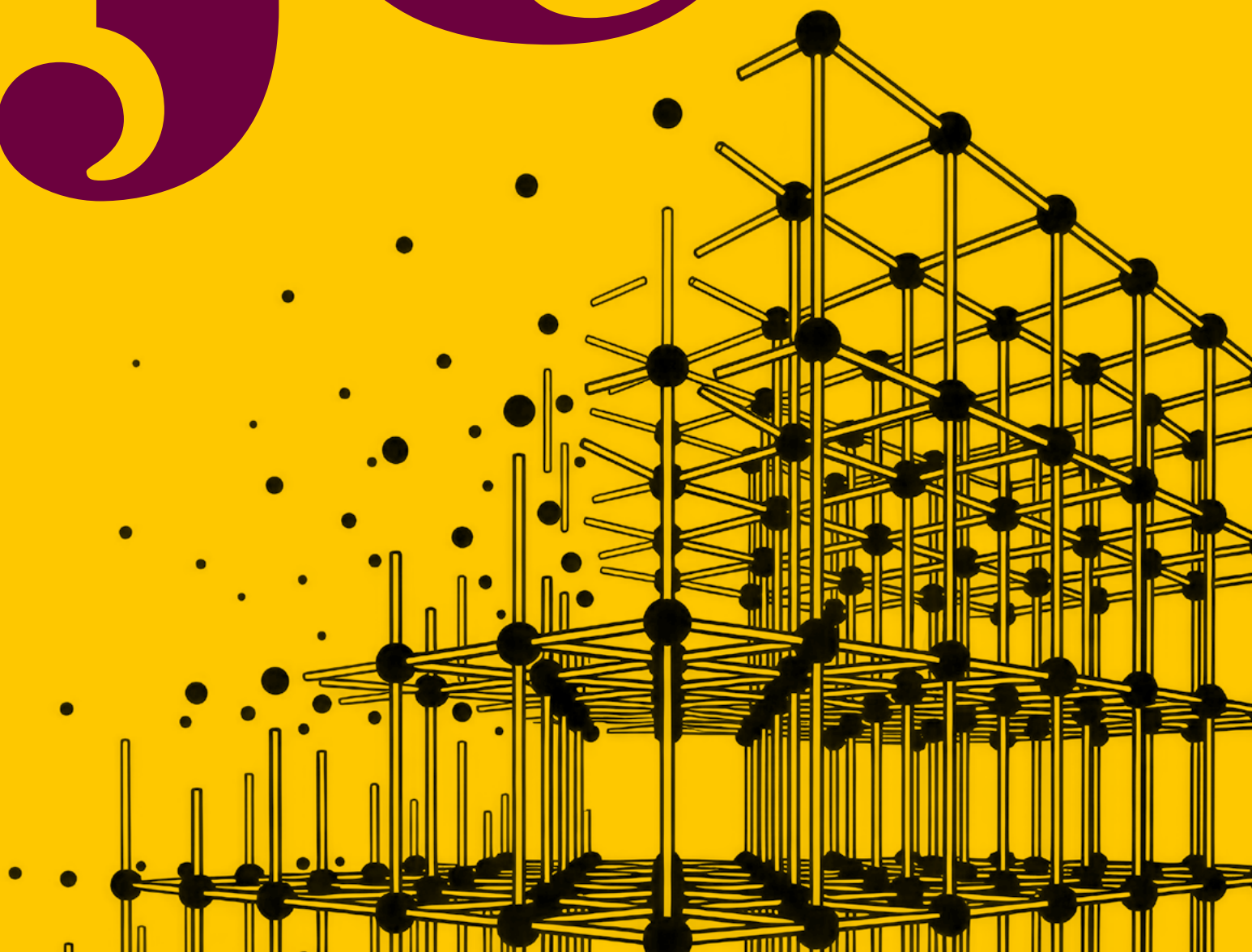


Jaderná energie / Jadrová energia

1/2026, ročník 7 (72)

