koncepcii bezpečnosti GFR a návrhu kľúčových bezpečnostných systémov reaktora ALLEGRO. Dôležitou súčasťou tohto návrhu je získavanie nových experimentálnych údajov pomocou najmodernejších výskumných zariadení, ako aj veľké množstvo bezpečnostných analýz a skúmania fyzikálnych javov, ktoré sa budú vykonávať pomocou špecializovaných výpočtových programov.

Projekt SafeG je rozdelený do šiestich technických a jedného koordinačného balíka (WP). Pre lepšiu prehľadnosť je na nasledujúcom obrázku graficky interpretovaná koncepcia projektu SafeG.

Obr. 4: Experimentálna héliová slučka STU v Trnave



Obr. 5: Koncept projektu SafeG

Hlavnou ambíciou projektu SafeG je zakomponovať najmodernejšie technologické inovácie do koncepcie GFR, jednej zo šiestich technológií reaktorov IV. generácie vybranej a podporovanej GIF-om, a implementovať ich predovšetkým do demonštrátora ALLEGRO – jednej zo štyroch referenčných demonštračných jednotiek reaktorov IV. generácie, ktorý je podporovaný ESNII.

V súlade s rozsahom a cieľmi výzvy možno ambície a ich inovačný potenciál rozdeliť do štyroch pilierov:

1/ DOKONČENIE BEZPEČNOSTNÉHO KONCEPTU DEMONŠTRÁTORA ALLEGRO:

- Optimalizácia aktívnej zóny z hľadiska neutroniky, termohydrauliky a termomechaniky pre prvú (štartovaciu) zónu, ako aj pre ďalšie zavážky a návrh diverzitného spôsobu riadenia štiepnej reakcie a odstavenia reaktora.
- Stratégia pasívneho odvodu zvyškového tepla doplnená návrhom plne pasívnych systémov odvodu zvyškového tepla a experimentmi na výskum odvodu zvyškového tepla vykonávané na najmodernejších zariadeniach určených pre technológiu GFR, akým je héliová slučka S-ALLEGRO.

2/ AKTUALIZÁCIA DIZAJNU DEMONŠTRÁTORA ALLEGRO A KONCEPTU GFR

špičkovými materiálmi a technológiami, akými sú inovatívne materiály pokrytia paliva na báze SiC, až po žiaruvzdorné konštrukčné materiály pre primárny okruh a bezpečnostné systémy. Získajú sa experimentálne údaje o materiálových vlastnostiach v rôznych podmienkach a vysokých teplotách špecifických pre GFR.

3/ ZLÚČENIE NÁRODNÝCH VÝSKUMNÝCH PROJEKTOV A VYTVORENIE SPOLOČNEJ PLATFORMY

na zdieľanie poznatkov, pokroku a koordinácie činností s cieľom predstaviť tieto témy a výsledky širšej vedeckej verejnosti a ďalej ich rozvíjať na medzinárodnej úrovni, čím sa posunie špičkový výskum na novú úroveň.

4/ PREHĹBENIE SPOLUPRÁCE MEDZI EURÓPOU A JAPONSKOM V OBLASTI VÝSKUMU GFR
formou zdieľania vedomostí o pokročilých žiaruvzdorných materiáloch pre pokrytie palivových prútikov a kľúčových komponentov primárneho okruhu, ako aj rozdelenie úsilia pri vykonávaní skúšok týchto materiálov v podmienkach GFR a ich implementácie do dizajnu ALLEGRO.

ZÁVER A PERSPEKTÍVY DO BUDÚCNOSTI

Jadrová energia je určujúci faktor vo vzťahu znižovania emisií skleníkových plynov v sektore výroby elektrickej energie. Jadrová energia nevytvára prakticky žiadne skleníkové plyny v mieste výroby a predstavuje viac ako polovicu nízkouhlíkovej elektrickej energie EÚ. Vývoj nových technológii vo výrobe elektrickej energie je nevyhnutnou požiadavkou súčasti pre zaistenie dlhodobej a spoľahlivej dodávky elektrickej energie.

Súčasné predlžovanie prevádzky existujúcich jadrových zariadení a výstavba nových zariadení vyžaduje silný vedecký podklad, vzdelávanie a školenie zodpovedajúcich pracovných síl. Spôsobilosť môže byť udržiavaná a mladí experti môžu byť prilákaní a vzdelaní, iba ak jadroví experti budú môcť participovať na poprednom svetovom výskume a technologickom vývoji. Vynikajúca kvalita súvisiaceho vedeckého pozadia a ľudských zdrojov je nevyhnutná v krajinách, ktoré chcú bezpečne a hospodárne prevádzkovať jadrové zariadenie v dlhodobom horizonte.

Projekt ALLEGRO vyžaduje významný vývoj špičkových technológií. Konštrukcia reaktora ALLEGRO sama o sebe potrebuje najvyššiu úroveň systémov merania a regulácie prevádzkovateľných v extrémnych podmienkach, špeciálne žiaruvzdorné materiály schopné znášať vysokú úroveň žiarenia, nové optické meracie prístroje, atď. ALLEGRO bude skúšobné zariadenie nie len pre GFR technológie, ale tiež pre pokročilé technológie vyžadujúce vysoké teploty (napr. výroba vodíka) alebo nové typy jadrových palív.

Výskumné aktivity sústredené pre vývoj reaktora ALLEGRO boli doposiaľ významne financované so súkromných zdrojov v rámci združenia „V4G4 Centre of Excellence“ a z národných projektov jednotlivých krajín Visegrádskej štvorky. Výskumný projekt SafeG financovaný EU vytvára predpoklad pre zapojene výskumných tímov z celej EU a Japonska. Taktiež projekt zabezpečí významný posun vývoja konceptu demonštračného reaktora ALLEGRO.

Projekt SafeG koordinovaný spoločnosťou VUJE, a.s. vytvára reálne predpoklady pre zaistenie rozvoja technických znalostí v oblasti jadrovej energetiky aktívnym zapojením mladých vedcov a technikov.

Referencie:
[1] Forum, U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International, „A Technology Roadmap for Generation IV Energy Systems,“ 2002
[2] Generation Four International Forum, „www.gen-4.org,“ 2008. [Online]. Available: www.gen-4.org/PDFs/GIF_introduction.pdf. [Cit. 6 5 2013]
[3] Generation Four International Forum, „www.gen-4.org,“ 2002. [Online]. Available: http://www.gen-4.org/PDFs/GenIV Roadmap.pdf. [Cit. 30 4 2013]
[4] http://www.vca.sav.sk/

Ing. Slavomír Bebjak

slavomir.bebjak@vuje.sk

Absolvoval inžinierske štúdium na Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave (2012). V súčasnosti pokračuje ako externý študent na FEI STU v doktorandskom stupni štúdia a v dizertačnej práci sa venuje reaktorom IV. generácie. Od ukončenia inžinierskeho štúdia v roku 2012 pracuje ako výskumný pracovník vo VUJE, a.s. na divízii jadrovej bezpečnosti. Podieľa sa na vývoji komplexných výpočtových modelov jadrových elektrární pre termohydraulické výpočtové kódy a vykonáva bezpečnostné analýzy reaktorov typu VVER-440. Od roku 2015 je členom medzinárodnej skupiny pre výskum nových typov jadrových reaktorov (V4G4). Bol ocenený cenou Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky v kategórii Vedecko-technický tím roka 2017 za prínos pre medzinárodný výskum a vývoj rýchleho, plynom chladeného reaktora ALLEGRO.

Energy Well – český modulární reaktor

Ing. Marek Ruščák
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Malé modulární reaktory představují jeden z nejzásadnějších kroků, jaké jaderný průmysl dělá od svého počátku. Představují zásadní snížení investičních nákladů, zjednodušení a urychlení výrobního procesu spolu se zásadním navýšením úrovně jaderné bezpečnosti. Česká republika a Skupina ÚJV participují na tomto pokroku vlastním designem malého modulárního reaktoru – reaktoru Energy Well. Představení projektu a jeho aktuální stav jsou pak obsaženy v článku.

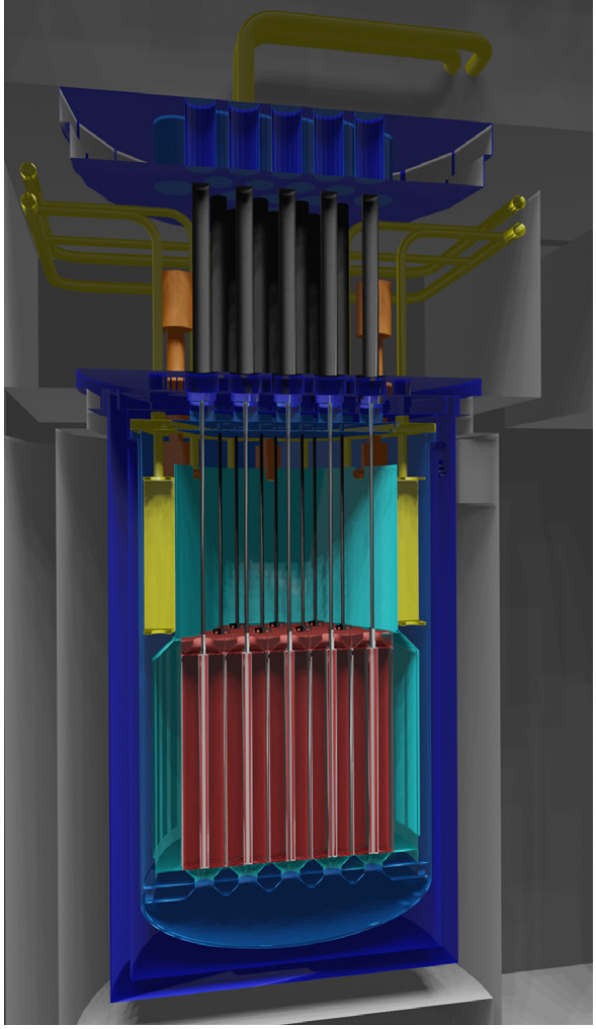
Small modular reactors represent one of the most significant steps the nuclear industry has taken since its inception. They represent a major reduction in investment costs, simplification and acceleration of the production process, together with a substantial increase in the level of nuclear safety. The Czech Republic and the UJV Group are participating in this progress with their own design of a small modular reactor – the Energy Well. A presentation of the project and its current status is included in the article.

V současné době se jaderný průmysl dostal do situace, kdy velké lehkovodní reaktory dosahují svého maximálního technologického potenciálu. Tento potenciál je definován tím, co umožňují lehkovodní technologické systémy v rámci stávajícího portfolia paliv, materiálů, systémů a technologií řízení a s ohledem na bezpečnostní požadavky státu i odborné veřejnosti. Ty odrážejí složité a nejednoznačné vnímání výhod a rizik jaderné energetiky z pohledu veřejnosti, přičemž vnímání rizik i výhod je v jednotlivých regionech a státech nehomogenní. Jaderná energetika je dnes definována jako nízkoemisní zdroj energie, který je vázán také s nízkou provozní úmrtností. Konkrétně pak dle průzkumu Cambridge House International [1] v roce 2012 a publikovaném v roce 2018 připadalo v jaderném průmyslu 90 úmrtí na vyrobenou terawatthodinu – oproti tomu u vodních zdrojů energie je tento počet 1 400/TWh a v případě uhelných zdrojů dokonce 100 000/TWh.

Vzhledem k přechodu na udržitelné a nízkoemisní zdroje energie dochází k postupnému odstavování vysokoemisních zdrojů jak elektrické, tak ale i tepelné energie. V kombinaci s nárůstem poptávky po elektrické energii vlivem nástupu elektrických aut je nezbytné zajistit stabilní zdroje. I díky těmto podmínkám dochází k zásadním investicím do inovací v jaderném průmyslu. Výsledkem jsou pak malé modulární reaktory (SMR), které kombinují technologický vývoj s ekonomickou rentabilitou. V České republice se pak tyto snahy spojují do projektu Energy Well.

JAKÝ JE ROZDÍL MEZI REAKTOREM ENERGY WELL A KONVENČNÍMI REAKTORY V JADERNÝCH ELEKTRÁRNÁCH?

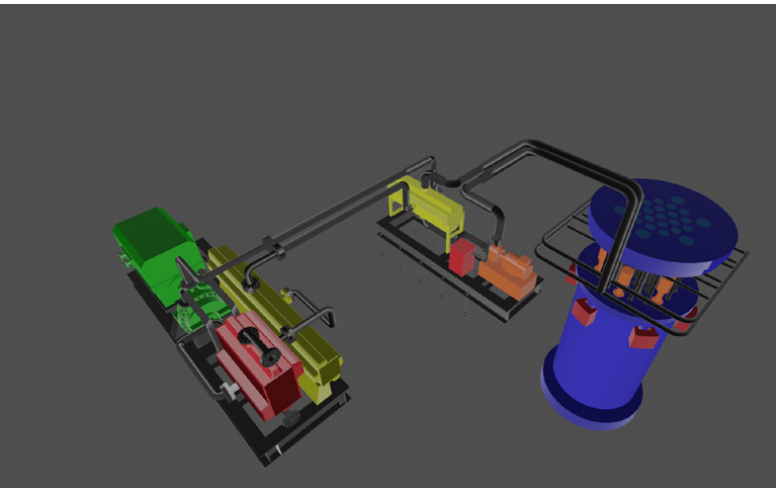
Reaktor Energy Well patří do takzvané čtvrté generace jaderných reaktorů. Ta se vyznačuje vysokou mírou pasivní bezpečnosti, využívá fyzikální vlastnosti pokročilých chladicích médií a inovovaných druhů jaderného paliva. To znamená, že tam, kde konvenční reaktory spoléhají na rozsáhlé bezpečnostní systémy, reaktor Energy Well se spoléhá na vlastnosti vyplývající ze samotné podstaty designu a fyzikálních vlastností chladicího média. Dalším zásadním rozdílem je velikost celé elektrárny, což přímo vyplývá především ze zvolené technologie, ale i z instalovaného výkonu. Výkon reaktoru je 20 MW tepelných (tedy zhruba 150krát méně, než u dnešních konvenčních reaktorů). Ovšem zásadní v otázce velikosti je pak právě zvolená technologie systému. Díky absenci nutnosti



mít velké množství aktivních bezpečnostních systémů je Energy Well velmi kompaktní. Díky využití nadkritického CO_2 v terciárním okruhu jsou pak samotná turbína a generátor převozitelné v obyčejném transportním kontejneru.

JE REAKTOR ENERGY WELL BEZPEČNĚJŠÍ?

Jaderné elektrárny jsou všeobecně velmi bezpečným zdrojem energie. Energy Well ovšem k docílení takto precizní úrovně bezpečnosti nevyžaduje aktivní systémy, což snižuje riziko selhání funkčnosti. V současné době na konvenčních elektrárnách je hlavní projektovou událostí protržení primárního okruhu a následný rychlý únik chladiva z důvodu vysokého vnitřního tlaku. Energy Well pracuje na úrovni atmosférického tlaku, z čehož vyplývá také výrazně nižší tlakový účinek na celý systém. Tím se jednak zásadně snižuje pravděpodobnost protržení, ale také se snižuje rychlost výtoku chladiva. Hlavní projektová nehoda reaktoru Energy Well je pak ztráta nucené konvekce z důvodu vnitřního a vnějšího výpadku dodávky elektrické energie. V takovém případě se systém teplotně stabilizuje na teplotách, které jsou několik set stupňů pod limitním bezpečnostním kritériem. Přirozenou cirkulací chladiva se pak reaktor zcela uchladí.



ČÍM JE MALÝ MODULÁRNÍ REAKTOR ENERGY WELL UNIKÁTNÍ?

Hlavním prvkem unikátnosti je způsob nakládání s vyhořelým jaderným palivem. Vzhledem k plánovanému využití reaktoru v obydlených oblastech je stěžejní, aby byla maximálně zajištěna bezpečnost obyvatel. Do toho spadá filozofie Energy Wellu při nakládání s vyhořelým palivem, které nebude v žádném momentu provozu v otevřeném prostoru, ale vždy v ochranné nádobě. K samotné výměně paliva bude pak docházet centralizovaně mimo provozní oblast.

JAKÉ JSOU HLAVNÍ VÝHODY REAKTORU ENERGY WELL?

Největší výhodou reaktoru Energy Well je přínos čisté jaderné energie do oblasti energetiky, ve které dlouhodobě dominují zdroje s vysokou produkcí skleníkových plynů. Konkrétně se jedná o možnost dodávek nejen elektrické energie pro menší regiony, především pak ale o dodávky tepla. Teplárenství čelí zásadním změnám vzhledem k nárokům v rámci nízkouhlíkových strategií a reaktor Energy Well má za cíl být jedním z možných řešení. Design reaktoru Energy Well je navr-

žen tak, aby bylo možné přizpůsobit druh výstupní energie aktuálním potřebám odběratele. Je tedy možné v zimním období využívat Energy Well jako zdroj bytového tepla a po zbytek roku jako zdroj elektřiny. Současně je možné využít Energy Well pro výrobu vodíku jako možnosti ukládání energie.

PRO JAKÉ LOKALITY JE ENERGY WELL URČEN?

Vzhledem ke své velikosti je Energy Well možné využít ve výrazně širším portfoliu lokalit, než je tomu u konvenčních jaderných zdrojů. Hlavním rozdílem je pak otázka zóny havarijního pánování (ZHP). Konvenční jaderné zdroje mají ZHP 20 kilometrů, což představuje zásadní omezení pro identifikování vhodné lokality pro výstavbu. Reaktory o velikosti a technologii jako Energy Well budou mít ZHP výrazně menší. V současné době se vede na mezinárodní úrovni diskuze o vhodné velikosti ZHP u mikroSMR. Pro Českou republiku ovšem toto téma není nové, protože na území Prahy a Středočeského kraje se nachází celkem tři výzkumné reaktory, jejichž zóna havarijního plánování je omezena na budovu reaktoru. Je tedy již dnes možné provozovat jaderný reaktor o obdobném výkonu jako Energy Well v blízkosti obydlených oblastí. Energy Well může být ovšem provozován naopak v naprosto neobydlených oblastech. Výhodou je pak dodání energie do oblastí, kam je velmi náročné zavést elektrický proud a jeho dodávky mohou tak být velmi nestabilní. Přínosem stabilního zdroje dojde pak i ke snížení lokální ceny energie, což přispívá zásadním způsobem k rentabilitě celého systému.

BEZPEČNOSTNÍ ANALÝZY

Protože Energy Well využívá pokročilá chladicí média, tedy fluoridové soli a nadkritické CO_2, představuje analytické ověřování bezpečnosti zásadní výzvu. Nástroje pro systémovou bezpečnostní analýzu pro lehkovodní reaktory jsou kontinuálně vyvíjeny po desetiletí a úroveň přesnosti těchto nástrojů je tak velmi vysoká. Protože stejný čas nemohl být věnován solným systémům, je dosažení dostatečné přesnosti výpočetních nástrojů zásadní otázkou provozu reaktorů tohoto typu. Proto Centrum výzkumu Řež spolu s ÚJV Řež již několik let spolupracují s vývojáři těchto nástrojů a posouvají díky reaktoru Energy Well úroveň poznání v této oblasti dopředu. Provedení bezpečnostních analýz reaktoru je jedním z nejdůležitějších úkolů v otázce licenčního řízení a týmy kolem Energy Wellu na nich pracují od samého počátku projektu.

SOUČASNÉ AKTIVITY PROJEKTU

Projekt reaktoru Energy Well se v tuto dobu posouvá z fáze koncepčního designu do fáze basic design. Ukončují se výzkumné aktivity a přechází se již k pokročilému inženýringu jednotlivých oblastí výstavby a provozu reaktoru. Mimo aktivity čistě technického charakteru pak probíhají také licenční a legislativní přípravy. Probíhají bezpečnostní analýzy systému pro zajištění funkčnosti designu, příprava bezpečnostní zprávy a současně spolu s dalšími partnery projektu dochází k analýzám a návrhům změn české legislativy spojené s výstavbou a provozem malých modulárních reaktorů.

Reference:
[1] Desjardins, J. (2018, May 10). The World's Safest Source of Energy Will Surprise You. Visual Capitalist Metals. http://metals.visualcapitalist.com/safest-source-energy/

Ing. Marek Ruščák

marek.ruscak@cvrez.cz

Získal bakalářské vzdělání v oboru matematika a fyzika na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové a titul Master in nuclear engineering z Polytechnické univerzity v Barceloně. Od roku 2015 působí v Centru výzkumu Řež, kde zastává pozici vedoucího oddělení Jaderné bezpečnosti. Na vývoji malého modulárního reaktoru Energy Well se podílí od roku 2016 a jeho vývoj vede od roku 2018.

Vývoj superkritickou vodou chlazeného jaderného reaktoru v Evropě

Ing. et Ing. Markéta Kryková, Ph.D. [1],
Ing. Mariana Arnoult Růžičková, Ph.D. [2],
Ing. Monika Šípová, Ph.D. [1]

[1] Centrum výzkumu Řež s.r.o.

[2] Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Superkritickou vodou chlazený jaderný reaktor je jedním z konceptů reaktorů IV. generace. Navazuje na provozní zkušenosti s lehkovodními reaktory a v souladu s principy moderní energetiky nabízí zvýšenou termodynamickou účinnost díky vyšším pracovním parametrům a zjednodušení cyklu v důsledku absence fázového přechodu pracovního média. Po celém světě jsou vyvíjeny různé koncepty založené na chlazení superkritickou vodou, a to jak velké energetické instalace, tak malé modulární reaktory. V evropském prostoru je vyvíjen koncept superkritickou vodou chlazeného reaktoru od roku 2000 a to zejména prostřednictvím projektů jako HPLWR (Phase 1 a Phase 2), SCWR-FQT a ECC-SMART. Před nasazením do průmyslové praxe a zejména licencováním je třeba vyřešit několik otevřených otázek, a to především volbu vhodného konstrukčního materiálu, validaci a vývoj konstrukčních i simulačních softwarových nástrojů a kvalifikaci paliva. I přesto je superkritický vodní reaktor jedním z nejslibnějších kandidátů z konceptů reaktorů IV. generace.

The supercritical water-cooled reactor is one of Generation IV nuclear reactor concepts. It is based on the well-known light water reactor technology and meets the modern power engineering requirements – especially thanks to higher thermodynamical efficiency caused by increased operational parameters as well as a simplified working circuit. There are several supercritical water based concepts developed around the world in the form of high-output installations and small modular reactors. In Europe, the supercritical water-cooled reactor has been developed since the year 2000, namely in the HPLWR (Phase 1 and Phase 2), SCWR-FQT and ECC-SMART projects. Before the reactor cooled by supercritical water can be employed, there are several open issues to be addressed for a smooth licensing process – the selection of proper constructional material, validation and development of design and simulation software tools and fuel qualification. Despite this fact, the supercritical water-cooled reactor is one of the most promising Generation IV reactor technologies.

ÚVOD

Superkritickou vodu chlazený jaderný reaktor (supercritical water cooled reactor – SCWR) je jedním z šesti konceptů reaktorů IV. generace (Gen IV). Vývoj těchto reaktorů je zaštítěn mezinárodní organizací The Generation IV International Forum (GIF) a projekty vybrané jako Gen IV splňují parametry, definované pro budoucí implementaci reaktorů v energetickém sektoru, a to zejména požadavky na udržitelný rozvoj, ekonomiku, bezpečnost a odolnost proti šíření jaderných zbraní (1). V porovnání s ostatními koncepty Gen IV využívá superkritickou vodou chlazený reaktor (SCWR) v primárním okruhu nejméně exotické médium – vodu. Konkrétně se jedná o superkritickou vodu (supercritical water – SCW) o parametrech vyšších než kritický bod vody (kritický bod vody – teplota 374 °C a tlak 22,064 MPa). Nicméně typicky se pracovní parametry pohybují okolo 600 °C a 25 MPa. Nadkritická a superkritická voda má mnoho specifických vlastností, kterých je v energetice s výhodou využíváno k dosažení vyšší účinnosti energetických zařízení (2).

Pracovní okruhy s nadkritickými podmínkami nejsou v energetice novinkou. Klasická energetika využívá vodu o nadkritických parametrech již od 80. let 20. století (3). Například v České republice byl v roce 2017 spuštěn blok č. 6 v elektrárně Ledvice o výkonu 660 MW chlazený právě superkritickou vodou (4). Využití zkušeností z provozu fosilních blo-

ků chlazených superkritickou vodou staví tuto technologii společně s chlazením tekutým sodíkem jako jednu z nejpokročilejších technologií Gen IV.

Myšlenka využití SCW v jaderné energetice není nová, výzkumu konceptu lehkovodního reaktoru o vysokém výkonu (High Performance Light Water Reactor – HPLWR) se věnují výzkumné i průmyslové organizace již od roku 2000. V rámci pátého, šestého a sedmého rámcového programu Evropské komise byly podpořeny úspěšně ukončené projekty HPLWR (5) a HPLWR Phase 2 (6) a projekt SuperCritical Water Reactor – Fuel Qualification Test (dále SCWR-FQT) (7). Díky programu Horizon 2020 byl podpořen aktuálně běžící projekt Joint European Canadian Chinese Development of Small Modular Reactor Technology (dále ECC-SMART) (8). Hlavním tématem všech uvedených projektů je vývoj superkritickou vodou chlazeného jaderného reaktoru a řešení otázek nutných pro uvedení reaktoru SCWR do průmyslové praxe.

KONCEPTY SUPERKRITICKOU VODOU CHLAZENÉHO REAKTORU

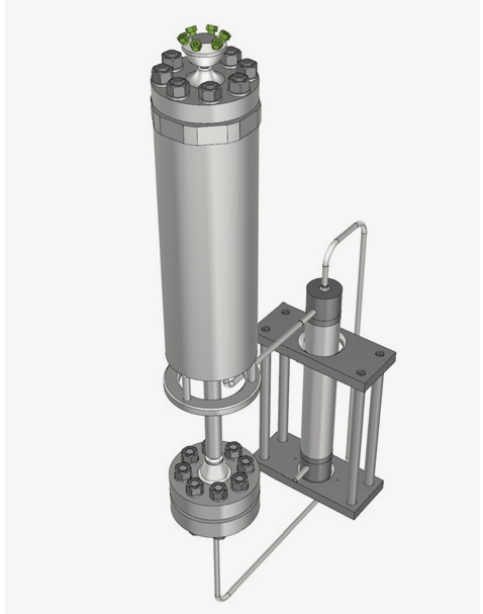
Vývoj SCWR probíhá v celém světě, nicméně jednotlivé národní koncepty jsou odlišné. Aktuálně je v rámci vývoje SCWR v GIF zapojeno 5 partnerů, jmenovitě: Kanada, Čína, Euratom (zastupující členské státy Evropské unie), Japonsko a Ruská federace. Je tedy řešeno 6 variant reaktoru SCWR: kanadský Canadian SCWR, čínský koncept CSR 1000 (9), evropský koncept HPLWR, japonské reaktory JSCWR a Super Fast Reactor, a svůj koncept SCWR vyvíjí i Ruská federace (10). Parametry jednotlivých konceptů jsou uvedeny v Tabulce 1, ze které je patrné, že i v rámci vývoje jednoho konceptu Gen IV jsou poměrně značné rozdíly v parametrech a vlastním designu (11).

I když byly v minulosti koncepty SCWR rozvíjeny jako velké jednotky s tepelným výkonem nad 1 500 MW_t, aktuálně je zpracovávána studie proveditelnosti verze malého modulárního reaktoru chlazeného superkritickou vodou (SCW-SMR) s tepelným výkonem do 300 MW_t.

Tab. 1: Shrnutí parametrů jednotlivých variant SCWR (11)

Parametry	Jednotka	Canadian SCWR	HPLWR	JSCWR	Super Fast Reactor	CSR 1000
Země	–	Kanada	EU	Japonsko		Čína
Typ reaktoru	–	kanálový (pressure tube)	tlaková reaktorová nádoba (Reactor Pressure Vessel)			
Spektrum neutronů	–	tepelné	tepelné	tepelné	rychlé	tepelné
Tepelný výkon	MW_t	2 540	2 300	4 039	1 602	2 300
Tepelná účinnost	%	48	43,5	42,7	44	43,5
Tlak	MPa	25	25	25	25	25
Vstupní teplota do AZ	°C	350	280	290	280	280
Výstupní teplota (vstup z AZ dále do primárního okruhu)	°C	625	500	510	508	500
Průtok primárním okruhem	kg/s	1 512	1 179	2 105	820	1 190
Výška aktivní zóny	m	5,0	4,2	4,2	2	4,2
Průměr aktivní zóny	m	5,5	3,8	3,34	1,86	3,4
Palivo	–	Pu-Th	UO_2	UO_2	MOX	UO_2
Materiál pokrytí	–	SS	316SS	310SS	SS	310SS
Maximální teplota na pokrytí	°C	850	620	700	643	650
Moderátor	–	D_2O	H_2O	H_2O	ZrH	H_2O

Obr. 1: Vybavení CVŘ pro výzkum SCWR a) ultrakritická vodní smyčka, b) superkritická vodní smyčka, c) ultrakritický vodní autokláv



Právě koncept SCWR se jeví jako skvělý kandidát pro technologii SMR, a to z několika důvodů. Předností SCW–SMR je jeho nulová toxicita, a i z hlediska bezpečnosti provozu např. v případě úniku primárního chladiva či mimořádné události převyšuje technologie využívající ke chlazení tekuté soli či kovy (např. olovo-bismut, sodík). Vyhovuje nárokům stanovených GIF na reaktory IV. generace, čímž je v souladu s nejpokročilejšími požadavky na nové jaderné instalace a v porovnání s koncepty SMR založenými na lehkovodních (LWR) reaktorech má i nižší investiční náklady a vyšší účinnost (12).

AKTUÁLNÍ TÉMATA VÝZKUMU

Byť je technologie SCWR založena na zkušenostech z provozu uhelných bloků s nadkritickými parametry a současných lehkovodních reaktorů, je stále cesta k průmyslové realizaci reaktoru chlazeného SCW ještě poměrně dlouhá.

Předně je nutné, vzhledem ke korozní náročnosti prostředí, dostatečně prověřit vlastnosti vybraných konstrukčních materiálů. Právě v oblasti konstrukčních materiálů (a zejména těch pro pokrytí paliva) je možnost přenositelnosti konstrukčních a provozních zkušeností z nadkritických fosilních bloků poměrně malá, neboť nelze využít možnosti silnostěnných trubek a tím navrhnout dostatečnou rezervu v tloušťce stěny trubky pro působení koroze. Zároveň je nutné vzít v úvahu vliv radiace, což je z hlediska životnosti materiálu zcela zásadní. Výzkum a kvalifikace materiálů včetně jejich povrchových úprav a použití povlaků je tedy v oblasti SCWR stále živým a významným tématem (13).

Další zásadní oblastí pro návrh, konstrukci a licencování budoucích SCWR je validace a verifikace systémových a simulačních kódů a jejich akceptace jadernými dozory v jednotlivých regionech. Kódy a softwary standardně používané pro stávající bloky nejsou navrženy pro použití v nadkritické oblasti a je proto nezbytné navrhovat nové, upravit stávající či je přinejmenším kvalifikovat na podmínky SCWR (14).

V neposlední řadě byla odbornou komunitou identifikována nutnost experimentálně ověřit funkčnost palivového souboru. K tomu účelu byl v rámci projektu SCWR–FQT navržen zmenšený palivový článek s rozměry a konstrukcí, které odpovídají konstrukci článku reaktoru HPLWR. Testovací podmínky odpovídají těm, jež panují ve výparníku HPLWR, kde dochází v chladivu k přechodu přes kritický bod. Tyto podmínky představují z hlediska přestupu tepla nejnáročnější část aktivní zóny, neboť zde díky vysokému tepelnému toku hrozí krize přestupu tepla (21).

VÝZKUM SCWR V ČESKÉ REPUBLICE

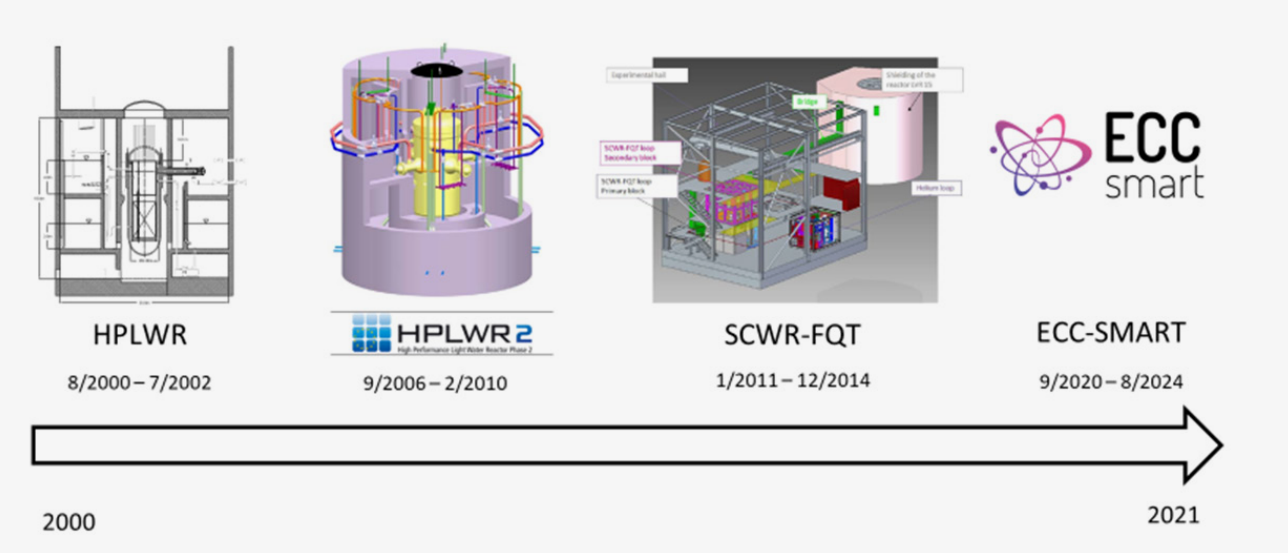
Český výzkum má v oblasti vývoje reaktoru SCWR významné místo. Výzkumná činnost na podporu SCWR je realizována zejména na pracovištích Vysoké školy chemicko-technologické (dále VŠCHT) a Centra výzkumu Řež s.r.o. (dále CVŘ). Jsou rozvíjena zejména témata materiálového výzkumu, a to v návaznosti na vývoj a kvalifikaci materiálů pro nadkritické vodní bloky.

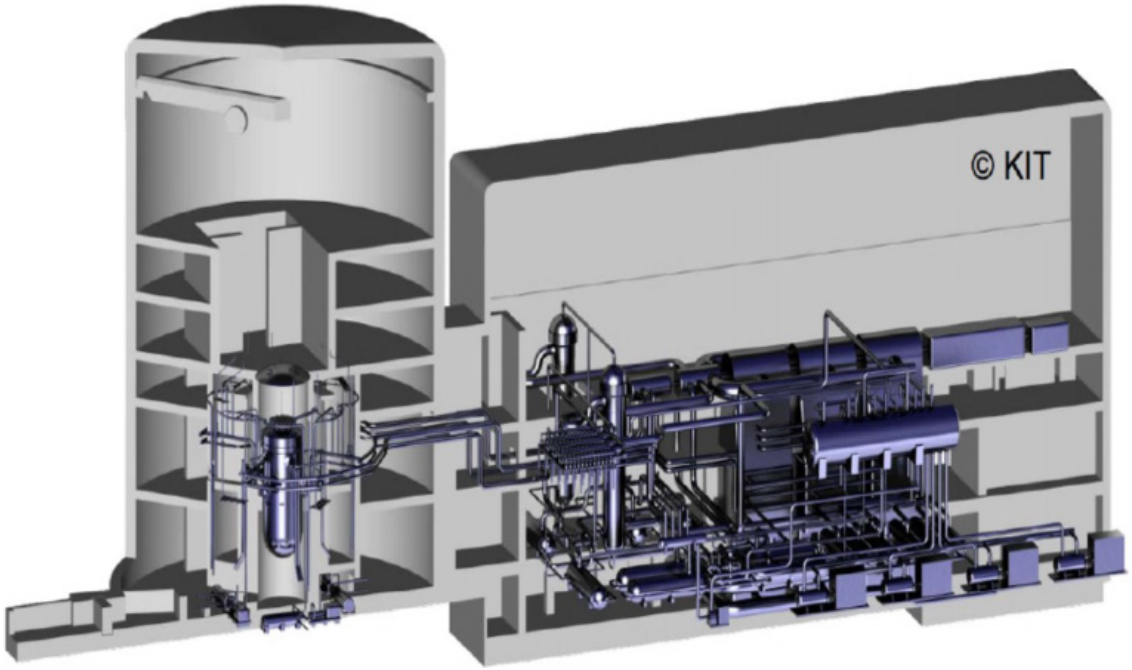
VŠCHT se v oboru výzkumu materiálů pro SCWR zaměřuje především na použití elektrochemických metod pro charakterizaci korozního chování materiálů, a to i „in-situ" během experimentu. Elektrochemické metody umožňují změřit elektrické vlastnosti rozhraní kov/oxid/prostředí a při in-situ experimentech získat informace o vývoji těchto vlastností v čase. VŠCHT disponuje dvěma autoklávy s možností instalace elektrodového systému.

CVŘ se věnuje výzkumu SCWR od roku 2005 a již v roce 2006 bylo členem konsorcia HPLWR Phase 2 (tehdy ještě jako Ústav jaderného výzkumu Řež). V následujících iniciativách, v jejichž konsorciích jsou zastoupeny instituce z celého světa, vystupuje CVŘ jako koordinátor (projekt SCWR–FQT a ECC–SMART). V rámci projektů SUSEN (15) a ECC–SMART byla nebo jsou budována zařízení pro zejména materiálový výzkum v prostředí superkritické vody, a to i pro ozářené materiály (superkritická vodní smyčka simulující mj. i reálný průtok chladicího média, superkritické expoziční autoklávy a ultrakritická vodní smyčka, vše viz Obrázek 1).

Aktuálnost a potřeba realizovaných aktivit je zajištěna jak členstvím v mezinárodních výzkumných konsorciích, tak členstvím v oborových platformách – např. v řídicích výborech a pracovních skupinách GIF, European Energy Reasearch Allience Joint Programme of Nuclear Materials (EERA JPNM), Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA) a The Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP).

Obr. 2: Projekty zaměřené na vývoj superkritickou vodou chlazeného reaktoru v EU



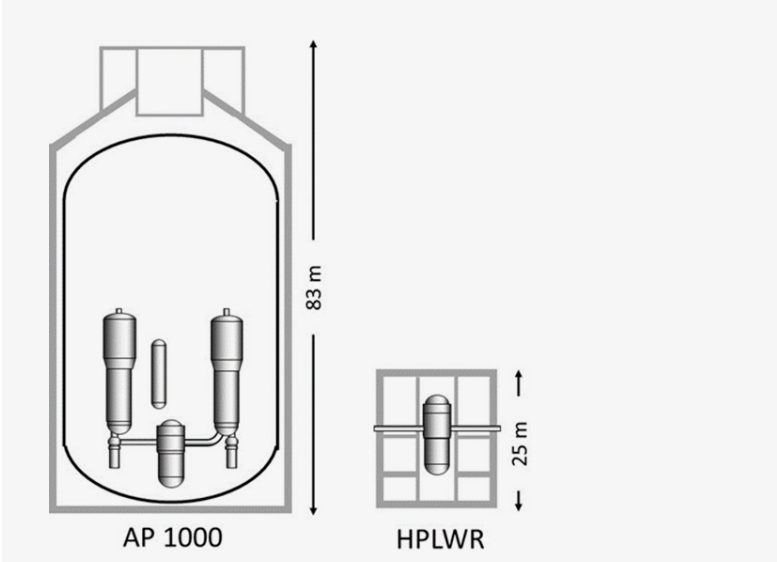


PROJEKTY FINANCOVANÉ EVROPSKOU KOMISÍ

Myšlenka vývoje SCWR je rozvíjena v mezinárodních projektech v rámci Evropy od roku 2000. Koncept si prošel standardní cestou od vlastních základů designu a studie proveditelnosti budoucí technologie (projekt HPLWR), po následné návrhy komponent, ověřování korozní a mechanické odolnosti konstrukčních materiálů v pracovním médiu (HPLWR Phase 2 a SCWR-FQT). Dalším krokem k demonstrátoru je provedení testu kvalifikace paliva, neboť palivo a jeho integrita je jedním z klíčových parametrů pro budoucí provoz reaktoru typu SCWR. Novým směrem vývoje je návrh realizace technologie SCWR jako malého modulárního reaktoru (projekt ECC-SMART). Jednotlivé projekty řešené v Evropském výzkumném prostoru jsou znázorněny na časové ose, viz Obrázek 2.