V tomto čísle si připomeneme osobnost Ing. Jaroslava Hejny, CSc., a období významných úspěchů experimentálního výzkumu hydrodynamiky rychlých reaktorů v Řeži. Přiblížíme také sedmdesátiletou historii společnosti ŠKODA JS, jednoho z pilířů evropského jaderného strojírenství, a představíme výzkumnou infrastrukturu CANAM, unikátní soubor urychlovačových a analytických pracovišť Ústavu jaderné fyziky Akademie věd ČR. Podrobněji se zaměříme na projekt ITER, který vstoupil do rozhodující fáze systémové integrace, na možnosti využití malých modulárních reaktorů pro dodávky vysokopotenciálního tepla průmyslu i na využití rentgenových systémů při detekci nástražných výbušných zařízení. Nechybí ani další díl vzpomínek Zdeňka Kříže na historii jaderného dozoru v Československu a pravidelné aktuality.

je



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 dvakrát ročně nákladem 550 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.

1. číslo 2026, ročník 7 [72]

Vychází 25. 9. 2026

Vydavatel:

Centrum výzkumu Řež s. r. o.

Hlavní 130, Řež, 250 68 Husinec, Česká republika

IČO: 26722445

Úřad jadrového dozoru SR

Bajkalská 27, P.O.Box 24, 820 07

Bratislava, Slovenská republika

IČO: 30844185



Registrace MK ČR

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

Redakce:

Michal Šafránek – šéfredaktor

redakce@jadernaenergie.online

+420 775 374 384

Ing. Jiří Kuf

Adresa redakce:

Centrum výzkumu Řež s. r. o.

Hlavní 130, Řež, 250 68 Husinec, Česká republika

Grafika a sazba:

Simon Anfilov

Tisk:

H.R.G. spol. s r.o.

Redakční rada:

Ing. Daneš Burket, Ph.D. – předseda

PhDr. Tomáš Ehler, Ph.D., MBA

Alice Horáková

Mgr. Štěpán Kochánek

prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc.

Mgr. Miriam Vachová

Ing. Petr Vácha

Ing. Jakub Vyvadil



Vážení čtenáři,

letos slaví společnost ŠKODA JS, která patří k oporám českého i evropského jaderného průmyslu, 70. narozeniny. V tomto čísle Vám přinášíme přehled nejdůležitějších milníků, projektů a osobností, které formovaly sedm desetiletí úspěchů plzeňského strojírenství a inženýringu doma i ve světě. Od prvních kroků spojených s výstavbou jaderné elektrárny v Jaslovských Bohunicích až po současné zapojení do projektů malých modulárních reaktorů dokazuje jaderná Škodovka schopnost spojovat tradici, špičkové strojírenství a technické inovace.

Ústav jaderné fyziky Akademie věd ČR, který společně s ÚJV Řež oslavil 70. výročí v loňském roce, prezentuje v tomto čísle unikátní výzkumnou infrastrukturu urychlovačů, které se využívají v širokém spektru oblastí od výzkumu materiálů přes astrofyziku až po geologii a archeologii. I v tomto případě mají úspěchy českých vědců ohlas daleko za našimi hranicemi.

Vedle malých modulárních reaktorů a dalších technologií, které se aktuálně připravují k výstavbě, přinášíme v tomto čísle také článek o současné fázi realizace projektu ITER, největšího termojaderného reaktoru na světě. Ten vzniká ve Francii za významného přispění českých techniků a vědců. Věděli jste, že klíčové komponenty tohoto zařízení, takzvané panely první stěny, se testují v Plzni?

Daneš Burket

předseda redakční rady

Partneři časopisu:



Obsah

PŘEDSTAVUJEME

Malé urychlovače infrastruktury CANAM v ÚJF AV ČR a jejich aplikace

Prof. RNDr. Anna Macková, Ph.D., Mgr. Petr Malinský, Ph.D., doc. Ing. Milan Štefánek, Ph.D., Ing. Jan Štursa, Ing. Václav Zach, Mgr. Jaromír Mrázek, Ph.D., Ing. David Chvátíl, prof. Ing. Jan Kučera, CSc., Ing. Ivo Světlík, Ph.D., Ing. Jan Kameník, Ph.D., Ing. Jan Dobeš, CSc.