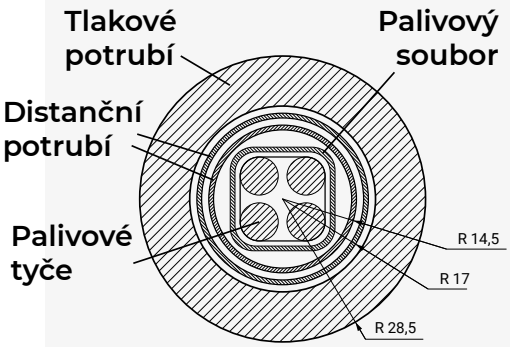
HPLWR PHASE 1 A 2

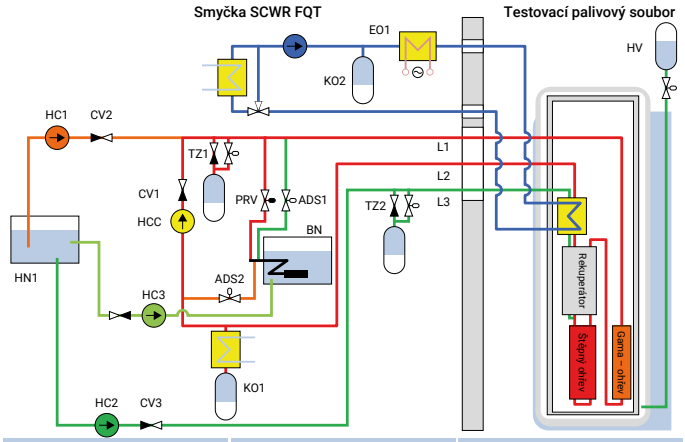
V srpnu 2000 byla zahájena 1. fáze projektu HPLWR – vývoje superkritickou vodou chlazeného reaktoru v EU. V rámci dvouletého projektu byly shrnuty veškeré předpoklady nutné pro zahájení konstrukčních a vývojových prací pro nový typ reaktoru, který v sobě spojuje výhody jaderného reaktoru tlakovodního i varného typu a dlouholeté zkušenosti s provozem superkritickou vo-



Obr. 3: Projekt HPLWR Phase 2: a) Koncept HPLWR reaktoru (12) b) Porovnání velikosti reaktorové nádoby reaktoru AP 1000 a HPLWR při projektovaném výkonu 1 000 MW (19)

Obr. 4: Projekt SCWR-FQT: a) Průřez palivovým souborem a b) zjednodušené schéma smyčky





ADS Automatický systém odtlakování	HC Havarijní cirkulační čerpadlo	KO Objemový kompenzátor
BN Barbotážní nádoba	HCC Hlavní cirkulační čerpadlo	PRV Bezpečnostní ventil
CV Ovládací ventil	HN Havarijní nádrž smyčky	TZ Tlakový zásobník
EO Elektrický ohřívák	HV Havarijní nádrž reaktoru	

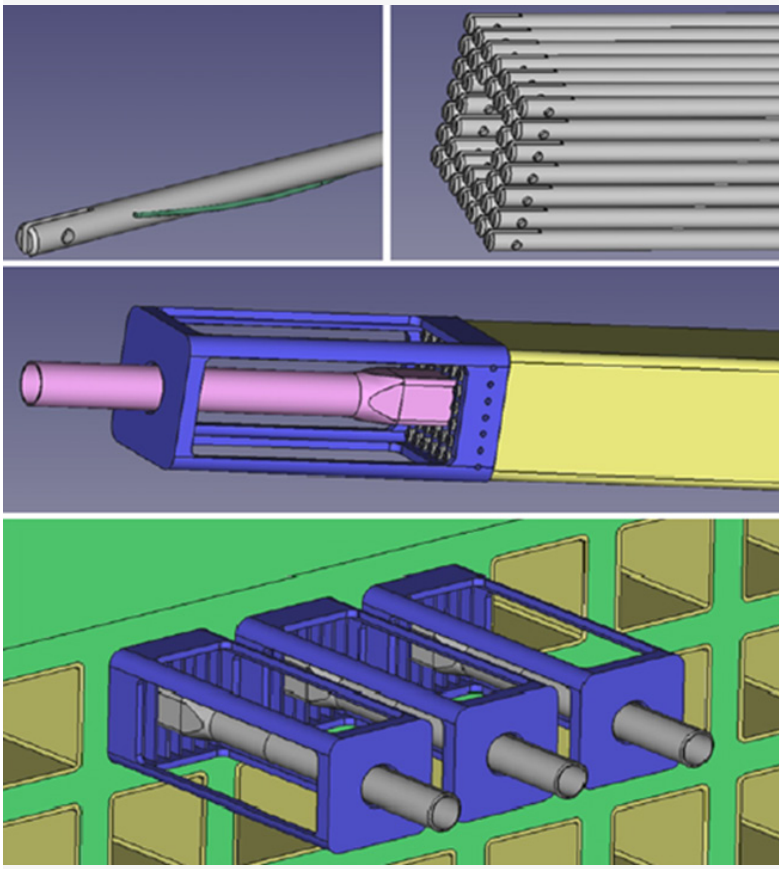
dou chlazených fosilních bloků (16). Projekt se soustředil na variantu s tepelným spektrem neutronů, přičemž rychlému reaktoru se věnovaly spíše výzkumné týmy v Japonsku (17). Jednou z hlavních výzev projektu bylo definovat materiál pro pokrytí paliva tak, aby vyhovoval z korozního hlediska, ale zároveň neúměrným způsobem nezhoršoval účinnost systému záchytem neutronů (18). První fáze projektu HPLWR tedy definovala hlavní výzkumná témata, jimž je třeba věnovat pozornost v následujících letech, aby mohl být reaktor vybudován do fáze demonstrátoru.

Zvýšené parametry chladiva umožnily vyvíjet reaktor s vyšší účinností, není to ale jediná výhoda tohoto typu reaktoru oproti stávajícím instalacím. Díky výrazně zjednodušenému a zmenšenému primárnímu okruhu (viz Obrázek 3) dosahuje koncept HPLWR o výkonu 1 000 MW účinnosti 43,5 % a 20% úspory v investičních nákladech v porovnání s technologií založenou na LWR konceptu. Jednou z hlavních příčin úspor jsou, jak zjednodušení a zmenšení bloku (jak je patrno z Obrázku 3), tak i zvýšení termodynamické účinnosti systému díky vyšším parametrům pracovního média a zjednodušení primárního okruhu v důsledku absence fázového přechodu pracovního média (20).

SUPERCRITICAL WATER REACTOR – FUEL QUALIFICATION TEST

Projekt SCWR-FQT neboli kvalifikační test paliva pro SCWR, byl společným evropsko-čínským projektem (21), který byl realizován v letech 2011 až 2014. Hlavními vědeckými cíli projektu bylo navrhnout konstrukci experimentálního zařízení pro výzkumný reaktor LVR-15 v Řeži v České republice, určeného pro testování palivového článku malého rozsahu za podmínek panujících ve výparníku reaktoru HPLWR, dále realizovat zkušební provoz souboru na elektricky vyhřívaném, ale jinak identickém zkušebním souboru, provést materiálové zkoušky vybraných materiálů pro pokrytí paliva, a validovat kódy pro termo-hydraulické výpočty proudění v palivových článcích SCWR pomocí výsledků výše uvedeného zkušebního provozu.

Palivový článek, jenž je předmětem kvalifikačního testu, je umístěn ve spodní části aktivního kanálu ve výšce, která odpovídá umístění aktivní zóny reaktoru LVR-15. Soubor se skládá ze 4 palivových proutků o průměru 8 mm a roztečí 9,44 mm uvnitř čtvercové trubky, viz Obrázek 4 a). Tato konstrukce odpovídá rozměry i konstrukcí palivovému souboru reaktoru HPLWR (12). Celková délka proutků je 709 mm, což zahrnuje prostor pro hroma-



Obr. 5: Projekt ECC-SMART: a) navrhovaný palivový soubor (B) a část aktivní zóny a b) návrh ozařovacího experimentu

dění plynných štěpných produktů, mechanizmy pro kompenzaci tepelné roztažnosti a uzávěry. Skutečná výška paliva je omezena na 600 mm tak, aby odpovídala výšce aktivní zóny reaktoru LVR-15. S obohacením 19,7 % ^{235}U dosahují všechny 4 proutky celkového výkonu 64 kW. Teplota vody na vstupu a výstupu vody ze zkušební sekce je 366 °C, respektive 386 °C, jmenovitý provozní tlak je 25 MPa a jmenovitý průtok v aktivním kanálu je 900 kg·h^{-1} (22). Tyto provozní podmínky představují nejzatíženější část výparníku HPLWR s nejvyšším tepelným tokem, při kterém hrozí krize přestupu tepla (23).

Vzhledem k přítomnosti jaderného paliva uvnitř smyčky a vzhledem k tomu, že účelem zkoušek má být kvalifikace palivového článku na provozních parametrech bez toho, aniž by došlo k poruše pokrytí, byly bezpečnostní systémy (viz Obrázek 4 b)) navrženy tak, aby dokázaly zabránit projektovým haváriím (24). Celistvost palivových proutků je dále zajištěna použitím certifikované korozivzdorné oceli. Za tímto účelem byly provedeny korozní a mechanické zkoušky (např. Slow Strain Rate Test – SSRT) několika materiálů, na základě kterých byla pro pokrytí paliva vybrána korozivzdorná ocel 316L (25), (26). Další materiálové experimenty zahrnovaly testování mock-upu palivového proutku simulací dvou různých havarijních stavů (27), a konečně v Číně byl testován celý palivový (ale elektricky vyhřívaný) článek za stacionárního a několika transientních stavů (28).

JOINT EUROPEAN-CANADIAN-CHINESE DEVELOPMENT OF SMALL MODULAR SUPERCRITICAL WATER-COOLED REACTOR TECHNOLOGY

Poslední zahájenou iniciativou je projekt ECC-SMART. Zaměřením projektu je budoucí technologie malého modulárního reaktoru chlazeného superkritickou vodou (SCW-SMR). Jedná se zejména o bezpečnostní a provozní aspekty, navržení základních požadavků na design, a to zejména s ohledem na budoucí proces licencování této technologie. Z tohoto pohledu projekt vybírá (i na základě zkušeností z projektů řešených v minulosti) kritická témata pro budoucí proces licencování – kvalifikaci materiálů pokrytí paliva, validaci systémových a computational fluid dynamics kódů a návrh aktivní zóny budoucího SCW-SMR.

Projekt pokrývá většinu členů řídicího výboru GIF SCWR. Konsorcium je tvořeno 20 partnery z EU, Ukrajiny, Kanady a Číny,

díky tomu využívá kompetence nejvýznamnějších výzkumných týmů pracujících v oblasti vývoje SCWR ve světovém měřítku. Jako příklad prvních výsledků realizace projektu je návrh palivové kazety – viz Obrázek 5 a), neboť design a parametry aktivní zóny jsou jedním z nejdůležitějších aspektů budoucího provozu SCW–SMR. ECC–SMART je navíc prvním projektem, který do hodnocení a kvalifikace materiálů pro SCWR zahrne i vliv radiace na konstrukční materiál určený pro pokrytí paliva. Schematický návrh plánovaného experimentu v reaktoru LVR-15 (Řež, Česká republika) je znázorněn na Obrázku 5 b). Projekt je v začátku a na výsledky si budeme muset ještě chvíli počkat. Nicméně předpoklady pro úspěšné naplnění cílů a zahájení komplexního vývoje SCW–SMR jsou více než slibné.

Ing. et Ing. Markéta Kryková, Ph.D.

marketa.krykova@cvrez.cz

Působí jako zástupkyně ředitele sekce Výzkum a vývoj v energetice ve společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o. Je absolventkou VŠCHT v Praze a ČVUT v Praze. Působí jako členka výkonného výboru EERA JPNM a jako místopředsedkyně a zástupce Euratom v řídicím výboru pro vývoj superkritickou vodou chlazeného jaderného reaktoru v rámci platformy Generation IV International Forum. Má bohaté zkušenosti s účastí v mezinárodních projektech investičního i výzkumného charakteru (OP VaVPI, OP VVV, FP7, Horizon 2020). Je koordinátorkou evropsko-čínsko-kanadského projektu ECC-SMART, jehož tématem je vývoj superkritickou vodou chlazeného malého modulárního reaktoru.

Reference:

1. The Generation IV international forum. [Online] [Citace: 30. duben 2020.] https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public
2. Zychová M., Růžičková M., Macák J., Janda V. Vlastnosti a použití superkritické vody. Chemické listy. 107, 2013, stránky 126–135
3. Kritzer, Peter. Corrosion in high-temperature and supercritical water and aqueous solutions: a review. The Journal of Supercritical Fluids. 29, 2004, Sv. 1–2
4. Skupina ČEZ. Elektrárna Ledvice. [Online] ČEZ. [Citace: 11. květen 2020.] https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarna-ledvice-58177
5. CORDIS HPLWR. https://cordis.europa.eu/project/id/FIKI-CT-2000-00033. [Online]
6. CORDIS HPLWR Phase 2. https://cordis.europa.eu/project/id/36230. [Online]
7. CORDIS SCWR-FQT. https://cordis.europa.eu/project/id/269908. [Online]
8. ECC-SMART. https://ecc-smart.eu/. [Online]
9. SuperCritical Water-cooled Reactors. Zang J., Huang Y.P., Walters L., Krykova M., Sedov A., Yamaji A. Weihai, Shandong, China : 48th GIH PG and 42ndEG Meeting, October 14–18, 2019
10. A. A. Sedov, B. Pustovalov. NPP with SCW Nuclear Power Installation. Prague, Czech Republic: 10th International Symposium on SCWRs (ISSCWR-10), March 15–19, 2021.
11. Chen Lin, Iwamoto Yuhiro. Advanced Applications of Supercritical Fluids in Energy Systems. Hershey, United States of America : IGI Global, 2017. ISSN:2327-5448
12. T. Schulenberg, J. Starflinger. High Performance Light Water Reactor Design and Analyses. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012. ISBN 978-3-86644-817-9.
13. Zheng, David Guzonas, Radek Novotny S. Pentilla, Aki Toivonen Wenyue. Materials and Water Chemistry for Supercritical Water-cooled Reactors. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. ISBN: 9780081020494
14. Schulenberg T., Visser D. C. Thermal-hydraulics and safety concepts of supercritical water cooled reactors. Nuclear Engineering and Design. 264, 2013, https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.08.040
15. www.susen2020.cz. [Online]
16. D. Squarer, T. Schulenberg, D. Struwe, Y. Oka, D. Bittermann, N. Aksan, C. Maraczy, R. Kyrki-Rajamäki, A. Souryi, P. Dumaz. High performance light water reactor, Nuclear Engineering and Design 221, pp. 167–180 (2003)
17. Y. Oka, S. Koshizuka, Y. Ishiwatari, A. Yamaji, Super Light Water Reactors and Super Fast Reactors, Springer, ISBN 978-1-4419-6034-4, 2010
18. K. Ehrlich, J. Konys, L. Heikinheimo. Materials for High Performance Light Water Reactors, Journal of Nuclear Materials 327 (2004) 140–147.
19. M. Kryková, T. Schulenberg, M. Arnoult Růžičková, A. Sáez-Maderuelo, I. Otic, S. Czifrus, L. Cizelj, G. L. Pavel. European Research Program on Supercritical Water-Cooled Reactor . ASME J. of Nuclear Rad Sci. https://doi.org/10.1115/1.4048901, 2021, Sv. 2, 7
20. J. Starflinger, T. Schulenberg, D. Bitterman, J.-A. Lycklama, M. Andreani, A. Toivonen. HPLWR Public Final Activity Report . [Online] 2010. https://cordis.europa.eu/project/id/FIKI-CT-2000-00033
21. Růžičková, M., Vojáček, A., Schulenberg, T., Visser, D. C., Novotný, R., Kiss, A., Maráczy, C., and Toivonen, A. (December 9, 2015). „European Project "Supercritical Water Reactor–Fuel Qualification Test": Overview, Results, Lessons Learned, and Future
22. Vojáček, M. Růžičková, T. Schulenberg: Design of an In-Pile SCWR Fuel Qualification Test Loop. ASME J of Nuclear Rad Sci. Jan 2016, 2(1): 011003 (7 pages). https://doi.org/10.1115/1.4030872
23. J.D. Jackson, 2013, "Fluid flow and convective heat transfer to fluids at supercritical pressure", Nuclear Engineering and Design, 264, pp. 24–40
24. T. Schulenberg, A. Vojáček, T. Zeiger, M. Raqué: „Risks and Safety Analyses of an SCWR Fuel Qualification Test Loop", Proc. ISSCWR-6, Paper 13014, Shenzhen, Guangdong, China, March 3–7, 2013
25. Novotný, R., Janík, Premysl P., Toivonen, A., Ruiz, A., Száraz, Z., Zhang, L., Siegl, J., Haušild, P., Penttilä, S., Macák, J. (2016). European Project "Supercritical Water Reactor – Fuel Qualification Test": Summary of General Corrosion Tests. Journal
26. P. Janík, R. Novotný, K.F. Nilsson, J. Siegl, P. Haušild. Pre-qualification of cladding materials for SCWR fuel qualification testing facility – stress corrosion cracking testing. The 6th International Symposium on Supercritical Water-cooled Reactors
27. Novotný, R., Visser, D., Timke, T., Vojáček, A., Frýbort, O., Siegl, J., Haušild, P., and Macák, J. (June 17, 2016). „European Project "Supercritical Water Reactor–Fuel Qualification Test": Results of Fuel Pin Mock-up Tests." ASME. ASME J of Nuclear
28. Schulenberg, T., and Li, H. (December 4, 2017). „Transient Heat Transfer in an Out-of-Pile SCWR Fuel Assembly Test at Near-Critical Pressure." ASME. ASME J of Nuclear Rad Sci. January 2018; 4(1): 011005. https://doi.org/10.1115/1.4038061

Evaluation of the Effectiveness and Economics of Varying Renewable Energy as a Means for Abating Global Warming (Part 2)

Agustin Alonso [1], Barry Brook [2], Juan Eibenschutz [3], Carlo Lombardi [4], Kazuaki Matsui [5], Jozef Mišák (6), Guido Possa [7], Jan van Erp [8]

[1] Madrid Polytecnic University (Spain)

[2] University of Tasmania (Australia)

[3] Comision Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (Mexico)

[4] Politecnico di Milano (Italy)

[5] Institute of Applied Energy; OECD-NEA Nuclear Development Committee (Japan)

[6] ÚJV Řež, a. s. (Czech Republic)

[7] Government of Italy (Italy)

[8] Illinois Commission on Atomic Energy; Westinghouse (USA)

Článek pojednává o omezeních přerušovaných obnovitelných zdrojů energie (OZE) s hlavními závěry, že (a) klimaticky příznivý účinek výroby energie bez CO_2 pomocí OZE bude snížen nebo eliminován ztrátou tepelné účinnosti záložních zdrojů, (b) únik zemního plynu využívaného záložními plynovými turbínami do atmosféry sníží nebo eliminuje příznivý účinek elektráren s OZE, (c) elektrárny s OZE pravděpodobně nebudou ekonomicky životaschopné bez dotací a upřednostňujících regulací, (d) vyšší procento OZE v elektrické síti bude mít za následek neúměrně vyšší náklady na kWh, (e) elektrárny s OZE připojené k síti mají za následek snížení spolehlivosti sítě, (f) přítomnost zdrojů OZE v elektrické síti vylučuje možnost stejných podmínek pro ostatní výrobce.

The paper discusses the limitations of the varying renewable energy (VRE) sources with the main conclusions that (a) the climate-related beneficial effect of the CO_2-free energy produced by VRE plants will be reduced or eliminated by the loss in thermal efficiency of the backup generators, (b) leakage into the atmosphere of natural gas used by backup gas turbines will reduce or eliminate the beneficial effect of VRE plants, (c) VRE plants are not likely to be economically viable without subsidies and favouring regulations, (d) higher percentages of VRE on the electric grid will result in disproportionately higher kWh costs, (e) grid-connected VRE plants have the effect of reducing grid reliability, (f) the presence of VRE plants on the electric grid excludes the possibility of a level playing field for other generators.

Summary

Humanity has arrived at a critical point in history, requiring major decisions that will have long-term, global consequences. Among the topics requiring urgent attention are global warming and the availability of a sustainable food and energy supply for all of humanity. This study is primarily intended to evaluate the energy-related aspects of global warming but addresses indirectly also sustainable energy supply. Feasible options for abatement of global warming appear to be already available, but a unified policy is currently lacking because political action groups advocate different approaches. While energy from nuclear fission has proved to be an effective means for reducing atmospheric emissions of anthropogenic greenhouse gas (AGHG), its use is vigorously opposed by socio-political groups that advocate heavy reliance on varying renewable energy (VRE) sources (mainly wind and solar plants, backed up by gas turbines).This study is intended to contribute to this subject by evaluating the contribution that VRE might be able to make towards abatement of climate change, as well as the associated economics.

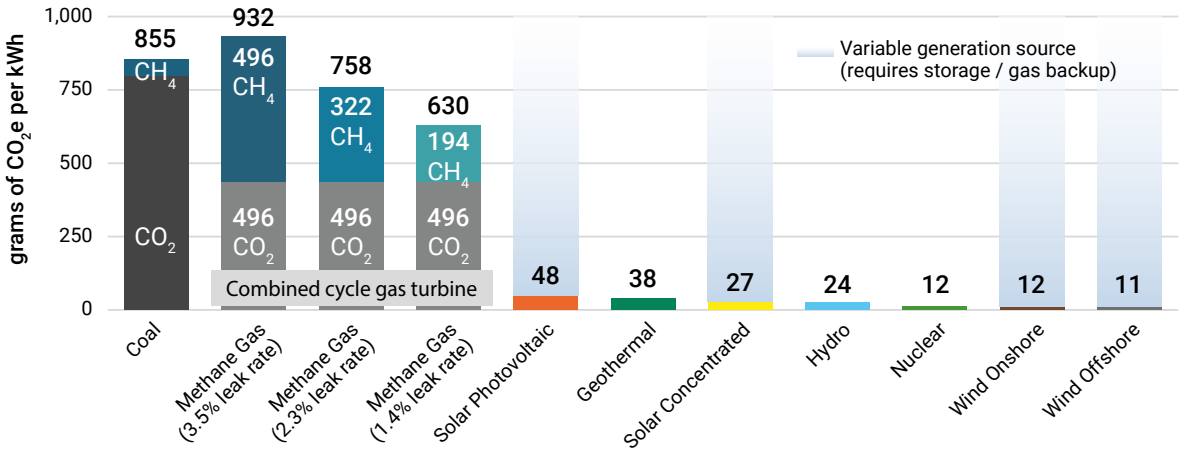
In summary, the main conclusions that were reached are (a) the climate-related beneficial effect of the CO_2-free energy produced by VRE plants will be reduced or eliminated by the loss in thermal efficiency of the backup generators due to the rapidly changing load requiring high ramp rates, and the lack of flexibility of combined-cycle gas turbines, (b) leakage into the atmosphere of natural gas used by backup gas turbines will reduce or eliminate the beneficial effect of CO_2-free energy produced by VRE plants, based on the IPCC values for the global warming potential (GWP) of atmospheric methane, (c) VRE plants are not likely to be economically viable without subsidies and favouring (positively-biased) regulations, (d) higher percentages of VRE on the electric grid will result in disproportionately higher kWh costs, (e) grid-connected VRE plants have the general effect of reducing grid reliability, which will have deleterious social and economic consequences, (f) the presence of VRE plants on the electric grid excludes the possibility of a level playing field for other generators on the grid.

A conclusion, unrelated to VRE, is that replacing coal-fired stations by gas-fired stations will not result in a climate-related beneficial effect if the leakage into the atmosphere of used natural gas exceeds about 4 % (based on IPCC values of GWP for atmospheric methane).

DISCUSSION ON LIMITATIONS OF VRE

Much confusion and misleading information exists regarding VRE on the electric grid. Most of this is due to incomplete and biased reporting. E.g., proponents of VRE often state that a specific VRE park will deliver enough energy for a specified high number of households. This is misleading advertising practice because usually no mention is made of the fact that the backup gas turbines are producing the major part of the energy. In fact, without backup gas turbines, the households would be sitting in the dark for much of the time. Furthermore, VRE proponents will often imply to have an emission-free generating capacity equal to that of the nameplates of the wind turbines. However, it usually is not mentioned that the actually produced CO_2-emission-free energy is only a small fraction of the installed nameplate capacity. Furthermore, most likely no mention is made of the fact that this emission-free component is, to a large extent (or fully), eliminated by the increased use of fuel by the backup gas turbines due to the loss in thermal efficiency and the limited flexibility of CCGTs, as well as due to leakage into the atmosphere of natural gas (figure 1; more conservative estimates of greenhouse gas releases are available).

Given the low production factors of land-based wind turbines in many countries (including Western Europe), one may well wonder why it was deemed socially and economically justified to install them, notwithstanding the fact that nuclear energy offers a much more effective means to reduce CO_2 emission. This matter becomes even more questionable in view of the disappointing



Sources: Intergovernmental Panel on Climate Change (2014, 2018), EDF (2018), de Gouw (2014), Howarth (2019)

Fig. 1: Lifetime CO_2 and CH_4 emissions by electricity source

fact is that the actual VRE-related reduction in CO_2 emission is rather small or even negative. It is therefore truly deplorable that these very costly construction programs of land-based wind turbines were forced on the affected population, often against strong local opposition, including complaints about visual-horizon pollution, killing of protected birds and bats and noise/light disturbance. Similar considerations are valid for offshore wind turbines where the attained reduction in CO_2 emission is low or non-existent and the cost of construction and maintenance is very high. Moreover, the construction and maintenance of off-shore wind turbines is not without danger for the work crews and may well result in numerous human fatalities.

Countries wishing to substantially reduce or eliminate anthropogenic CO_2 emissions are not likely able to do so without nuclear energy [1, 2, 3, 4, 5]. Excluding nuclear energy implies either continued large-scale dependence on the combustion of fossil fuels, entailing long-term deleterious climatic consequences, or, if relying heavily on VRE, long-term irreparable economic damage with serious social and health consequences. The only exception to this may be for countries with a large hydropower capacity and/or an energy storage capacity that is economically viable.

Some countries and organizations seem to have come to the conclusion that a 'symbiotic' coexistence between VRE and nuclear energy is possible and desirable [6]. In this connection, some persons have stated that "nuclear energy is the 'enabler' of large-scale deployment of VRE". They seem to propose using nuclear power plants for VRE backup instead of backup by gas turbines. However, the term 'symbiosis' implies a mutually beneficially relationship which in this case is not valid because there is nothing 'symbiotic' about an arrangement, in which nuclear energy is forced into the disadvantaged position of serving as 'slave' for VRE. This disadvantage would be the similar for any other backup dispatchable energy source with the exception of hydro power. Nuclear power plants are, however, more disadvantaged to function as backup to VRE than gas turbines because the nuclear kWh cost is determined by high upfront capital and investment cost and very low fuel cost, whereas the kWh produced by gas turbines is characterized by relatively low initial investment and relatively high fuel cost. Furthermore, if nuclear power plants are available to serve as backup for VRE, why then not dispense completely with the VRE and just keep the nuclear energy? It would be very effective as regards GHG reduction and would be less complicated and much less costly.

It is of great importance to consider that VRE sources are highly vulnerable to extreme weather conditions (severe storms, hail, freezing rain, etc.). The occurrence of an event that would deprive a large group of people for a long time of its needed electrical energy supply, has a probability that is considerably higher for VRE than for nuclear energy. The reason is that VRE plants are without protection against extreme weather, being highly exposed and spread out over a large area. Nuclear power plants occupy a small area and are well protected, having been designed to withstand severe external events.

Why did (and do) so many industrially developed countries spend so much effort and financial resources on these ineffective and costly VRE construction programs? The answer can be found, to a large extent, in the strong advocacy by the international 'green movement' in favour of VRE and its strong opposition to nuclear energy. This is, among others, illustrated by the fact that the environmental organizations have exerted (and still exert) much influence within the United Nations' climate organization (UN-FCCC), having (among others) caused it to 'ban' nuclear energy during the COP-6 conference (Bonn, 2001) by excluding nuclear energy from the so-called Clean Development Mechanisms (CDM) on their argued grounds that nuclear energy is unsustainable, as is shown in the following excerpts from the COP-6 agreement:

Article 6, Project Activities: To recognize that Parties included in Annex I are to refrain from using emission reduction units generated from nuclear facilities to meet their commitments under Article 3.1;

Article 12, Clean Development Mechanism: To recognize that Parties included in Annex I are to refrain from using certified emission reductions generated from nuclear facilities to meet their commitments under Article 3.1.

Discussion of the merits of nuclear energy was excluded during COP-6 and subsequent UN-FCCC meetings, completely ignoring the compelling case that nuclear fission technology offers humanity an inexhaustible source for millions of years of safe, clean, reliable energy with very low CO_2 emission [7].

A petition to rescind this 'ban' [8], directed by the International Nuclear Societies Council (INSC) to the UN Secretary General, Kofi Annan, has remained unanswered. Furthermore, the green movement caused the EU Commission to require that all the EU member states meet certain minimum quantitative requirements regarding the installation of VRE sources, while initially excluding nuclear energy.

Some countries (particularly in Western Europe) have passed laws indicating their intent to phase out nuclear power. The driving force for this is, to a large extent, attributable to the misinformation that has been disseminated during many years by the 'green movement' concerning, among others, past nuclear accidents and about unrealistic expectations on the large-scale potential of VRE. Past nuclear accidents were certainly serious events, but they have been few and their consequences were mainly economic while the loss of human life was small. Countries that have decided to turn away from nuclear energy can be expected to either continue being heavily dependent on the use of fossil fuels, or, if relying heavily on VRE, will suffer irreparable damage to their national economies with as consequence a serious lowering of the standard of living. Ironically and incongruously, some of the countries that are highly critical of nuclear energy show little reluctance in accepting a substantial part of their electrical energy supply from external nuclear sources.

Among the latest objections of the 'green movement' against nuclear energy is that nuclear power plants are costly and that it takes at least ten years to build them. This may be true for the construction of a single unit of a new design, but it does not have to be the case for large series of standardized designs that have received prior certification from the regulatory authority. The cost of a nuclear power plant is determined by the number of units in the series and the time it takes to build. That nuclear power plants can be built on time and within budget [9] has been demonstrated in the U.S.A. during the

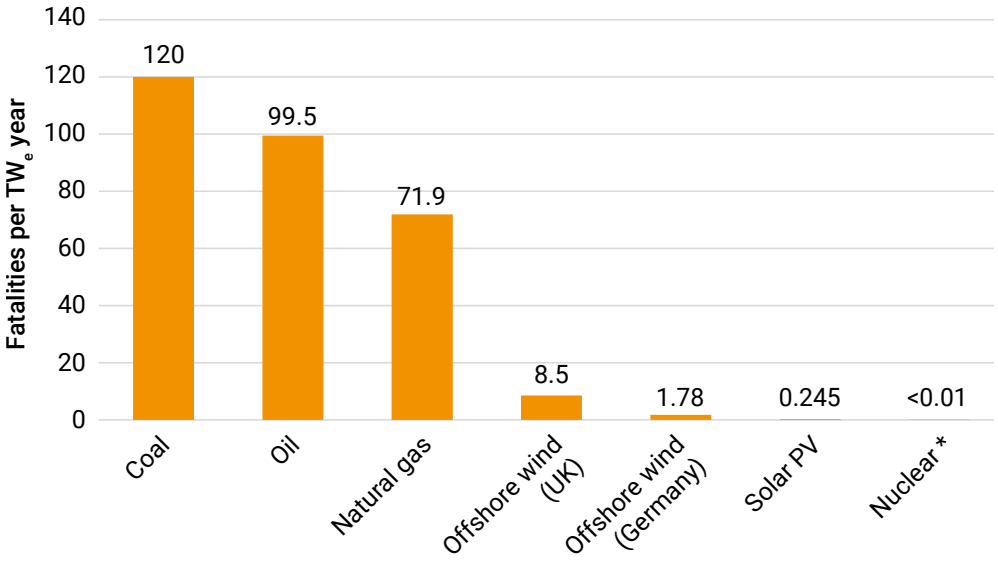


Fig. 2: Comparison of number of fatalities due to electricity generation (Source: The Silent Giant. The need for nuclear in a clean energy system, WNA, https://www.world-nuclear.org/getattachment/Our-Association/Publications/Position-statements/the-silent-giant/the-silent-giant.pdf.aspx)

1950s,1960s and 1970s, as well as in Western Europe (France, Italy, Spain, Sweden, Switzerland) and in Central Europe (Czech Republic, Slovakia, Hungary, Slovenia) and in Asia (Japan, South Korea, Taiwan).

The sustainability of the energy supply and the preservation of natural resources for future generations of humanity are issues that should have a high priority. Why then were no objections raised by the 'green movement' against the large-scale use of natural gas in the backup gas turbines of VRE plants? Burning gas to produce electricity (with some 40 % being lost via the cooling water) is a wasteful use of an irreplaceable natural resource. Using natural gas for space heating (residences, commercial spaces) can be justified in the intermediate term on the ground that about 93 % of the combustion heat is being utilized and that it reduces air pollution. Long term, space heating can be done electrically (directly or through heat pumps), using electric energy produced by nuclear power plants, as already done in high-rise buildings in some large cities. It could also be done by specialized nuclear power plants feeding subterranean urban heating networks.

If the 'green movement' were truly committed to abating climate change by reducing anthropogenic GHG emissions — as an existential concern that should trump other ideological considerations (e.g., fear of, and historical objection to, nuclear energy) — then it should revise its policies and re-direct its efforts so as to advise the governments of industrially advanced countries to replace all the fossil-fired electricity generating capacity within the coming two decades with nuclear power plants. This would allow more time for the other less-industrial countries to enact appropriate measures. In doing so, the green movement would not only serve its objective of combating climate change, it would also contribute to saving large numbers of lives (figure 2) [10, 11], enhance the standard of living of millions, and eliminate, or substantially reduce, the negative impact on natural landscapes turned over to produce low-density VRE [12].

CONCLUSIONS

Countries, wishing to substantially reduce anthropogenic CO_2 emissions into the atmosphere, are not likely able to do so without nuclear energy. Excluding nuclear energy implies either continued dependence on the combustion of fossil fuels, or, if relying on large-scale deployment of VRE, will result in serious deleterious economic damage. The only exception to this may be for countries with large hydropower capacity.

The construction programs of land-based and offshore wind turbines as well as of solar installations, do little (or nothing) to achieve the

intended purpose of reducing anthropogenic CO_2 emissions and abating climate change if gas-fired turbines are used for backup.

Relatively small leakage rates (less than 3 %) of natural gas will eliminate most (or all) of the climate-related beneficial effect of CO_2-free energy from VRE sources (based on GWP data from the IPCC for atmospheric methane).

VRE plants are likely not economically viable, nor is it likely for them to become so, with the possible exception if large hydro power capacity is available. Furthermore, the possibility for economic viability diminishes substantially with increasing percentages of VRE on the grid.

Large-scale deployment of VRE will, in most cases, result in destruction of capital and irreparable damage to the economy with high-cost electricity for the consumers.

The presence of VRE plants on the electric grid excludes the possibility of a level playing field for any other type of generator on the grid.

VRE sources have a deleterious effect on the reliability of the electric grid, increasing the probability of delivery disruptions, including long blackouts with serious economic and social consequences. Moreover, VRE plants are highly vulnerable to extreme weather conditions.

Only few (if any) locations in the world have the combined atmospheric, climatic and geographic conditions that could make VRE an effective means for reducing CO_2 emissions that also would be an economically viable option for delivering energy to the electric grid.

A conclusion, unrelated to VRE, is that replacing coal-fired stations by gas-fired stations will not result in a climate-related beneficial effect due to a reduction of CO_2 emissions if the leakage of natural gas exceeds about 4 %, (this does not take into account natural gas released from coal mines).

The dream promoted by the international 'green movement' — of a world that is free of anthropogenic greenhouse gas emissions, based solely on VRE sources – is technically not feasible and economically not viable.

References:
1. Barry W. Brook, et al. 'Why Nuclear Energy is Sustainable and has to be Part of the Energy Mix', Elsevier Magazine, 2014
2. Agustin Alonso, et al. 'Why Nuclear Energy is Essential to Reduce Anthropogenic Greenhouse Gas Emission Rates', EPJ Nuclear Science and Technology, 1,3 (2015)
3. Jozef Misak. 'Essential Role of Nuclear Power for Implementation of Conclusions of Climate Conference 2015', IAEA Technical Meeting TM-52285, Amsterdam, Netherlands, June21–23, 2016
4. Alfred Voss. 'Can the Objectives of the "Energiewende" be Achieved?', Tenth International School on Nuclear Power, Warsaw, November 27–28, 2018
5. Alfred Voss. 'Energy and Sustainability – An Outlook', International Materials Forum, Bayreuth, 2006
6. Rafael Mariano Grossi, Director General IAEA. Presentation during the UN COP-25 climate conference in Madrid, Spain, 2019
7. Charles E. Till and Yoon I. Chang. 'Plentiful Energy', book, ISBN: 1466384606
8. Chang Kun Lee, Chairman, International Nuclear Societies Council (INSC). Letter to the Honorable Kofi Annan, Secretary General of the United Nations, 2001
9. Staffan A. Qvist, Barry W. Brook. 'Potential for Worldwide Displacement of Fossil-Fuel Electricity by Nuclear Energy in Three Decades Based on Extrapolation of Regional Deployment Data'
10. Pushker A. Kharecha and James Hansen. 'Prevented Mortality and Greenhouse Gas Emissions from Historical and Projected Nuclear Power', American Chemical Society Publications, March 2013
11. Pushker A. Kharecha and Makiko Sato. 'Implications of Energy and CO_2 Emission Changes in Japan and Germany after the Fukushima Accident', Elsevier Energy Policy, September 2019
12. Brook BW, Bradshaw CJA. 'Key role for nuclear energy in global biodiversity conservation'. Conserv Biol. 2015; 29:702–12

Ing. Jozef Mišák, Ph.D.

jozef.misak@ujv.cz

is a graduate and Ph.D. of the Czech Technical University in Prague, with more than 50 years of experience in nuclear engineering/nuclear safety. At present working in ÚJV Řež as Vice-President focusing on major nuclear safety projects nationally and internationally. Key expert in projects of European Commission and IAEA nuclear safety activities.

Infrastruktura horkých komor Centra výzkumu Řež 5. díl

Mgr. David Zoul, Ing. Markéta Koplová, Ph.D., Petra Krejčová
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

V tomto článku si klademe za cíl seznámit čtenáře s novým pracovištěm horkých komor, které bylo v uplynulých letech postaveno v Centru výzkumu Řež. Náš výzkumný program je zaměřen na strukturální diagnostiku a studium mechanických vlastností materiálů vystavených vysokým dávkám neutronové radiace v jaderných a termojaderných reaktorech. Dále se věnujeme výzkumu a vývoji špičkových technologií a materiálů v oblasti rychlých reaktorů a v oblasti termojaderné fúze. Získání komplexního popisu degradace strukturních a mechanických vlastností konstrukčních materiálů komponent jaderných reaktorů po dlouhodobé provozní expozici slouží k hodnocení jejich životnosti, spolehlivosti a bezpečnosti.

Původně neaktivní kovový materiál je vystaven vysokému neutronovému toku, tlaku, teplotě, chemickým vlivům prostředí. Vzniklý materiál s vysokou aktivitou je v horkých komorách přetvořen na vzorky vhodného tvaru a rozměru, které jsou pak podrobeny mechanickým zkouškám a metalografickým analýzám (zkouška tahem, vrubové houževnatosti rázem, lomové houževnatosti, rychlosti růstu trhliny při cyklickém zatěžování a za zvýšených teplot, malocyklové únavy a creepu). Hodnocení degradace materiálů je založeno na zkoumání mikrostruktury metalurgických vzorků po mechanické zkoušce. Další užitečnou informaci přináší stanovení prostorové distribuce aktivity ve vzorku.

V této části představíme aktivní systémy radiační ochrany na našem pracovišti, metody zachytávání kapalných radioaktivních odpadů, gama spektrometrické systémy pro charakterizaci radioaktivních vzorků, odpadů, aj.

In this article, we aim to acquaint our readers with the new workplace called hot cells, which was built in Research centre Řež in recent years. Our research programme is focused on structural diagnostics and study of mechanical properties of materials exposed to high doses of neutron radiation in nuclear and thermonuclear reactors. Furthermore, it contains the research and development of high technology and materials in the field of fast reactors and thermonuclear fusion. Obtaining a comprehensive description of degradation of structural and mechanical properties of construction materials for nuclear reactor components after long-term operational exposure serves to assess their durability, reliability, and safety.

The originally inactive metal material is exposed to high neutron flux, pressure, temperature, and environment. The resulting highly active material is cut into samples of suitable shape and size, which are then subjected to mechanical testing and metallographic analysis (tensile, fracture toughness, crack growth rate under cyclic loading and elevated temperatures, low-cycle fatigue and creep tests) in hot cells. Evaluation of material degradation is based on the examination of the microstructure of metallurgical samples after mechanical testing. Another useful information is the determination of the spatial distribution of activity in the sample.

In this part we will introduce the active radiation protection systems at our site, methods for the capture of liquid radioactive waste, gamma spectrometric systems for the characterization of radioactive samples, waste, etc.

Obr. 1: Terminál elektronické osobní dozimetrie (TEOD)

1. ÚVOD

V tomto dílu vás blíže seznámíme s aktivními systémy radiační ochrany na našem pracovišti, s dozimetrickými přístroji, sondami a monitory. Dále se budeme věnovat způsobům záchytu a likvidace kapalných radioaktivních odpadů, v závěru pak představíme polovodičový gama spektrometr využívaný pro charakterizaci radioaktivních vzorků a odpadů.

2. SYSTÉM ELEKTRONICKÉ OSOBNÍ DOZIMETRIE – SEOD

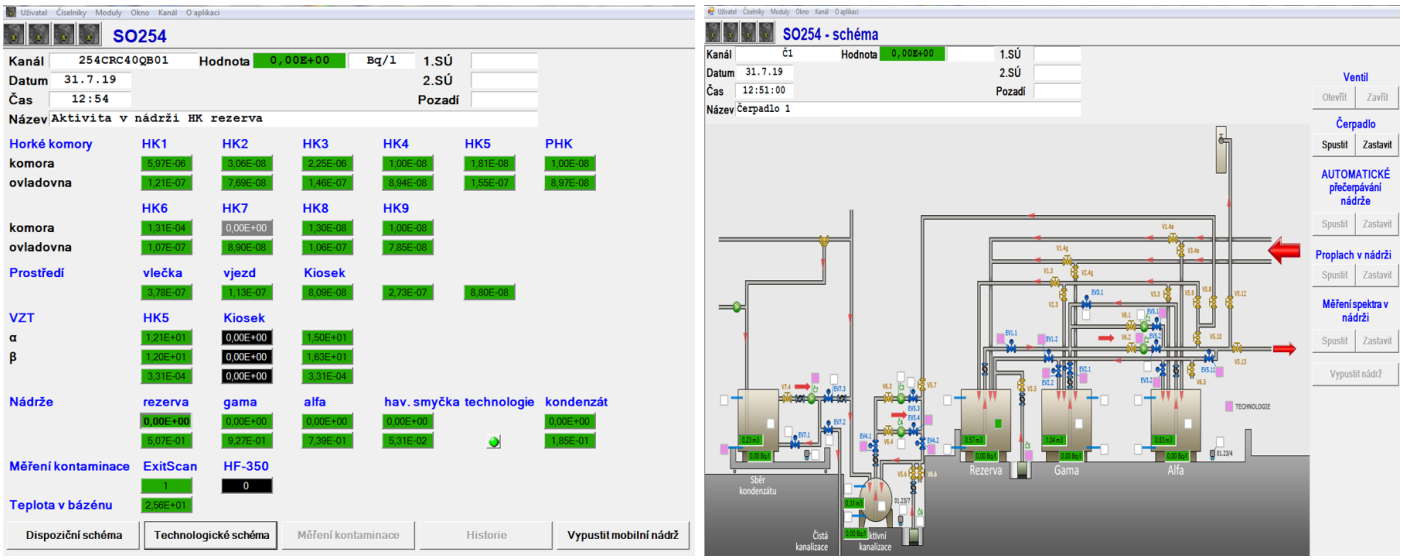
Kontrolované pásmo (KP) je vymezeno jako ucelená a jednoznačně určená část pracoviště, stavebně oddělená a se zajištěním proti vstupu nepovolané osoby – trvalý přístup mají pouze pracovníci kategorie A. Vstup do KP je označen znakem radiačního nebezpečí a upozorněním „Kontrolované pásmo se zdroji ionizujícího záření, vstup nepovolaným osobám zakázán."

Pohyb pracovníků v KP je řízen objektovým systémem SEOD (systém elektronické osobní dozimetrie). V něm probíhá archivace dat osobních dávek pracovníků a návštěv, dat z měření vnitřní kontaminace pracovníků na celotělovém počítači (CTP), vstupních školení z radiační ochrany (RO), vnitřního havarijního plánu (VHP), a bezpečnosti a ochrany zdraví při práci (BOZP), dob strávených v KP a výsledků měření povrchové kontaminace.

Vstup do KP je zabezpečen dveřmi s elektronickým zámkem na ID kartu. Při vstupu proběhne kontrola platných školení a zdravotní prohlídky zaměstnance prostřednictvím terminálu elektronické osobní dozimetrie – TEOD – (viz Obr. 1) napojeného na SEOD. Systém elektronické osobní dozimetrie vpustí pracovníka do KP až poté, co si v něm pracovník aktivuje přímo odečítací elektronický osobní dozimetr RAD 60S (viz Obr. 7).

3. CENTRÁLNÍ INFORMAČNÍ SYSTÉM RADIAČNÍ KONTROLY – CISRK

Provoz stacionárních dozimetrických systémů je řízen Centrálním informačním systémem radiační kontroly (CISRK). Mezi nejdůležitější ovládaná zařízení patří stacionární dozimetrické sondy MDG a AGM (viz kapitola 4.4), regulace pohybu osob a s ní spojených monitorů kontaminace, hlídání hladiny a aktivity kapalného RAO uvnitř záchytných nádrží,



Obr. 2: Příklady komunikačního rozhraní systému CISRK

možnost on–line přepouštění obsahu mezi jednotlivými nádržemi prostřednictvím vzdáleného ovládání elektroventilů a čerpadel.