4

MEDAILONEK VÝZNAMNÝCH OSOBNOSTÍ

Zlatá éra experimentálního výzkumu hydrodynamiky palivových kazet rychlých reaktorů v Ústavu jaderného výzkumu v Řeži

Miroslav Hrehor a Tereza Jungmannová

19

VÝZKUM, VÝVOJ A NOVÉ TECHNOLOGIE

Vliv kovových materiálů na filtraci spektra mobilních rentgenových generátorů s ohledem na možnou aktivaci nástražných výbušných zařízení

Mgr. David Zoul, Bc. Marián Zelený, Mgr. Pavlo Bakhmachuk, Jakub Haberhauer

20

VÝZKUM, VÝVOJ A NOVÉ TECHNOLOGIE

Modul lehkovodního SMR se zvýšenými tepelnými parametry získanými za SMR řazeným kompresorovým systémem

Ing. Petr Neuman, CSc.

28

PROVOZ A VÝSTAVBA JADERNÝCH ZAŘÍZENÍ

ITER ve fázi integrace: technická realita největšího zařízení pro termojadernou fúzi

Ing. Daneš Burket, Ph.D.

46

OKNO DO HISTORIE

ŠKODA JS – sedmdesát let od zahájení jaderného programu ve Škodovce

Ing. Josef Říha, Mgr. Karel Samec

54

OKNO DO HISTORIE

Příprava, přezkušování a vydávání licencí pro provozní personál

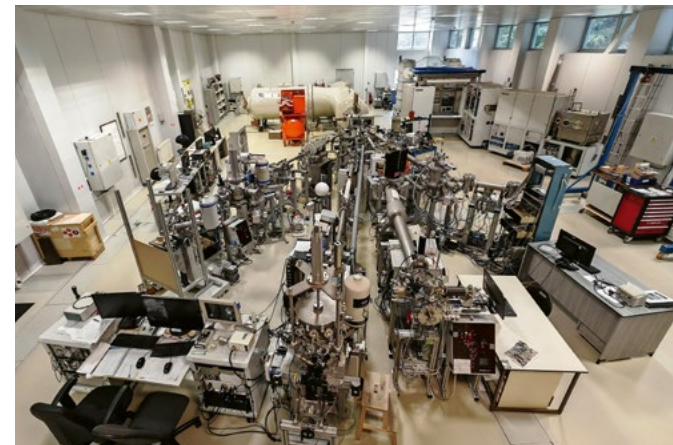
Ze vzpomínek Zdeňka Kříže, díl sedmnáctý

68

AKTUALITY

Dukovany míří k 80 letům provozu
Partnerství Rolls-Royce SMR se rozšiřuje na další lokality v České republice
SÚJB schválilo palivo pro Temelín
Opustil nás Ing. Zdeněk Kříž