Systém CISRK spravují dohlížející osoba (DO), osoby s přímým dohledem nad radiační ochranou (OPDRO), pracovníci dozimetrické kontroly (PDK), kteří odpovídají za nastavení oprávnění pracovníků, evidenci pravidelných školení (RO)/(VHP)/(BOZP), provoz objektu a administraci systému. Správa technologie sleduje pomocí administrátorských nástrojů CISRK pohyb osob po objektu, porušení režimových opatření, kamerové systémy, a především řídí havarijní stavy ve spolupráci s DO/PDK, popř. upozorňuje vedoucí pracovníky. DO/PDK mají navíc k dispozici statistiky měření osobních dávek filmové a elektronické dozimetrie a povrchové kontaminace na monitorech Exitscan-2E a HF-350 (viz kapitola 5.3).

Při výstupu provede pracovník kontrolu své povrchové kontaminace v průchozím monitoru ExitScan-2E (viz kapitola 5.3). Při negativním výsledku měření systém odblokuje elektronický zámek dveří. Při zjištění povrchové kontaminace systém nepustí pracovníka ven z kontrolovaného pásma a upozorní pracovníky dozimetrické kontroly (PDK), kteří zabezpečí dekontaminaci a opětovné přeměření pracovníka.

4. ZÁCHYTNÉ NÁDRŽE NA KAPALNÉ RADIOAKTIVNÍ ODPADY

Jsou určeny pro shromažďování a přechodné skladování kapalných radioaktivních odpadů (KRAO) z aktivní kanalizace a další činnosti: úkony na odebírání vzorků, na údržbu, opravy, kontrolní revize, provoz, přečerpávání a předávání kapalných RAO ke konečnému zpracování a likvidaci.

Záchytné nádrže na kapalné RAO se skládají z operátorovny pro dálkovou obsluhu technologického zařízení a 5 ks nádrží (1, 2, 3, 4, 5) vyrobených z nerezové chemicky odolné oceli AISI 316, umístěných v ochranných záchytných jímkách. Celá technologie se nalézá v prostoru pod komorami. Prostory jsou napojeny na centrální aktivní vzduchotechniku.

Do nádrže č. 1 stékají oplachové vody horkých komor (HK) 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9. Do nádrže č. 2 stékají oplachové vody z HK 5 a HK 10. Všechny oplachové vody projdou přes filtr pevných částic na hranici hermetického boxu (HB) a jsou sváděny z jednotlivých boxů HK potrubními trasami aktivní kanalizace do sběrných nádrží v technické hale pod HK. Nádrž č. 3 slouží jako rezervní kapacita – v případě mimořádné situace dokáže pojmout celý obsah jedné z nádrží na kapalné radioaktivní odpady.

Nádrž č. 4 je napojena na aktivní hygienické smyčky s filtrem pevných částic a výlevky v KP. Tato nádrž slouží zároveň jako stáčecí místo pro kapalné RAO, kde se provádí čerpání odpadů do velkoobjemových nádob, v kterých se dále RAO předává k likvidaci.

Nádrže 1, 2 a 3 lze v případě potřeby dostínit pomocí mobilních „paravánů" o tloušťce stínění 50 mm železa. Nádrž č. 4 je umístěna v kobce pod úrovní podlahy. Nádrž č. 5 je vyrobena z plastu. Je do ní sveden kondenzát z klimatizačních jednotek v KP.

Aktivita obsahu nádrží se stanoví prostřednictvím monitorů objemové aktivity kapalin (MAK), umístěných v každé z nádrží. Data z těchto sond jsou zavedena v informačním systému CISRK. Před přečerpáním obsluha provede zvíření objemu nádrží pomocí systému čerpadel, po zvíření se stanoví objemová aktivita odpadu. V případě potřeby je možno obsah každé z jednotlivých nádrží postupně automaticky přečerpat do kterékoli jiné nádrže. Maximální aktivita objemu na nádrž byla stanovena na 1 GBq pro ^{60}Co. Obsluha nádrží je prováděna vzdáleně přes řídicí systém CISRK.

Stáčení kapalného RAO do nádob k tomu určených pro předání k likvidaci probíhá po stanovení radionuklidového spektra, objemové aktivity jednotlivých nuklidů a příkonu dávkového ekvivalentu (PDE). Na základě těchto hodnot se zvolí vhodná nádoba k přečerpání, tak, aby PDE na jejím povrchu nepřesáhl 2 mSv/h.

Nádrže s kapalnými radioaktivními odpady jsou zajištěny proti přeplnění systémem CISRK a jejich zaplnění je kontrolováno systémem elektronických hladinoměrů. Nádrže jsou umístěny v ochranných jímkách, které pojmou s dostatečnou rezervou objem nádrže. Ochranné jímky jsou vodotěsné, opatřené signalizací úniku z nádrží a vybavené zařízením pro jejich odčerpání. Výpary z nádrží a jímek jsou odváděny aktivní vzduchotechnikou a zpracovávány jako radioaktivní odpady.

Skladují-li se kapalné radioaktivní odpady v nádobách, jsou podlaha a stěny skladu nepropustné do takové míry, aby bylo při úniku maximálního množství skladovaných kapalných radioaktivních odpadů zabráněno jejich proniknutí do životního prostředí.

Při zjištění kontaminace pokožky pracovníka musí být provedena dekontaminace uvnitř aktivní hygienické smyčky (Obr. 4), jejíž účinnost kontroluje měřením PDK. PDK rovněž dle úrovně kontaminace posoudí, zda lze vyloučit vnitřní kontaminaci. Když hodnota povrchové kontaminace ani po opakované dekontaminaci neklesne pod hodnotu 0,4 Bq/cm^2, je pracovník odeslán k další dekontaminaci na nestátní zdravotnické zařízení ÚJV Řež, a. s. Pracovník bude odeslán i v případě kontaminace, kdy utrpěl poranění pokožky.

Obr. 3: Záchytné nádrže na kapalné RAO

Obr. 4: Aktivní sprcha pro dekontaminaci pracovníků, vybavená též zařízením pro výplach zasažených očí

5. DOZIMETRIE

5.1 PROSTŘEDKY OSOBNÍ DOZIMETRIE

Prostředky osobní dozimetrie slouží k monitorování osobních dávek pracovníků a dalších osob vstupujících do kontrolovaného pásma se zdroji ionizujícího záření. Patří k nim zejména osobní filmové dozimetry (Obr. 5), prstové termoluminiscenční dozimetry (Obr. 6) a elektronické přímo odečítací dozimetry (Obr. 7), umožňující okamžité odečtení dávkového ekvivalentu, resp. příkonu dávkového ekvivalentu, jakož i akustickou signalizaci překročení nastavených monitorovacích úrovní.

5.2. PŘENOSNÉ DOZIMETRICKÉ PŘÍSTROJE

Při pracích na technologických a experimentálních zařízeních je úroveň příkonu dávkového ekvivalentu záření beta a gama monitorována pracovníky dozimetrické kontroly (PDK), při využití vhodných přenosných dozimetrických přístrojů. Pracovní místo je proměřeno bezprostředně před zahájením prací. Na základě zjištěné radiační situace PDK operativně stanovuje podmínky, za kterých může práce probíhat – vybavení pracovníků osobními dozimetrickými prostředky, ochrannými pracovními prostředky, použití stínění, povolená doba trvání práce apod.

Kontrola kontaminace povrchů radioaktivními látkami je prováděna přenosnými přístroji přímým měřením. V případě nalezené kontaminace (a v případech, kdy nelze metodu přímého měření použít z důvodu zvýšeného radiačního pozadí) se provede nepřímé měření metodou stěrů za účelem stanovení typu kontaminace (fixovaná/nefixovaná, popř. alfa/beta+gama).

Nepřímé měření povrchové kontaminace se provádí pomocí stěru z definované plochy 300 × 300 mm. Ke stěru se používají tampony např. z buničité vaty, filtrační papír apod. Po provedení stěru se tampony proměří pomocí vhodného přenosného přístroje. Při provádění stěrů v případě kontaminace alfa je nutné

Obr. 5: Osobní filmové dozimetry „AGFA" pro stanovení efektivní a ekvivalentní dávky záření gama a beta, sledovací období 1 měsíc

Obr. 6: Osobní termoluminiscenční prstové dozimetry pro stanovení ekvivalentní dávky záření gama, sledovací období 3 měsíce

Obr. 7: Elektronický signální přímo odečítací dozimetr RAD 60S

Obr. 8: Přenosné scintilační měřidlo povrchové kontaminace α, β, γ – CoMo 170

používat výhradně suché tampony – nejlépe filtrační papír. Pravidelné monitorování povrchové kontaminace provádějí PDK 1× za měsíc přenosnými přístroji.

Zařízení RayMon 10TM (Obr. 11) je ruční gama spektrometr pracující ve vysokém rozlišení. Může být použit k detekci a vyhledávání zdrojů ionizujícího záření (ZIZ), měření příkonu dávkového ekvivalentu, identifikaci a analýze gama spekter. Detektor CZT umožňuje vysoké rozlišení gama spekter a jejich jasné a jednoznačné interpretace. Vestavěné algoritmy dovolují stanovit příkon dávkového ekvivalentu jednotlivých složek spektra, identifikaci radionuklidů, analýzu spekter a kvantifikaci aktivit.

RayMon 10TM generuje PDF zprávy, včetně GPS pozice, gama spekter a spektrální analýzy, se surovými datovými soubory jako přílohami. Měřidlo lze snadno připojit k počítači nebo notebooku a přenést data buď přes USB, nebo bezdrátově, prostřednictvím Bluetooth nebo mobilní sítě.

5.3. MONITORY KONTAMINACE OSOB

Při opuštění KP je pracovník povinen provést kontrolu kontaminace povrchu obuvi, rukou, pracovního oděvu na monitoru povrchové α-β-γ kontaminace ExitScan-2E (Obr. 12). Řídí se přitom hlasovými a obrazovými pokyny přístroje. V místech, kde nejsou v dosahu stabilní monitory kontaminace, provádí měření

Obr. 9: Přenosná scintilační měřidla povrchové kontaminace PAM 300 a PAM 170D – jednokanálové detektory pro měření povrchové kontaminace α, β, γ radionuklidy

Obr. 10: Přenosné měřidlo dávkového ekvivalentu a příkonu dávkového ekvivalentu FH 40G s vysokorozsahovou gama sondou FHZ 612-10 na teleskopické tyči

PDK přenosným přístrojem pro měření α-β-γ povrchové kontaminace. Systém CISRK kontroluje a eviduje výsledky provedených měření povrchové kontaminace a na jejich základě povoluje odchod pracovníka prostřednictvím ovládání elektronického zámku dveří.

V zařízení jsou použity scintilační detektory, jejichž rozmístění vytváří vynikající geometrii pokrytí povrchu celého těla. Monitor měří a vyhodnocuje úroveň radiačního pozadí až do vstupu uživatele. V tom okamžiku je zahájen proces měření přední strany těla. Po dosažení správné měřicí polohy a tím i maximální účinnosti detekce je zahájeno měření. K dosažení správné polohy napomáhají obrazové indikátory a hlasové pokyny. Po ukončení první fáze je uživatel vyzván k otočení a proces se opakuje pro zadní stranu těla. K zajištění nejkratšího možného času měření a největší průchodnosti je využíván algoritmus statistického vyhodnocení.

O výsledku měření nebo případných poruchách informuje zařízení hlášením na dotykovém TFT displeji a také na přehledném panelu s optickými signalizačními prvky (LED). V případě překročení nastavené signalizační úrovně kontaminace je pracovník informován hlasovým systémem o zjištěné kontaminaci. Pracovník kontaktuje PDK, který provede upřesňující měření přenosným přístrojem. Pracovník je poté povinen dle pokynů PDK provést osobní dekontaminaci.

Při výstupu z komor je pracovníkům důkladně přeměřena úroveň jejich povrchové kontaminace přenosným měřidlem CoMo–170 (Obr. 8). Před přestupní ochranný kryt – viz kapitola 6 – lze dále umístit mobilní scintilační

Obr. 11: Přenosný polovodičový gama spektrometr RayMon 10TM

Obr. 12: Celotělový monitor kontaminace ExitScan-2E

detektor povrchové kontaminace rukou a nohou – HandFoot–250 – ve kterém se pracovníci při výstupu z přestupního ochranného krytu znovu pro kontrolu přeměří dříve, než opustí prostor zavážecí haly (Obr. 13).

5.4. STACIONÁRNÍ A KVAZISTACIONÁRNÍ DOZIMETRICKÉ SYSTÉMY

K rychlému posouzení radiační situace jsou prostory operátoroven horkých a polohorkých komor monitorovány prostřednictvím stacionárního dozimetrického systému CISRK, který on-line vyhodnocuje signál z 12 pevně zabudovaných sond AGM-02 (Obr. 14), jenž fungují jako autonomní měřiče PDE, dále pak 5 sond MDG-02 umístěných v kritických místech kontrolovaného pásma a 12 sond MDG-04 (Obr. 15) umístěných přímo uvnitř HK a PHK, jež fungují jako autonomní měřiče dávkového příkonu. Všechny uvedené sondy jsou součástí radiační monitorovací sítě a jimi naměřené hodnoty jsou zobrazovány a ukládány v systému CISRK. Signalizační úrovně stacionárního dozimetrického systému jsou nastaveny na hodnoty vyšetřovacích referenčních úrovní daného pracoviště. Překročení signalizační úrovně je dozimetrickým systémem opticky i akusticky signalizováno v celé budově, v místě detekční jednotky a na digitální obrazovce. Na základě konkrétní radiační situace může pracovník s přímou odpovědností ve spolupráci s PDK rozhodnout u příslušné detekční jednotky o nastavení odlišné signalizační úrovně.

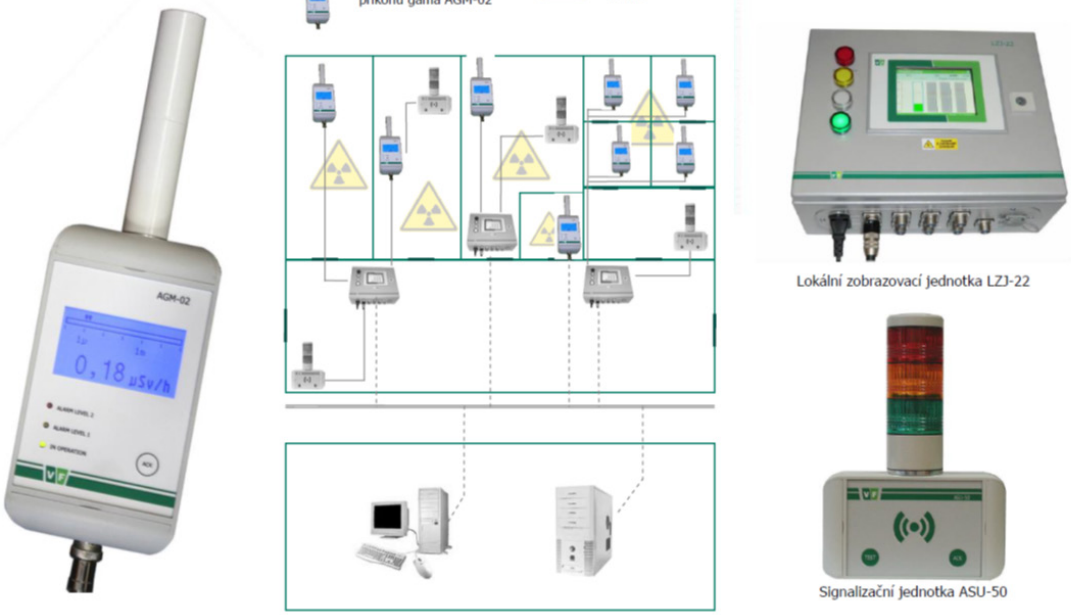
Kapalné RAO jsou shromažďovány odděleně do nádrží v technické hale pod HK objektu 254.

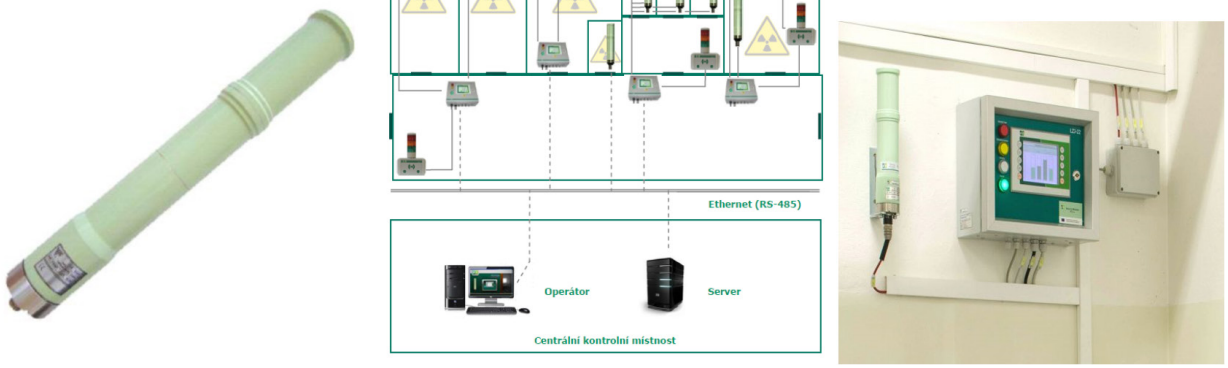
Systém CISRK vyhodnocuje a ukládá signál ze sond MAK-01 umístěných v referenčních bodech každé z nádrží (Obr. 16). Sondy MAK-01 měří objemovou aktivitu kapalin a zároveň stanovují spektrum obsažených radionuklidů.

Před stáčením kapalných RAO k likvidaci je nutné odebrat vzorek ke spektrometrické analýze a zahájit čerpání až po vyhodnocení vzorku. Gama spektrometrická analýza a stanovení celkové aktivity alfa a beta se provádí v certifikované analytické laboratoři CVCAP.

Obr. 13: Monitor kontaminace rukou a nohou HF-350 – zdroj [1]

Obr. 14: Gama sonda AGM-02 s terminálem LZJ-22 – zdroj [1]



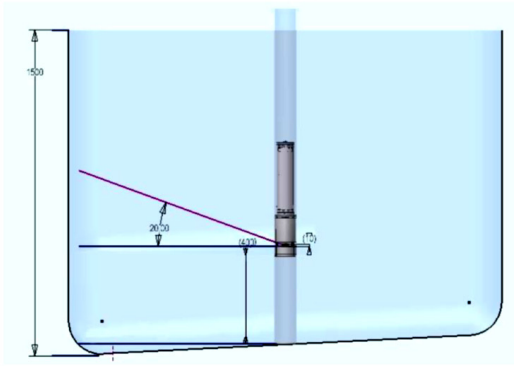


Obr. 15: Gama sonda MDG s terminálem LZJ-22 – zdroj [1]

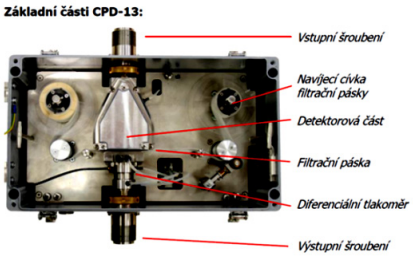
Odběr vzorků aerosolů ze vzduchu je prováděn dvěma stacionárními odběrovými zařízeními a jedním mobilním zařízením. Jedno stacionární zařízení je umístěno v zavážecí hale, kde probíhá vstup do komor a transport ZIZ mezi komorami, je zde tedy zvýšené riziko úniku RA aerosolů. Druhé stacionární zařízení je umístěno v technické hale pod HK. Mobilní zařízení je standardně umístěno v Přípravně ozářených hornin, stavebnin a keramiky, kde se pracuje s práškovými vzorky.

K měření jsou použity monitory aktivity aerosolů CPM-300 (Obr. 17). Každé zařízení má vlastní vývěvu, detektor a vyhodnocovací jednotku. Zařízení jsou připojena do sítě CISRK, jsou vybavena páskou filtračního papíru, který se automaticky pomalu odvíjí. Jedná se o autonomní kontinuální měření koncentrace aktivity alfa a beta aerosolů ve vzduchu. Naměřené hodnoty se zobrazují v rámci systému CISRK, kde zároveň probíhá jejich archivace na centrálním serveru.

Detail spodní části MAK-01:
nastavitelná kolimační štěrbina
u detekční části sondy;
s rozšiřujícím úhlem 20°,
s nastavitelnou šířkou 5 až 50 mm



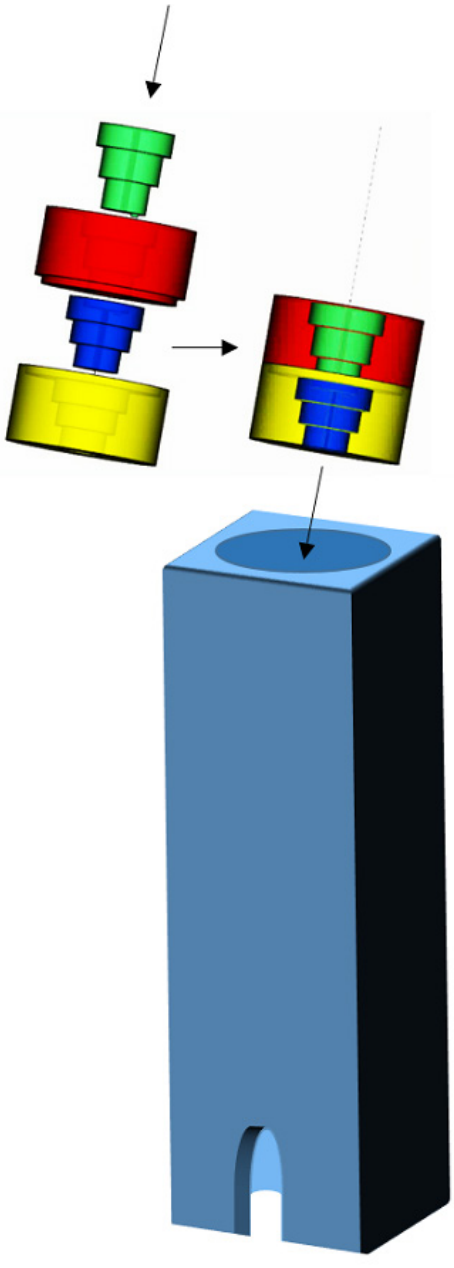
Umístění sondy MAK-1 v záchytné nádrži



Obr. 16: Monitor aktivity kapalin MAK-01 – zdroj [1]

Obr. 17: Monitor aktivity aerosolů CPM-300 v Přípravně ozářených hornin, stavebnin a keramiky

Obr. 18: Olověná vložka a komponované wolframové kolimátory s aperturou Ø 1 nebo 2 mm.

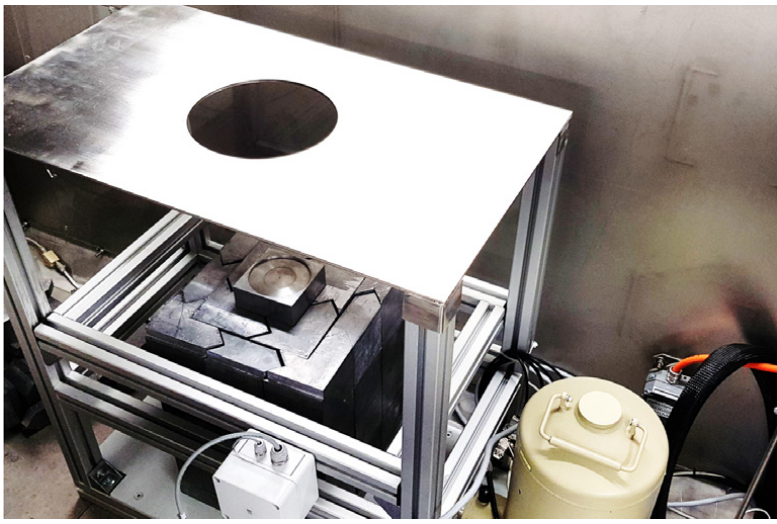


6. HPGE GAMA SPEKTROMETRIE

Kapalným dusíkem chlazený polovodičový koaxiální High-Purity Germanium (HPGe) detektor GEM10-70-PL firmy ORTEC tvoří spolu s předzesilovačem, zesilovačem, řídicí jednotkou a pokročilým ovládacím softwarem GamWin, vybaveným rozsáhlou knihovnou spekter známých radionuklidů, špičkový systém pro gama spektroskopii radioaktivních vzorků [3].

Odstínění detektoru vůči radiačnímu pozadí horké komory, jakož i vůči záření příliš aktivních měřených vzorků, je řešeno zacloněním HPGe detektoru skládaným wolframovým dírkovým kolimátorem s otvory různého průměru, který dodala firma INKOSAS, vsazeným do speciálně konstruované olověné vložky, obklopující samotný HPGe detektor, kterou vyrobilo Centrum výzkumu Řež (Obr. 18). Okolo této vložky bylo dále vyskládáno stínění tloušťky 100 mm, z olověných cihel (Obr. 19).

Obr. 19: Pb-W stínění HPGe detektoru

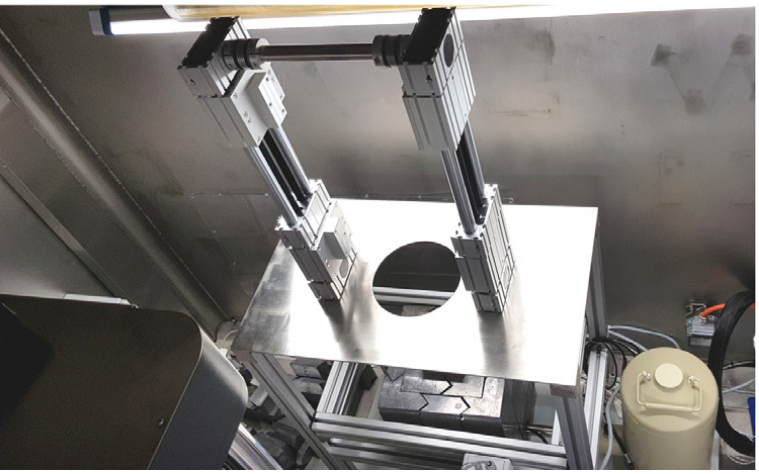


V současnosti probíhá doplnění spektrometru o elektronicky dálkově ovládaný výtah na vzorky, což umožní přesné nastavení vzdálenosti zdroj-detektor v rozsahu 100–1000 mm, a měření ještě řádově aktivnějších vzorků, než tomu bylo doposud (Obr. 20).

Znalost přesného radionuklidového složení a aktivit jednotlivých radionuklidů umožňuje nejen charakterizovat přesné složení vzorků ozářených v jaderném reaktoru polem neutronů, ale též identifikovat složení zcela neznámých vzorků.

V neposlední řadě je spektrometr využíván k charakterizaci složení a aktivit radioaktivních odpadů, což je nezbytné pro jejich správnou klasifikaci dle atomového zákona, před tím, než budou předány k odborné likvidaci, či uvolnění do životního prostředí v případech, kdy přítomné nuklidy nepřesahují uvolňovací úrovně aktivity.

Prezentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektů CZ.1.05/2.1.00/03.0108 a CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_008/0000293.



Obr. 20: Zmenšený prototyp plánovaného CNC výtahu na vzorky

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] https://www.vfnuclear.com/cz/produkty/
[2] Petříčková, A.; Srba, O.; Švrčula, P.; Mikloš, M.; Svoboda, P., Introduction of hot cell facility in Research centre Řež, BJE, 2015, Svazek 23 (61), číslo 7/8, strany 343–348
[3] Zoul, D.; Koplová, M.; Švrčula, P., Úprava HPGe gama-spektrometru pro charakterizaci vysokoaktivních vzorků, Speciální číslo JE, 2020, Svazek 1 (66), strany 32–34

Malé jaderné reaktory - uranem proti uhlíku

Ing. Jakub Líman, Ph.D.
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

V současnosti je vyvíjen ekonomický a politický tlak na odstavení zdrojů spalujících uhlí, které nahradí většinou plyn, protože jiné typy zdrojů nemohou uhlí v daném čase plnohodnotně nahradit. Z povinnosti plnit uhlíkovou neutralitu, vyplývá, že i nové plynové zdroje budou brzy samy nahrazeny bezemisními technologiemi. Článek navrhuje přechod na bezemisní energetiku s použitím jaderných technologií, zejména malých modulárních reaktorů pro teplárenství a odhaduje jejich časovou dostupnost v podmínkách České republiky.

There is economic and political pressure to shut down the coal-fired energy sources in the Czech Republic. Most of them will be replaced by gas-fired sources, due to the insufficiency of other alternative fuels. New gas units are going to be replaced soon again thanks to decarbonization goals. The article proposes the transition to emission-free power industry based on nuclear, namely the small modular reactors for heating industry and estimates their time availability under the conditions of the Czech Republic.

ÚVOD

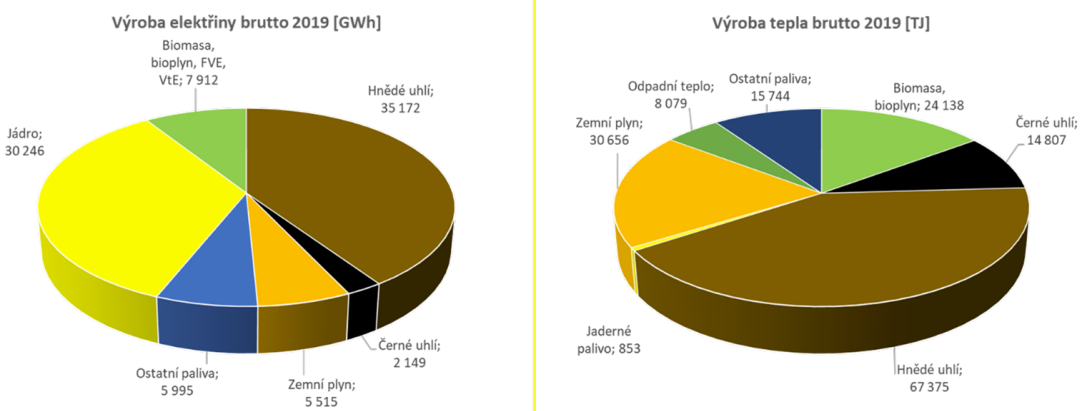
Již více než 10 let se diskutuje téma nasazení malých modulárních reaktorů (SMR) jako zdrojů elektřiny, tepla, vodíku či vysokopotenciálního tepla pro průmyslové využití. Odborné i komerční články uvádí benefity malých modulárních reaktorů proti spalovacím a obnovitelným zdrojům i proti velkým reaktorům. Mnoho odborníků je přesvědčeno, že SMR jsou nositelem jaderné renesance, autorské organizace se předhání v ambiciózních termínech a obecně jsou dnes malé reaktory trendy tématem.

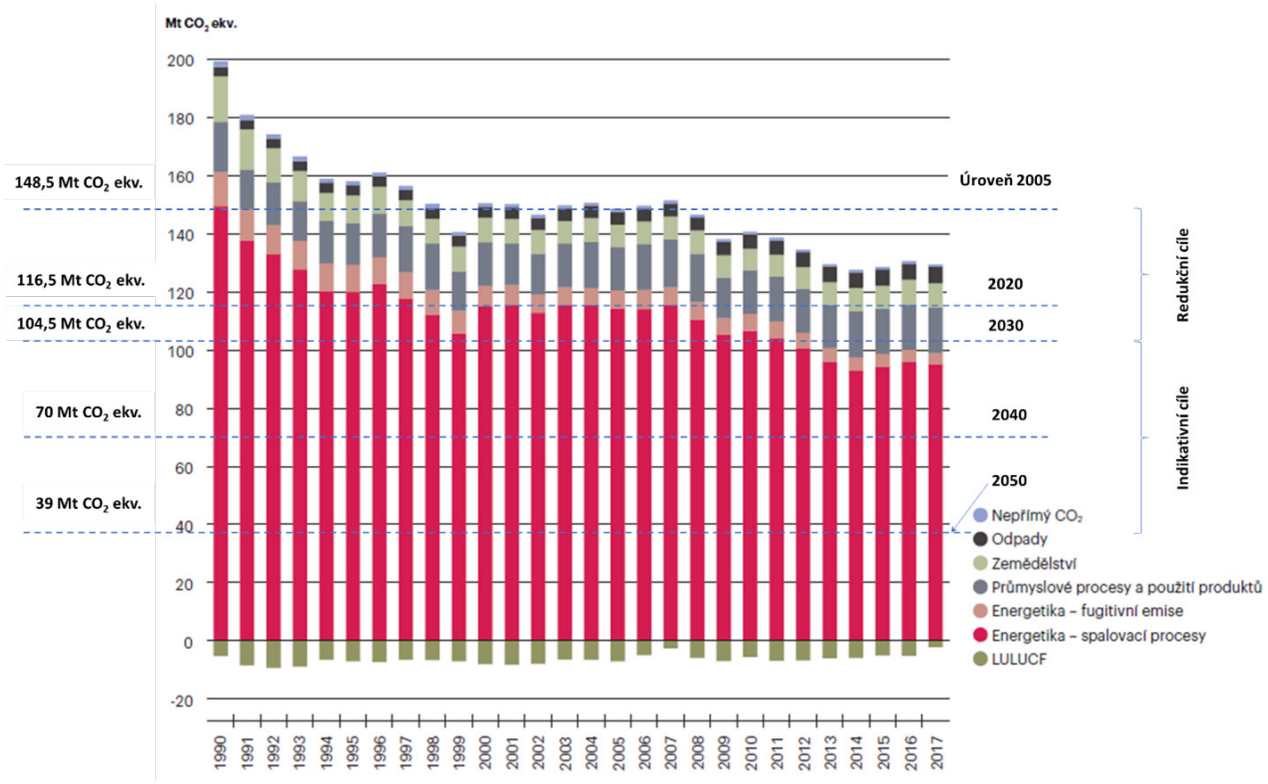
Česká republika bude v tomto a příštím desetiletí čelit rostoucím tlakům na vyřazení z provozu emisních, především uhelných, zdrojů. Na úbytek zdrojů v soustavě je nejcitlivější teplo, jako těžko transportovatelná, nezastupitelná a životně důležitá komodita. Malé reaktory mohou představovat v našich podmínkách dlouhodobě vyhovující řešení náhrady. Budou však včas připravené projekty, lokality, dodavatelé a především podnikatelsko-politické prostředí a samotní investoři?

V České republice však stále chybí technologii SMR jasně deklarovaná politická podpora.

Článek proto diskutuje problematiku dekarbonizace energetiky za využití technologie SMR. Vrací se tím k článku „Zaspala ASEK jaderný

Obr. 1: Výroba elektřiny a tepla brutto v České republice 2019 podle typů paliv [2] [3]





Obr. 2: Vývoj agregovaných emisí skleníkových plynů [5] – s budoucími cíli (úprava autora)

vlak?“ [1] a rozvíjí jej v kontextu dnešního stavu energetiky ČR, usnesení Uhelné komise, zpřísňovaných dekarbonizačních požadavků EU a aktualizované situace na poli SMR.

TRANSFORMACE ENERGETIKY ČR

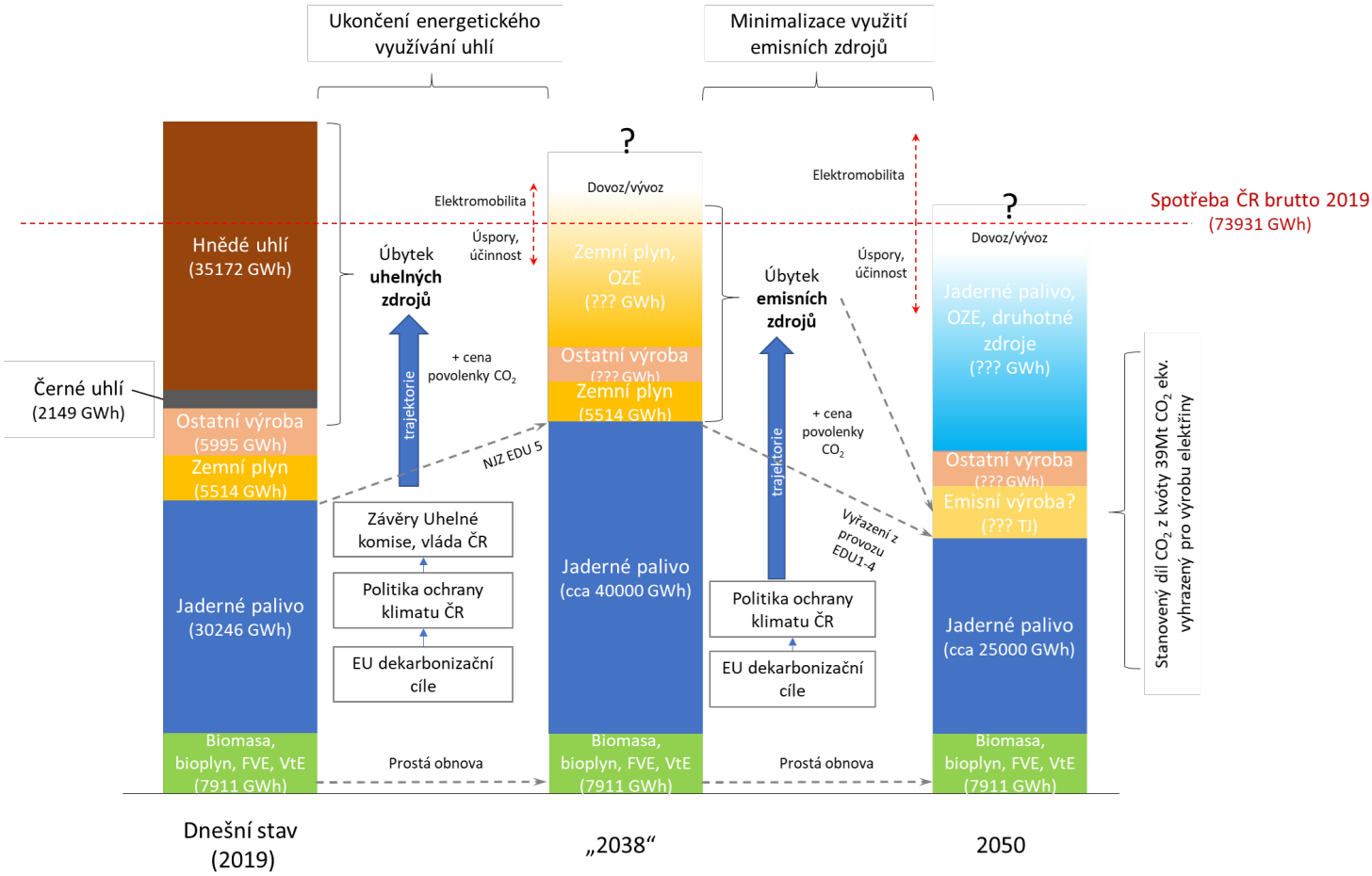
Současná energetika stojí na fosilních palivech, prezentované grafy znázorňují současnou brutto výrobu elektřiny a tepla v ČR podle jednotlivých typů paliv.

V horizontu roku 2050 budou nežádoucí v podstatě všechny emisní zdroje. Politika ochrany klimatu ČR [4] stanoví maximální úroveň emisí ČR odpovídající alespoň 80% poklesu oproti roku 1990. Tomu odpovídají pro rok 2050 emise skleníkových plynů ekvivalentní 39,1 Mt CO_2.

Zpřísnění této hodnoty je více než pravděpodobně vzhledem ke sdělení Komise COM (2019) 640 [6], kterým byla uveřejněna Zelená dohoda pro Evropu, jejímž cílem mj. je: „transformovat EU na spravedlivou a prosperující společnost s moderní a konkurenceschopnou ekonomikou efektivně využívající zdroje, která v roce 2050 nebude produkovat žádné čisté emise skleníkových plynů“. Zelená dohoda zpřísnění ve své příloze [7] avizuje na červen 2021: „Návrhy na revizi příslušných legislativních opatření s cílem dosáhnout vyšší míry ambice v oblasti klimatu v návaznosti na přezkum příslušných směrnic a nařízení“[1].

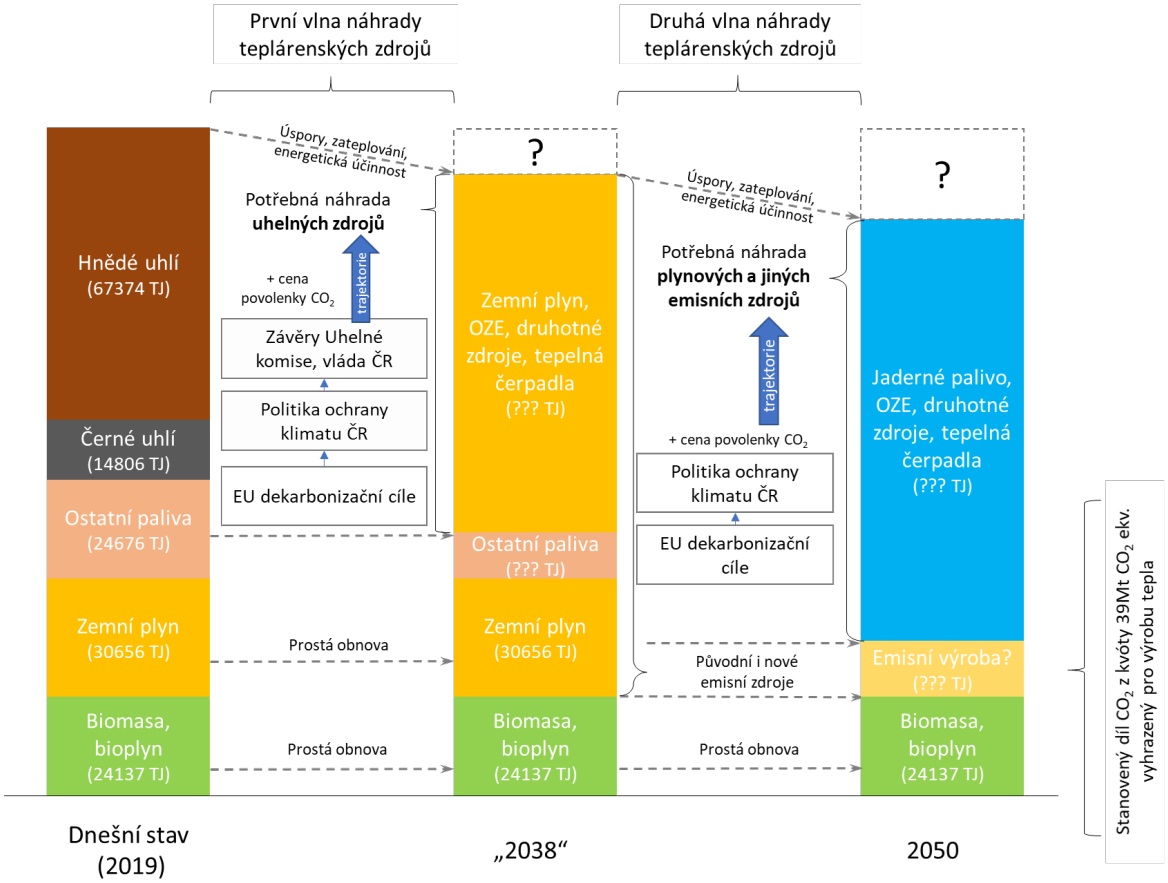
Cíl klimatické neutrality k roku 2050 byl potvrzen v projevu [8] předsedkyně Evropské komise Ursuly von der Leyenové o stavu EU z 16. září 2020. Evropský parlament dokonce dne 7. října 2020 odhlasoval tvrdší trajektorii snižování emisí CO_2 pro rok 2030 o 60 % stavu roku 1990 [9]. Evropský parlament dále požaduje, aby Komise předložila do 31. května 2023 řádným legislativním postupem návrh konkrétního způsobu (trajektorie), jak bude uhlíkové neutrality dosaženo.