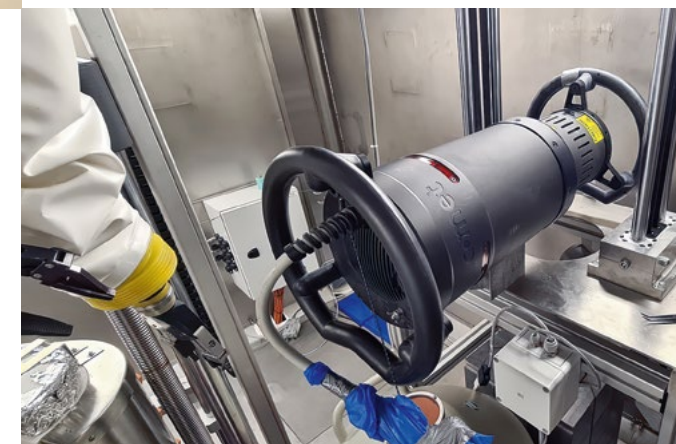
72



4

Malé urychlovače infrastruktury CANAM v ÚJF AV ČR a jejich aplikace

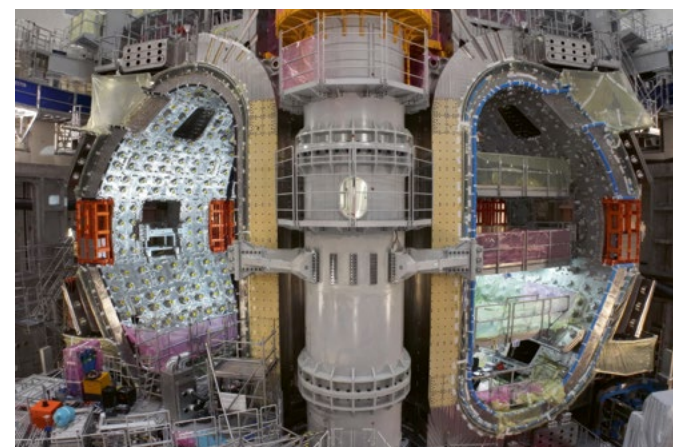
Prof. RNDr. A. Macková, Ph.D., Mgr. P. Malinský, Ph.D., doc. Ing. M. Štefánek, Ph.D., Ing. J. Štursa, Ing. V. Zach, Mgr. J. Mrázek, Ph.D., Ing. D. Chvátíl, prof. Ing. J. Kučera, CSc., Ing. I. Světlík, Ph.D., Ing. J. Kameník, Ph.D., Ing. J. Dobeš, CSc.



20

Vliv kovových materiálů na filtraci spektra mobilních rentgenových generátorů s ohledem na možnou aktivaci nástražných výbušných zařízení

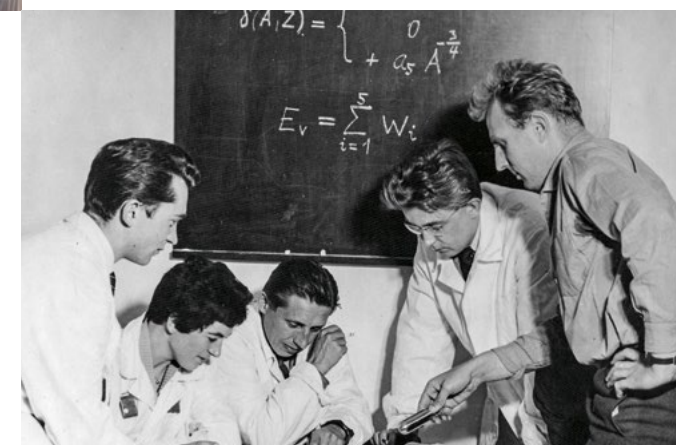
Mgr. David Zoul, Bc. Marián Zelený, Mgr. Pavlo Bakhmachuk, Jakub Haberhauer



46

ITER ve fázi integrace: technická realita největšího zařízení pro termojadernou fúzi

Ing. Daneš Burket, Ph.D.



54

ŠKODA JS – sedmdesát let od zahájení jaderného programu ve Škodovce

Ing. Josef Říha, Mgr. Karel Samec

Malé urychlovače infrastruktury CANAM v ÚJF AV ČR a jejich aplikace

Prof. RNDr. Anna Macková, Ph.D.^{1,2}, Mgr. Petr Malinský, Ph.D.¹, doc. Ing. Milan Štefánik, Ph.D.¹,
Ing. Jan Štursa¹, Ing. Václav Zach¹, Mgr. Jaromír Mrázek, Ph.D.¹, Ing. David Chvátíl¹,
prof. Ing. Jan Kučera, CSc.¹, Ing. Ivo Světlík, Ph.D.¹, Ing. Jan Kameník, Ph.D.¹, Ing. Jan Dobeš, CSc.¹

¹ Ústav jaderné fyziky Akademie věd České republiky, v. v. i.,

² Katedra fyziky, Přírodovědecká fakulta Univerzity J. E. Purkyně

Výzkumná infrastruktura CANAM (Centre of Accelerators and Nuclear Analytical Methods) provozovaná v Ústavu jaderné fyziky AV ČR představuje unikátní soubor laboratoří pro základní i aplikovaný výzkum v řadě oborů. Článek představuje technické a experimentální možnosti jednotlivých urychlovačových pracovišť – laboratoře Tandetronu, cyklotronů TR-24 a U-120M, mikrotronu MT25 a systému urychlovačové hmotnostní spektrometrie MILEA. Součástí infrastruktury jsou také neutronové metody realizované na horizontálních kanálech reaktoru LVR-15. Na konkrétních příkladech článek ukazuje uplatnění urychlovačových technologií při výzkumu materiálů, studiu jaderných reakcí a astrofyzikálních procesů, produkci radionuklidů, radiačních testech i analýzách vzorků z oblasti životního prostředí, geologie, archeologie a kulturního dědictví. Současně poukazuje na význam CANAM jako národní infrastruktury s otevřeným přístupem, která propojuje experimentální vybavení, metodický rozvoj a mezinárodní spolupráci.