Jasnější podobu dekarbonizace české energetiky měla doporučit Uhelná komise, která se jako poradní orgán vlády ČR problematikou útlumu energetického využívání uhlí zabývá. Uhelná komise má za cíl najít konsenzus mezi státem, průmyslem a zájmovými organizacemi v oblasti dalšího využívání uhlí. Usnesení ze dne 4. prosince 2020 [10] však nedává příliš odpovědí a doporučuje pokračování činnosti komise.



Obr. 3: Transformace zdrojů elektřiny ČR

Obr. 4: Transformace teplárenských zdrojů ČR



CESTA K BEZEMISNÍ ENERGETICE

Postup transformace energetiky ČR v čase je znázorněn na Obr. 3 a Obr. 4. Výroba, která bude v budoucnu muset být nahrazena jinými zdroji, úsporami a vyšší účinností, je znázorněna otazníky. Rok 2038 jako mezník první vlny transformace je třeba brát velmi volně. Z jedné strany Uhelná komise doporučuje termín podmínit vhodnou technologií náhrady zejména v teplárenství, kde nás trh v deficitu přespříliš nepodrží. A z druhé strany je zde tlak na zvýšení výrobních nákladů povolenkou CO_2. Tu sice v teplárenství částečně hradí spotřebitel, ale část odborné veřejnosti chápe povolenku jako nástroj, který utne energetické využívání uhlí kolem roku 2030.

Odstraněním uhelných zdrojů z mixu bude odstraněn jeden ze dvou dominantních zdrojů základního zatížení v elektroenergetice a objemem výroby suverénní číslo jedna v teplárenství. To není dobrá výchozí situace pro energetickou bezpečnost.

Jak ukazují Obr. 3 a Obr. 4, transformace energetiky ČR bude probíhat ve dvou vlnách, během první bude eliminována výroba z uhlí. A během druhé vlny budou vyřazeny z provozu i další emisní zdroje až do úrovně kvóty CO_2 přiřazené energetickým zdrojům (emisní strop). Je jasné, že emisní strop pro energetiku bude za 20 let velmi blízko nule.

Čím tedy ubývající výrobu nahradit? Bezemisních a uhlíkově neutrálních zdrojů vhodných pro dlouhodobou náhradu uhlí v požadovaném objemu není mnoho. Z možných technologických řešení náhrady emisních zdrojů v teplárenství lze uvést následující kandidáty:

- vybavení emisních zdrojů technologií „Carbon Capture and Storage“,
- bioplyn a biomasa,
- výroba tepla pomocí elektřiny (výkup přebytků elektrické výroby buď pro přímý ohřev teplonosného média, elektrokotle, nebo pro výrobu vodíku či syntetického metanu),
- odpadní teplo a druhotné zdroje energie.

Výše popsané alternativy lze použít jako částečné či podpůrné cesty k dosažení uhlíkové neutrality energetiky ČR, ale nelze s nimi počítat pro dlouhodobou náhradu většiny teplárenských zdrojů.

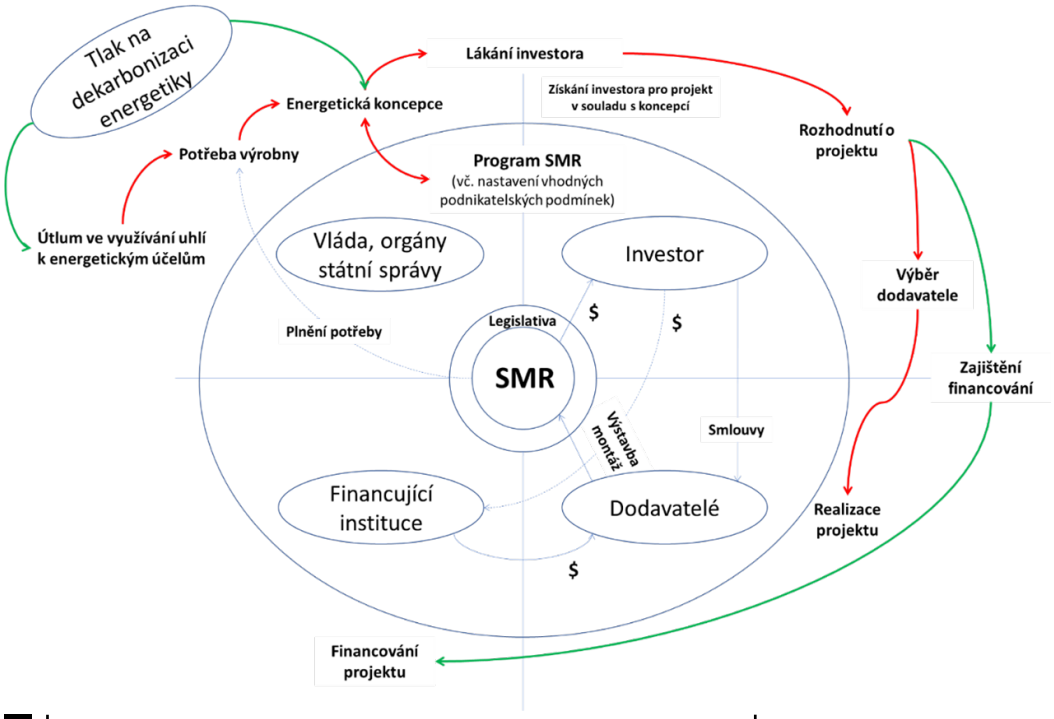
Optimálními adepty této náhrady jsou malé jaderné reaktory. Jejich specifické vlastnosti, pro které jsou velmi výhodným řešením náhrad stávajících tepláren jsou podrobně rozebrané v [1]. Bohužel jejich zralost ještě není taková, aby umožňovala komerční nasazení v období do roku 2040 při nutnosti otevírání jaderných lokalit. Na druhé straně se ukazuje, že teplárenství ČR nemá v dlouhodobém horizontu jinou alternativu.

Dvě vlny náhrad v sobě také nesou jednu důležitou otázku: Jak dlouho po sobě vlny následují? Z Obr. 3 a Obr. 4 vyplývá, že druhá vlna se bude týkat i nových zdrojů z první vlny. Proto mírnější ústupová křivka od energetického využívání uhlí bude znamenat přibližování obou vln k sobě. Tak se může stát, že plynová náhrada první vlny přestane být v krátkém mezičase do druhé vlny ekonomicky zajímavá, neboť bude muset být sama vbrzku vyměněna. Tím se může zvětšit tlak na dřívější nasazení zcela bezemisních technologií, popřípadě ztrátové investice první vlny zadotovat. Je třeba také zmínit, že nebude potřeba provést jen náhradu technologií, ale také prostou obnovu zdrojů dožitých.

Tato situace je zajímavá tím, že pokud vezme stát dekarbonizaci vážně a rozhodne se pro jadernou cestu v teplárenství, pak investoři zahájí přípravu náhrady uhelného zdroje zhruba ve stejném čase, kdy na stejné lokalitě zahájí stát činnosti spojené s přípravou lokality pro zdroje jaderné (SMR). A sotva začne investor nový zdroj provozovat, odepisovat či splácet jeho úvěr, začne také vydávat peníze na přípravu jaderného zdroje. Takže jak to vypadá, dekarbonizačních dotací se pravděpodobně nezbavíme ani v budoucnu.

PROCES TRANSFORMACE TEPLÁRENSTVÍ ČR S VYUŽITÍM SMR

Stát je garantem zajištění bezpečné a spolehlivé dodávky energie, alespoň to lze vyčíst ze Státní energetické koncepce. Z tohoto důvodu leží na státu povinnost zajistit podmínky



Obr. 5: Základní postup při formování energetického mixu s použitím SMR

pro obnovu a náhradu energetických zdrojů tak, aby bylo vyhověno vnějším požadavkům při zachování bezpečné a spolehlivé dodávky za cenu, která neohrozí fungování ekonomiky.

Pro naši energetiku existují doslova dva plánovací orgány. Jeden na evropské úrovni, který tlačí politicky a ekonomicky. Určuje strategické cíle a směřování energetiky. Druhým plánovacím orgánem je vláda, ta je mnohem méně ambiciózní a také mnohem měkčí, její hlavní dokument se jmenuje ASEK, jím se však státní správa příliš neřídí a úkoly z něj plynoucí ne vždy plní.

Prostředí se dvěma plánovacími komisemi, kdy se situace mění každým okamžikem, nahrává náhradě uhlí za „rychlerostoucí" zdroje, zatímco jaderné zdroje, s dlouhou přípravou a potřebou otevření nové jaderné lokality, jsou v této situaci handicapovány.

Úloha státu při ovlivňování energetického mixu je na Obr. 5. Úprava energetického mixu se děje tak, že vláda vydá ASEK, v němž určí cílový mix podle požadavků EU a dalších našich politik a strategií a soubor úkolů pro nastavení podnikatelského prostředí tak, aby byli investoři či provozovatelé zdrojů nuceni provést náhrady svých výrobních portfolií, takže bude dosaženo požadovaného cíle. Hlavní úkoly pro politickou reprezentaci uvádí Tab. 1. Na vládě ČR stojí směrem k orgánům Evropské unie několik úkolů. Předně je nutné získat záruky, že dekarbonizační požadavky EU budou definitivní a neměnné. S neustálými změnami shora tvořit energetické koncepce nelze.

Zcela zásadní je prosadit jaderné zdroje do systému tzv. taxonomie EU, kterým by byly oficiálně uznány jako „udržitelné" a tím pádem by byla usnadněna možnost poskytování státních podpor jaderným zdrojům. V případě SMR by bylo lépe obecně dohodnout „slučitelné" nástroje státní podpory na úrovni programu a nezatěžovat pak každý projekt zvlášť.

Pro tyto účely by bylo užitečné nalézt shodu mezi projaderně nastavenými zeměmi a vystupovat v jednáních s EU společně. Vedle tradičních jaderných států je třeba připomenout Polsko, které se netají svými jadernými plány včetně použití SMR.

Důležitým úkolem je deklarovat politickou podporu jádru včetně malých reaktorů pro účely teplárenství napříč politickým spek-

trem formou dohody či memoranda, která by zamezila neochotě vlády v posledním roce svého mandátu činit potřebná strategická rozhodnutí. To souvisí s potřebnou stabilitou investorského prostředí a politickou podporou. Ve vertikálním smyslu musí vláda vysvětlovat regionálním, lokálním politikům a občanům energetickou situaci a benefity navržené transformace s cílem zajištění akceptace umisťování SMR v relativní blízkosti sídel.

Vedle politických činností musí vláda zahájit i činnosti odborné. Jako první je třeba vypracovat analytický materiál s uvedením potřebných kroků. Tato analýza musí být postavena na informacích od EU, provozovatelů zdrojů, správců infrastruktury a na podpůrných analýzách. Na těchto základech pak může politik zodpovědně zvažovat úpravy podnikatelského prostředí, které zanese do ASEK jako úkoly pro ministerstva a státní správu, za jejichž splnění budou ideálně zodpovědní sami ministři.

Nezávisle by mělo MPO vypracovat vyhledávací studii nových jaderných lokalit s rozšířením zadání na SMR. Rozšíření zadání předpokládá úpravu metodik hodnocení lokalit v závislosti na velikostech a vlastnostech reaktorů. V této souvislosti by bylo užitečné zaměřit se i na brownfieldy v krajích např. skrze Národní databázi brownfieldů.

Na základě výsledků uvedených analýz a odborných jednání lze určit technický potenciál využití SMR. Dále je potřeba vyhodnotit i ekonomický potenciál zdrojů programu SMR. Ten bude do značné míry záviset na cenové regulaci v teplárenství. Zejména by měla být posouzena použitelnost stávajícího rámce s ohledem na specifickou skladbu stálých a proměnných výrobních nákladů SMR, případně zahájen konzultační proces s cílem rozšíření cenotvorby v teplárenství tak, aby nediskriminovala výrobny se SMR.

Také už jste slyšeli, že velkým problémem pro SMR u nás bude jejich licencovatelnost, a že SÚJB nemá kapacity a je jen malý úřad? Jistě, vždyť také posílení SÚJB je v bezemisní transformaci energetiky inherentně obsaženo. Dovolím si lehké srovnání. Z fondů spravedlivé transformace, modernizačního fondu a dalších dotačních titulů je vyhrazeno pro transformaci (jen pro první vlnu!) skoro 200 mld. Kč. Roční výdaje SÚJB jsou kolem 400 mil. Kč. Pokud by bylo možné alokovat jen 2 % transformačních peněz pro první období do přípravy SÚJB a jaderné legislativy na naši jadernou renesanci, na dalších dvacet let může mít SÚJB o polovinu vyšší rozpočet a být o polovinu silnější zejména pro povolování a licencování. Připomínám, že příprava druhé vlny transformace je náročnější a měla by být zahájena již dnes.

V jaderné legislativě je nutné především podchytit základní principy použití odstupňovaného přístupu, již dnes jsou v požadavcích na projekt první vlaštovky, např. reaktory do 50 MW_t mají zjednodušené požadavky na ochrannou obálku nebo nemusí mít rezervní napájení pro výpadek vnějšího napájení. Vyhláška o zvládání radiační mimořádné události umožňuje za určitých podmínek stanovení menší zóny havarijního plánování. To je obecně dobrá zpráva pro využití SMR v teplárenství, kde se počítá každý ušetřený metr teplovodu.

Rovněž by bylo přínosné zahájit jednání s orgány státní správy a správci infrastruktur pro včasné odhalení úzkých míst legislativy, ekonomiky či techniky s posouzením náročnosti jejich odstranění. Jako podpůrný prostředek je také možné objednat u Mezinárodní agentury pro atomovou energii provedení INIR mise, která je zaměřená na posouzení připravenosti infrastruktury daného území na výstavbu nových jaderných zdrojů.

V neposlední řadě by měla vláda oznámit průmyslu ČR záměr realizace programu SMR kvůli zhodnocení zájmu a možnému zapojení se do dodavatelských řetězců, i na druhé straně dát průmyslu čas na přípravu vlastní strategie budoucí výroby tepla.

Stát rovněž může použít nepřímé nástroje podpory, které jsou cílené mimo segment SMR či dokonce mimo odvětví energetiky, ale mají dopad do ekonomiky či rizik SMR.

Obr. 6: Optimistický časový rámec Programu SMR

Typickým příkladem je podpora vodíkového průmyslu, zvyšující poptávku po možném vedlejším produktu SMR.

Cílem všech těchto činností je nastavit a stabilizovat prostředí, které by přilákalo nové investory do nových lokalit a současné provozovatele motivovalo k přechodu na bezemisní technologii SMR. V případě, že by došlo k situaci, že je potřeba uspíšit přípravu jednotlivých projektů v zájmu plynulé náhrady, může stát nebo kraj převzít některé investorské činnosti. Během pozdější fáze se program rozpadá na dílčí projekty SMR a vůdčí roli tak postupně přebírají jednotliví investoři, kteří začínají pracovat na svých projektech. Doba pro získání investorů bude velmi různá lokalita od lokality a investor od investora. Hrubý časový rámec možnosti nasazení prvního SMR je na Obr. 6. Použité lhůty nejsou zatížené lhůtami pro odvolání, průtahy, napadání rozhodnutí či soudy. Tyto lze očekávat, vzhledem k umisťování jaderných zařízení v relativní blízkosti sídelních celků a k nevelkým provozním zkušenostem s vybraným typem zařízení. Je třeba také podotknout, že časový rámec vychází ze současných lhůt povolovacích řízení, které zatím zkrácení nepřipouští ani v případě, že je vyloučena možnost vlivu jaderného zařízení na okolí či jeho ohrožení. Proto je třeba apelovat na politiky, aby posílili dotčené orgány státní správy, umožnili zkrácení povolovacího procesu a ochránili jej od přílišných zásahů veřejnosti.

ZÁVĚR

Transformace energetiky ČR bude v období 2020–2050 probíhat ve dvou velkých vlnách. Ve dvacátých a třicátých letech půjde o náhradu uhelných zdrojů především zdroji plynovými, a od čtyřicátých let vymizí všechny emisní zdroje.

V současnosti je objem „bezemisní" výroby v elektroenergetice zhruba 45 % a v teplárenství necelých 25 %. To však neznamená, že pro zachování výrobní dostatečnosti je potřeba nahradit 55 % výroby elektřiny nebo 75 % teplárenské výroby, protože uhelná část výroby bude z velké části během třiceti let nahrazena dvakrát, nejdříve plynem, pak i plyn bezemisní výrobou v druhé vlně. Dnes je u nás z uhlí vyráběno přes 40 % elektřiny a cca 50 % tepla. To je ten podíl výroby, pro kterou budou během třiceti let z velké části nahrazen dvakrát. Celkově tak budou investovány zdroje pro výrobu cca 90 % elektřiny (1. vlna cca 35 % plyn a 2. vlna 55 % bezemisní) a kolem 120 % výroby tepla (1. vlna odhad 45 % plyn a 2. vlna 75 % bezemisní). Vše za předpokladu zachování výrobní dostatečnosti dnešní úrovně.

Bude jistě zajímavé sledovat reakce spotřebitelů na prosazování špičkového zdroje, plynu, do základního zatížení a vyvolaného dopadu do ceny. A neméně zajímavé bude sledovat ukazatele energetické soběstačnosti.

Jedinou bezemisní technologií schopnou zvládnout teplárenskou výrobu v dlouhodobém horizontu a požadovaném rozsahu jsou víceúčelové malé modulární reaktory. Jejich technologická a komerční vyspělost, nejasnosti v použití odstupňovaného přístupu, nepřipravenost lokalit, legislativy a celého podnikatelského prostředí posouvá jejich nasazení u nás až za rok 2040. Nicméně již dnes je potřeba začít přípravu na energetiku budoucnosti v mnoha úrovních, neboť dekarbonizace není náhrada uhlí plynem, nýbrž náhrada uhlíku uranem.

Reference:
[1] Líman, J. Zaspala ASEK jaderný vlak? Energetika, č. 2/2018, ročník 68, Asociace energetických manažerů, Praha
[2] Kol. autorů ERÚ. Roční zpráva o provozu teplárenských soustav ČR 2019, Energetický regulační úřad, 2019
[3] Kol. autorů ERÚ. Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR 2019, Energetický regulační úřad, 2019
[4] Kol. autorů MŽP ČR. Politika ochrany klimatu v ČR, Ministerstvo životního prostředí ČR, 2017
[5] Kol. autorů CENIA, MŽP ČR. Zpráva o životním prostředí České republiky 2018, CENIA, Praha, 2019. Staženo 10/2020: https://www.cenia.cz/wp-content/uploads/2020/05/Zprava_o_ZP_CR_2018.pdf
[6] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1588580774040&uri=CELEX:52019DC0640, prohlíženo 10/2020.
[7] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?qid=1596443911913&uri=CELEX:52019DC0640#document2, prohlíženo 10/2020
[8] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/SPEECH_20_1655, prohlíženo 10/2020
[9] https://www.europarl.europa.eu/news/cs/press-room/20201002IPR88431/klimaticky-zakon-poslanci-chteji-zvysit-cil-redukce-emisi-do-roku-2030-na-60, prohlíženo 10/2020.
[10] Návrh usnesení ze 7. zasedání Uhelné komise (4. 12. 2020), https://www.greenpeace.org/static/planet4-czech-republic-stateless/22d55ced-n%C3%A1vrh-usnesen%C3%AD-ze-7.-zased%C3%A1n%C3%AD-uk-1.docx.pdf, prohlíženo 12/2020
[11] Status Uhelné komise, https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/uhelna-komise/2019/9/statut-uhelne-komise.pdf prohlíženo 12/2020
[12] https://www.seznamzpravy.cz/clanek/konec-uhli-v-cesku-uhelna-komise-vari-z-vody-nema-vsechny-analyzy-132221, část vyjádření prof. Hrdličky ČVUT, prohlíženo 12/2020
[13] Smlouva o poskytování služeb č. 20SMP063, uzavřená mezi Moravskoslezským energetickým centrem a ÚJV Řež, a. s. dne 5. 3. 2020, Uveřejněna v registru smluv, ke stažení: https://smlouvy.gov.cz/smlouva/11942296

Ing. Jakub Líman, Ph.D.

jakub.liman@cvrez.cz

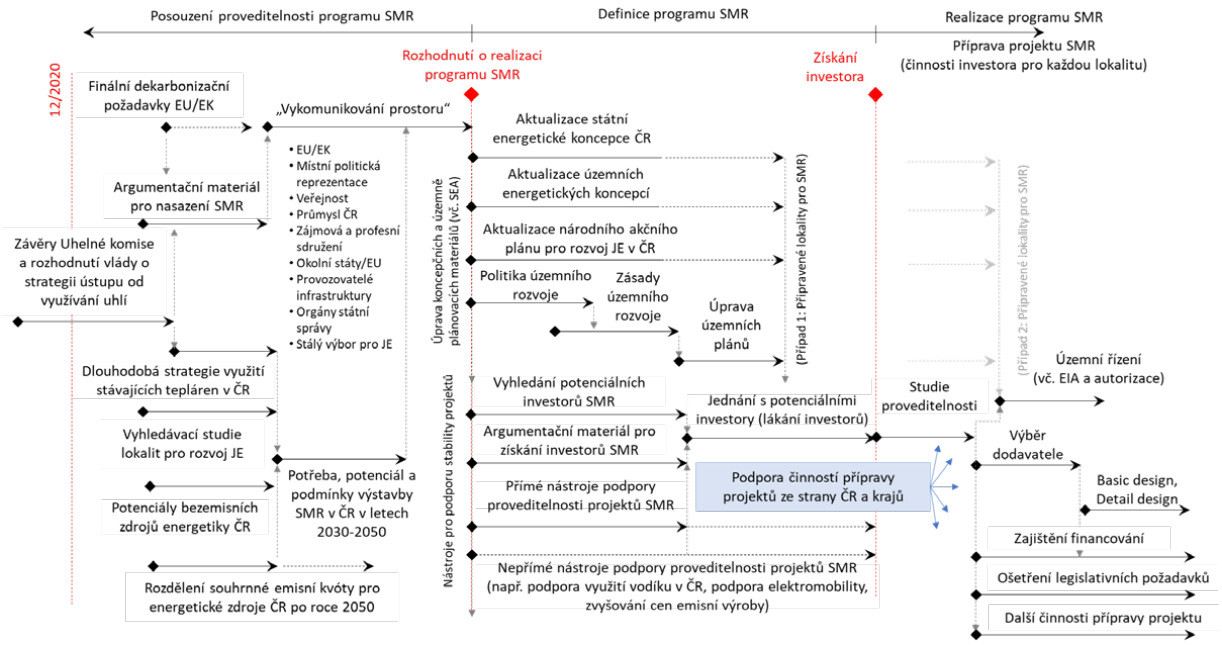
vystudoval doktorský studijní program na Katedře jaderných reaktorů FJFI ČVUT v Praze se zaměřením na malé modulární reaktory a magisterský program Ekonomika energetiky na FEL ČVUT v Praze. V profesním životě se zabýval strategickým plánováním a ekonomikou energetiky v ČR a střední Evropě, přípravnou a realizační fází jaderných zdrojů a v současnosti se podílí na periodickém hodnocení bezpečnosti výzkumných jaderných reaktorů LVR-15 a LR-0 v Centru výzkumu Řež.