The CANAM (Centre of Accelerators and Nuclear Analytical Methods) research infrastructure operated by the Nuclear Physics Institute of the Czech Academy of Sciences comprises a unique set of laboratories supporting basic and applied research across a wide range of fields. The article presents the technical and experimental capabilities of the individual accelerator facilities – the Tandetron laboratory, the TR-24 and U-120M cyclotrons, the MT25 microtron and the MILEA accelerator mass spectrometry system. The infrastructure also includes neutron methods carried out at the horizontal channels of the LVR-15 reactor. Selected examples demonstrate the application of accelerator technologies in materials research, the study of nuclear reactions and astrophysical processes, radionuclide production, radiation testing, and the analysis of environmental, geological, archaeological, and cultural heritage samples. The article also highlights the role of CANAM as a national open-access research infrastructure that brings together experimental facilities, methodological development and international collaboration.

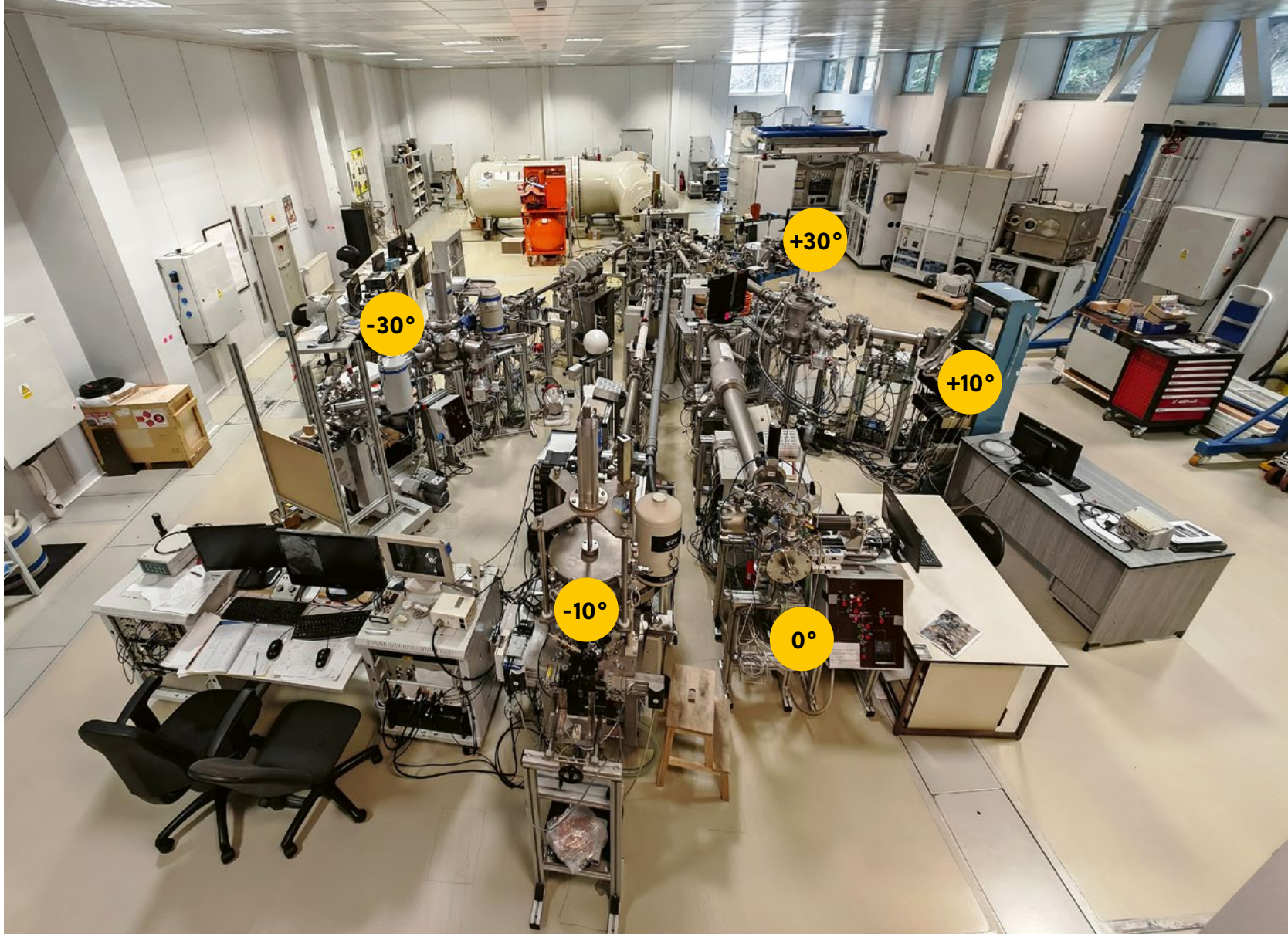


Obr. 1: Hala s urychlovačem Tandetron s iontovými svazky a koncovými stanicemi (nahoře) a externí svazek pro analýzy PIXE/PIGE/RBS (dole)

1. Úvod

Ústav jaderné fyziky AV ČR (ÚJF) provozuje pět urychlovačů částic – elektrostatický urychlovač Tandetron, cyklotrony TR-24 a U-120M, mikrotron MT25 a systém urychlovačové hmotnostní spektrometrie MILEA. Metody založené na interakci urychlených částic nebo jejich sekundárních produktů s terčovým materiálem umožňují zkoumat prvkové složení, vnitřní morfologii v relevanci s mechanickými vlastnostmi, radiační odolnost, ale také zkoumat jaderné reakce, základní parametry reakcí vedoucích k přípravě radionuklidů, v rámci hmotnostní spektrometrie

urychlených iontů přesně analyzovat ¹⁴C i další radionuklidy atd. Urychlovačové technologie ÚJF umožňují nejen generovat široké spektrum svazků, ale také produkovat radionuklidy pro vědecké, průmyslové i medicínské aplikace, testovat radiační odolnost materiálů a detektorů v podmínkách simulujících provoz jaderných zařízení či kosmického prostředí a provádět pokročilé materiálové a strukturální analýzy s vysokým hloubkovým, laterálním rozlišením, případně zkoumat nízká stopová množství prvků.



Urychlovačové laboratoře spolu s Laboratoří neutronové fyziky^[1], která využívá metody neutronové difrakce a rozptylu v instalacích na horizontálních kanálech reaktoru LVR-15, provozovaném v řežském areálu Centrem výzkumu Řež, jsou sdruženy ve výzkumné infrastruktuře Centre of Accelerators and Nuclear Analytical Methods (CANAM). CANAM představuje v rámci ÚJF mimořádně komplexní a v českém i evropském kontextu unikátní platformu pro využití svazků urychlených iontů, neutronů, elektronů a gama záření. Technologická vybavenost, rozsah poskytovaných experimentálních možností a odborné kompetence vytvářejí prostředí, které umožňuje realizovat výzkum na špičkové mezinárodní úrovni a současně poskytovat služby, jež nejsou dostupné na žádném jiném pracovišti v České republice a jsou raritní v Evropě. CANAM tak je nezastupitelnou infrastrukтурой jak pro základní výzkum v jaderné fyzice a astrofyzice, tak pro aplikovaný výzkum fúzních reaktorů, medicínských radionuklidů, v materiálových vědách, chemii, biologii, biomedicíně, elektronice, environmentálních vědách či archeologii a studiu kulturního dědictví.

CANAM je součástí evropského výzkumného prostoru prostřednictvím účasti v řadě mezinárodních konsorcií, projektů a výzkumných sítí, což zajišťuje přístup k evropským infrastrukturám, sdílení know-how a metodik. Infrastruktura funguje v režimu otevřeného přístupu a je využívána jak interními výzkumnými týmy ÚJF, tak širokou komunitou externích uživatelů z České republiky i zahraničí. CANAM propojuje akademickou sféru, průmysl i státní instituce a významně přispívá k rozvoji fúzních reaktorů, medicínských radionuklidů, materiálového inženýrství a dalších strategických oblastí důležitých pro bezpečnost, udržitelnost a technologický pokrok České republiky.