[1] EK přijala 14. 7. 2021 balíček návrhů, jejichž cílem je snížení čistých emisí skleníkových plynů do roku 2030 alespoň o 55 % ve srovnání s úrovněmi z roku 1990.

Proces transformace energetiky s výhledovým většinovým přechodem na jaderné zdroje vyžaduje provedení značných změn v podnikatelském prostředí, aby byla podpořena jejich proveditelnost, neboť investorsky jsou to nejnáročnější zdroje. Politická reprezentace by měla:
· alokovat dostatečné množství finančních prostředků nejen pro podporu investorů, ale celkově pro zajištění efektivního státního aparátu pro realizaci úprav podnikatelského prostředí a regulačního a legislativního rámce
· podepsat memorandum deklarující rámec podpory rozvoje využívání jaderné energie od co největšího množství politických uskupení, aby byla zajištěna kontinuita politické podpory jádru a omezeny tanečky typu „rozhodnutí bude na příští vládě“
· složit silnou skupinu vlád států, které budou uplatňovat společný a koordinovaný postup v jednání s orgány EU a EURATOM v otázkách využití jaderných zdrojů a pravidel energetiky: o zahrnutí jaderných zdrojů do systému taxonomie EU o legislativní podpora bezemisních energetických technologií (nikoliv nutně dotační) o úpravy atomové, investiční a stavební legislativy o požadovat od EU/EK finální cíle a omezení v oblasti energetiky až do úplné dekarbonizace o požadovat od EU/EK záruky, že emise CO2 nebudou pod vlivem přísných požadavků pouze vyváženy do zemí mimo EU o vyjednání rámcových pravidel notifikace podpory jaderných zdrojů
· provést aktualizaci ASEK v souladu s požadavky EU/EK
· zavést politickou a manažerskou zodpovědnost a vymahatelnost plnění úkolů ASEK (nikoliv cílů, to je rozdíl)
· posílit SÚJB s ohledem na povolování a licencování SMR a otevírání nových jaderných lokalit (z hlediska SMR zejména použití odstupňovaného přístupu, požadavky na projekt a umisťování)
· vypracovat nové metodiky vyhledávání lokalit s ohledem na charakteristiky SMR a vypracovat vyhledávací studie lokalit vč. teplárenských SMR a zahájit přípravu lokalit
· posoudit použitelnost a případně upravit cenovou regulaci v teplárenství tak, aby byla použitelná pro SMR s vysokými fixními a nízkými variabilními výrobními náklady
· podpora technického školství (zejména jaderných, strojních a elektrotechnických oborů)
· koordinovat a podporovat dodavatelský průmysl s cílem vytvoření dodavatelských konsorcií vhodných typů SMR i velkých reaktorů
· pravidelně vyhodnocovat možnosti transformace vůči pevně stanoveným požadavkům EU/EK
· vést informační kampaň o transformaci energetiky ČR

Tab. 1: Úprava podnikatelského prostředí pro usnadnění přechodu na jaderné zdroje

Obr. 7: Hlavní činnosti rozvoje programu SMR



Z knihy „Vznik a historie státního dozoru nad jadernou bezpečností“ 6. 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.

VYDÁNÍ PRVNÍCH PRÁVNÍCH PŘEDPISŮ PRO JADERNOU BEZPEČNOST

Nová kompetence ČSKAE „pro vydávání, společně s Federálním ministerstvem paliv a energetiky (FMPE), předpisů o zajištění jaderné bezpečnosti při výstavbě a provozu jaderně energetických zařízení“ vyplývala z paragrafu 54 odst. c) kompetenčního zákona č. 133/1970 Sb. /20/ Jak již bylo řečeno, tato kompetence byla využita koncem 70. let v návaznosti na zkušenosti získané naší účastí v NUSS programu.

Kompetence resortu provozovatele FMPE jako spoluvydavatele předpisů byla hodně nesystémová, ale důležité bylo, že vydávat předpisy bylo umožněno. Autoři této kompetence ČSKAE v kompetenčním zákonu (J. Beránek, A. Ševčík) potřebu legislativní základny pro jadernou bezpečnost velmi dobře předvídali. Širším výkladem uvedeného zákona byla zahájena příprava čtyř předpisů pro zajištění jaderné bezpečnosti jaderně energetických zařízení:

- *pro projektování*
- *pro umisťování*
- *pro zajištění jakosti*
- *pro spouštění a provoz*

Pro zahájení přípravy tohoto souboru prvních předpisů pro jadernou bezpečnost byl použit argument, že právě tyto oblasti pokrýval NUSS program MAAE. Oblast státního dozoru vyžadovala přípravu zákona, ale to vyžadovalo delší přípravu a silnější argumenty.

Pro každý připravovaný předpis byl určen odpovědný technický pracovník na ČSKAE: umísťování (L. Náměstek), projekt (Z. Kříž), zajištění jakosti (J. Bečvář, J. Macoun) a provoz (J. Víta).

V případě prvního předpisu pro projektování (výnos ČSKAE č. 2 o zajištění jaderné bezpečnosti při projektování jaderně energetických zařízení, 1978) /21/, bylo rozhodnuto využít jako výchozí dokument General Design Criteria (GDC) uvedený ve sbírce zákonů USA (10 CFR 50 jako Appendix A), které byly vydány v roce 1967. Tento dokument,

jinak u nás nedostupný, byl získán v rámci naší účasti v NUSS programu. Dokument byl přeložen do češtiny, diskutován na jednání pracovní skupiny Rady pro jadernou bezpečnost, složené hlavně z projektantů, a s malými změnami byl doporučen k vydání. Je to jeden z klíčových dokumentů jaderné bezpečnosti definující základní požadavky a principy hloubkové ochrany (defense in depth). S velmi malými úpravami, které odrážejí rozvoj jaderné technologie a možnosti jejího bezpečnostního hodnocení za posledních čtyřicet let, je jako vyhláška SÚJB č. 195/1999 platný u nás dodnes.

Pikantní byla skutečnost, že původ originálního dokumentu nebyl nikde oficiálně deklarován a většina pracovníků se domnívala, že se jedná o dokument MAAE. Přesto byl použit dokument americký, protože dokument MAAE obsahoval některé kompromisní formulace s cílem dosáhnout mezinárodního konsensu. S využitím dokumentu původem z USA by mohly být v té době problémy. Dlouhou dobu byl v praxi používán hlavně jako referenční dokument pro přípravu stanovisek dozoru, neboť projekt a jeho změny přicházely od generálního projektanta (LOTEP), který se řídil v té době platnými sovětskými předpisy. V souvislosti s přípravou prvních předpisů se ukázalo, že odbor jaderné bezpečnosti a záruk již potřebuje právníka, kterého se podařilo získat v rámci ČSKAE (Jaroslav Kynčl).

Jako druhý v pořadí byl vydán předpis o umísťování (výnos ČSKAE č. 4 o kritériích pro umísťování jaderně energetických zařízení, 1979) /22/. Byl potřebný, neboť v té době probíhal výběr a příprava řady lokalit v rámci prognózy velkého jaderného programu u nás počínaje Mochovci, Temelínem až po Blahutovice, Kecerovce a Opatovice. Ve výběru lokalit se u nás angažovaly specializované organizace pro územní plánování – Terplan v České republice a Urbion na Slovensku – které měly poměrně rozsáhlé databáze o území bývalého Československa pro potřeby umísťování velkých průmyslových podniků. S Terplanem byl navázán úzký pracovní kontakt v osobě Jaroslava Navrátila a jejich výběrová kritéria pro umístění dů-

žitých zařízení byla doplněna o další kritéria odpovídající specifice jaderně energetických zařízení. Již tenkrát se mezi vylučovacími kritérii pro lokality jaderných elektráren objevilo zemětřesení, povodně, pád letadla a další možné rizikové charakteristiky lokalit. Ve srovnání s předpisem MAAE o umísťování jaderných elektráren byl náš předpis podrobnější a komplexnější.

Třetím předpisem v pořadí bylo zajišťování jakosti (výnos ČSKAE č. 5 o zajišťování jakosti jaderně energetických zařízení, 1979) /23/. Zajištění jakosti bylo v té době novým termínem, který mezinárodně zavedl právě NUSS program. S touto činnosti v jaderné oblasti u nás nebyla praktická zkušenost, a proto bylo rozhodnuto maximálně využít dokumentu MAAE pro tuto oblast a upravit ho na naše podmínky. Jeho důsledné uplatňování ze strany dozoru ČSKAE v 80. letech zajistilo, že kvalita jednotlivých zařízení (stanovená v individuálních programech zajištění jakosti – IPZJ) a jednotlivých činností (stanovená v dílčích programech zajištění jakosti – DPZJ) byla dobře dokumentována a pod kontrolou státního dozoru ČSKAE.

Čtvrtým předpisem v této sérii byl předpis pro spouštění a provoz jaderně energetických zařízení (výnos ČSKAE č. 6 o zajištění jaderné bezpečnosti při spouštění a provozu jaderně energetických zařízení, 1980) /24/. V této oblasti nebyly prakticky žádné zkušenosti, neboť spouštění a provoz A-1 v roce 1972 a její následný provoz proběhl bez kontrolní činnosti dozoru, který byl v té době v počáteční fázi svého vývoje. Zde bylo rozhodnuto, na rozdíl od předchozích případů, využít pro jeho přípravu platný sovětský předpis Pravila jaděrnoj bezopasnosti (PJB-73) a odpovídající dokument MAAE pro provoz. Ukázalo se, že tato volba byla správná, protože již probíhalo spouštění bloků JE V-1 (1978, 1980) a ruský předpis byl zejména podrobný pro oblast fyzikálního a energetického spouštění, protože obsahoval detailní seznam zařízení, která musí být připravena pro zahájení těchto etap. V případě tohoto předpisu však došlo mezi ČSKAE a FMPE k dosti tvrdému střetu. Dozor ČSKAE pro celý postup fyzikálního a energetického spouštění definoval řadu podmínek. Jako zásadní byla existence řady dílčích programů spouštění a taxativní seznam důležitých zařízení při jednotlivých fázích spouštění, která musí být provozuschopná. Přechod z jedné etapy spouštění na další byl vázán na dílčí souhlasy státního dozoru. Možná že k této reakci přiměla resort energetiky událost ze spouštění prvního bloku JE V-1. Na zasedání spouštěcího štábu ředitel odboru ČSKAE J. Beránek upozornil, že

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.

ne všechna zařízení stanovená sovětským předpisem mají „čisté" akty připravenosti, a tedy že nelze souhlas podle sovětských předpisů se spouštěním vydat a plánovaný termín spouštění musel být posunut.

Dozor proto zaměřil svou aktivitu na akty připravenosti stanovených zařízení. Hrozilo totiž, že v zájmu plnění termínů spouštění bude tendence provozovatele vydávat akty připravenosti s řadou nedodělků, které se vyřeší později. Zatímco s vydáním předchozích předpisů nemělo Federální ministerstvo paliv a energetiky zásadní problém, s vydáním předpisu pro spouštění a provoz došlo k velké „bitvě" o jeho obsah a kompromis se hledal hodně dlouho.

Po skončení přípravy návrhů jednotlivých předpisů vedení ČSKAE rozhodlo, že budou předloženy plénu ČSKAE, které je schválilo prakticky bez připomínek a doporučilo vydat je na jednoroční zkušební dobu ve formě tzv. kritérií. Po této době byly předpisy zpracovány do paragrafovaného znění, předloženy legislativnímu útvaru vlády a vydány jako výnosy ČSKAE, nikoliv jako vyhlášky. Jediným důvodem pro tuto anomálii bylo, že nebyly zveřejněny ve Věstníku vyhlášek, jinak jejich závaznost byla stejná jako u vyhlášek. To vyplývalo z naší nezkušenosti v této oblasti a byla to jejich jediná vada na kráse.

Prostřednictvím těchto čtyř výnosů se ČSKAE ještě před vydáním zákona č. 28 v roce 1984 dostala do podvědomí jaderných energetiků. Výnosy byly platné až do roku 1997, kdy byly převzaty s malými změnami do současně platných vyhlášek SÚJB jako prováděcí předpisy k atomovému zákonu č. 18/1999 Sb.

Zatímco výnosy o umísťování a zajištění jakosti byly novelizovány, výnosy pro projektování, spouštění a provozu platí s malými změnami dodnes. Dostatek věcných důvodů pro jejich novelizaci existuje.

Seznam odkazů:

/20/ Zákon č. 133/1970 Sb., O působnosti federálních orgánů státní správy (kompetenční zákon)
/21/ Výnos ČSKAE č. 2/1978 o zajištění jaderné bezpečnosti při navrhování, povolování a provádění staveb s jaderně energetickým zařízením
/22/ Výnos ČSKAE č. 4/1979 o obecných kritériích jaderné bezpečnosti při umísťování staveb s jaderně energetickým zařízením
/23/ Výnos ČSKAE č. 5/1980 o zajištění jakosti vybraných zařízení v jaderné energetice z hlediska jaderné bezpečnosti
/24/ Výnos ČSKAE č. 6/1980 o zajištění jaderné bezpečnosti při spouštění a provozu jaderně energetických zařízení

Aktuality

Česká jaderná asociace: Jádro je součástí naší budoucnosti

Česká jaderná asociace (dále jen ČJA) je nezávislý subjekt, který podporuje jadernou energetiku jako udržitelný zdroj elektrické energie s cílem strategicky zastupovat zájmy jaderného odvětví v důležitých energetických debatách v ČR.

Za své krátké působení se ČJA stačila zapsat do povědomí politiků a institucí, průmyslových a odborných partnerů. V plánu je oslovit nejen další subjekty, ale i vytvoření odborných pracovních skupin na různá témata související s „jádrem". ČJA se stala členem World Nuclear Association (www.world-nuclear.org) a tím je u zdroje aktuálního světového dění a nových směrů v jaderné energetice.

Jednoticí myšlenkou ČJA je podpora výstavby nových jaderných zdrojů (dále jen NJZ) v ČR s maximálním zapojením českého průmyslu, inženýrských a výzkumných pracovišť i vysokých škol a také lokálních poskytovatelů nejrůznějších služeb.

ČR jako jeden z mála menších států dokázala vybudovat a udržet potřebnou průmyslovou a výzkumnou infrastrukturu i odborné školství. Není důvod tyto akumulované znalosti a kapacity ztratit a opustit tak místo v klubu, v němž účast znamená exkluzivitu a možnost podílet se na vývoji technologií čtvrté generace.

Shodujeme se na tom, že NJZ spolu s obnovitelnými zdroji jsou nutností pro zajištění zdrojů elektrické energie poté, co budou odstaveny uhelné elektrárny.

Aktuálním tématem je soutěž na výstavbu pátého výrobního bloku v Dukovanech (EDU 5). Ale nezapomínejme na temelínskou lokalitu, která je také připravena na další rozvoj.

Hojně se hovoří o tom, kdo má, nebo nemá být dodavatelem. Ale je nutné se ohlédnout zpět. Obě elektrárny jsou provozovány bezpečně. Za posledních 30 let se nevyskytl žádný závažný problém, který by měl příčinu v projektovém řešení. České firmy se jaderné zdroje naučily servisovat a doplňovat kvalitními českými výrobky.

Rozhodnutí o vyloučení některého z uchazečů tedy není technické, ale je čistě politické a bezpečnostní. Rozhodnutí musí být akcep-

továno odbornou veřejností, firmami, i dalšími subjekty. Ale to neznamená, že by se tendr měl odkládat.

Každý rok zpoždění představuje významný dopad nejen na plnění našich klimatických závazků, ale zejména na energetickou soběstačnost. Ta je důležitá k udržení a konkurenceschopnosti průmyslové výroby v ČR, a tím přímo ovlivňuje HDP. Už v roce 2040 bude evropská energetika deficitní o 160 GW instalovaného výkonu a zcela reálně hrozí riziko energetického chaosu.

Z čistě ekonomického pohledu a prakticky je ověřeno, že z takto velkých projektů bude profitovat hlavně Česká republika v rámci socio-ekonomických dopadů. Pákový mechanismus způsobí nejen investice související s výstavbou, ale také investice do rozvoje lokalit, průmyslu, vědy a výzkumu, školství, ovlivní zaměstnanost, služby apod. Podle nejnovějších studií každá investovaná koruna přinese do státního rozpočtu cca 3,8–4,11 koruny zpět. Naopak u obnovitelných zdrojů je návratnost jen 1,2 koruny. Při těchto číslech není o čem mluvit a „jaderný tendr" měl už dávno běžet. Tak věříme, že se jaderný „byznys" podaří nastartovat co nejdříve tak, aby nám ekonomicky pomohl, mimo jiné i s postcovidovým dluhem.

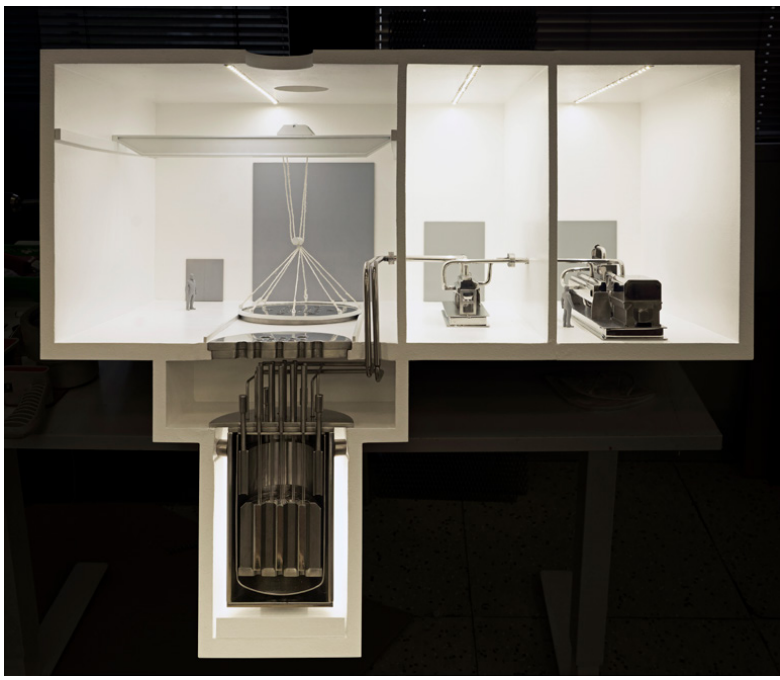
Tomáš Kovalovský

Energy Well míří do Dubaje

Projekt malého modulárního vysokoteplotního jaderného reaktoru chlazeného tekutými solemi představili odborníci z Centra výzkumu Řež poprvé už v roce 2017 (více informací o projektu Energy Well najdete na straně 39 tohoto čísla). Aktuální vývojová fáze českého konceptu, který v roce 2020 získal patent od Úřadu průmyslového vlastnictví, se představí návštěvníkům světové výstavby EXPO 2020 v Dubaji, jejíž brány se otevřou s téměř ročním zpožděním dne 1. října 2021.

Do největšího města Spojených arabských emirátů míří kovový model reaktoru v měřítku 1:30, který byl vyroben v dílnách CVŘ, maketu reaktorové haly vytvořili odborníci na 3D tisk ze společnosti Prusa Research. Model Energy Well si budou moci návštěvníci českého pavilonu prohlédnout po celou dobu trvání EXPO 2020, tedy do 31. března 2022.

Michal Šafránek



V příštím čísle vám představíme Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT. V medailonku významných osobností si připomeneme profesora Bedřicha Heřmanského, který za svůj život vychoval už stovky jaderných inženýrů. Seznámíme vás se vzdělávacími aktivitami Skupiny ČEZ, s přípravou vybraných pracovníků jaderných elektráren a expertů pro státní správu a se systémem jaderného vzdělávání na Slovensku. Detailně se zaměříme na testy v podzemních laboratořích Bukov a téma využití projektových rezerv pro zvyšování výkonu JE Dukovany. Těšit se můžete na poslední díl seriálu o infrastruktuře horkých komor Centra výzkumu Řež, další díl o vzniku a historii státního dozoru nad jadernou bezpečností a samozřejmě i na aktuality z oblasti jaderné energetiky.

CVŘ