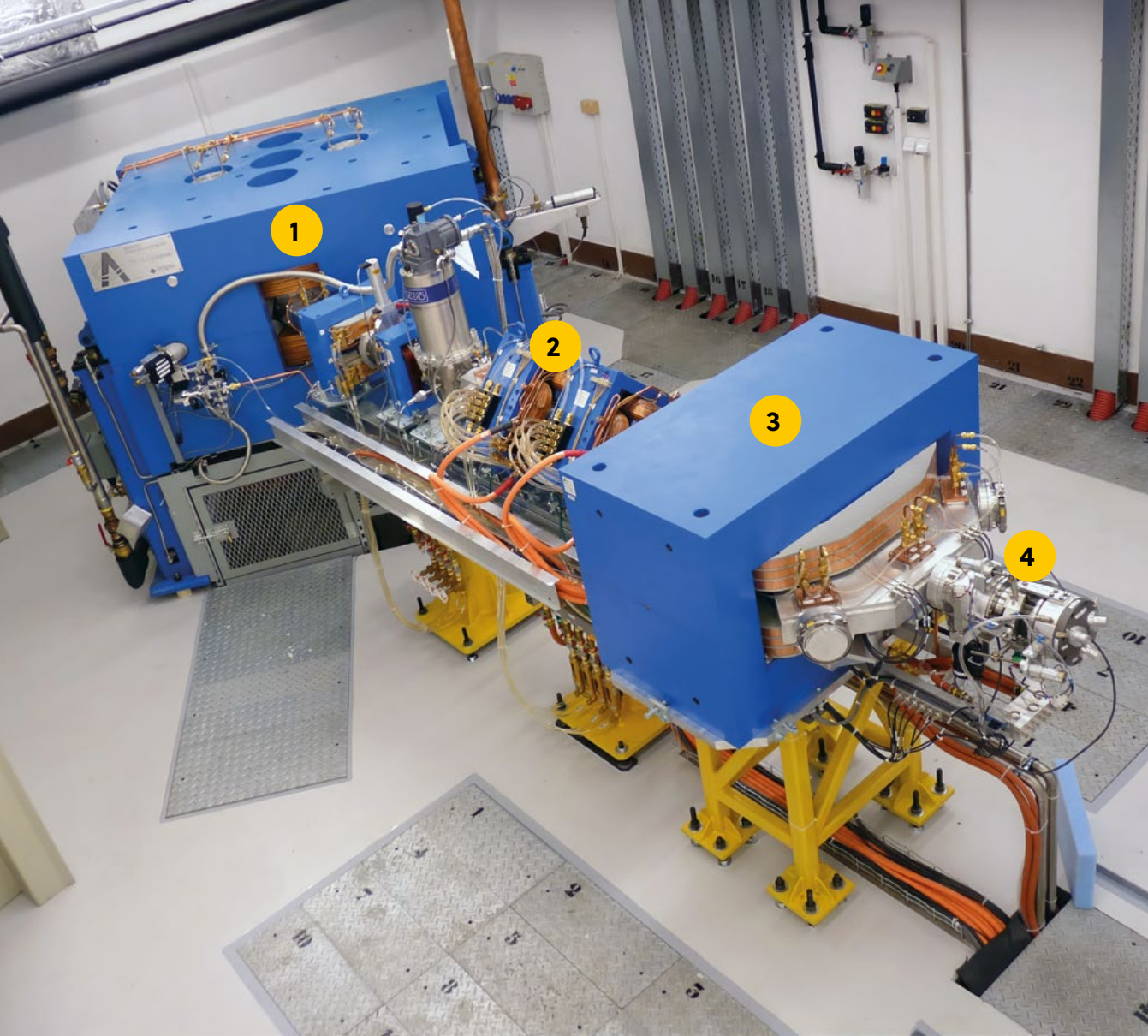
^[1] Tento článek se soustředí na urychlovačové laboratoře CANAM. O aktivitách Laboratoře neutronové fyziky viz též článek V. Wagnera Sedmdesát let existence Ústavu jaderné fyziky AV ČR, Jaderná energie 6 (2025) No. 2, p. 4.

2. Technická charakteristika infrastruktury CANAM

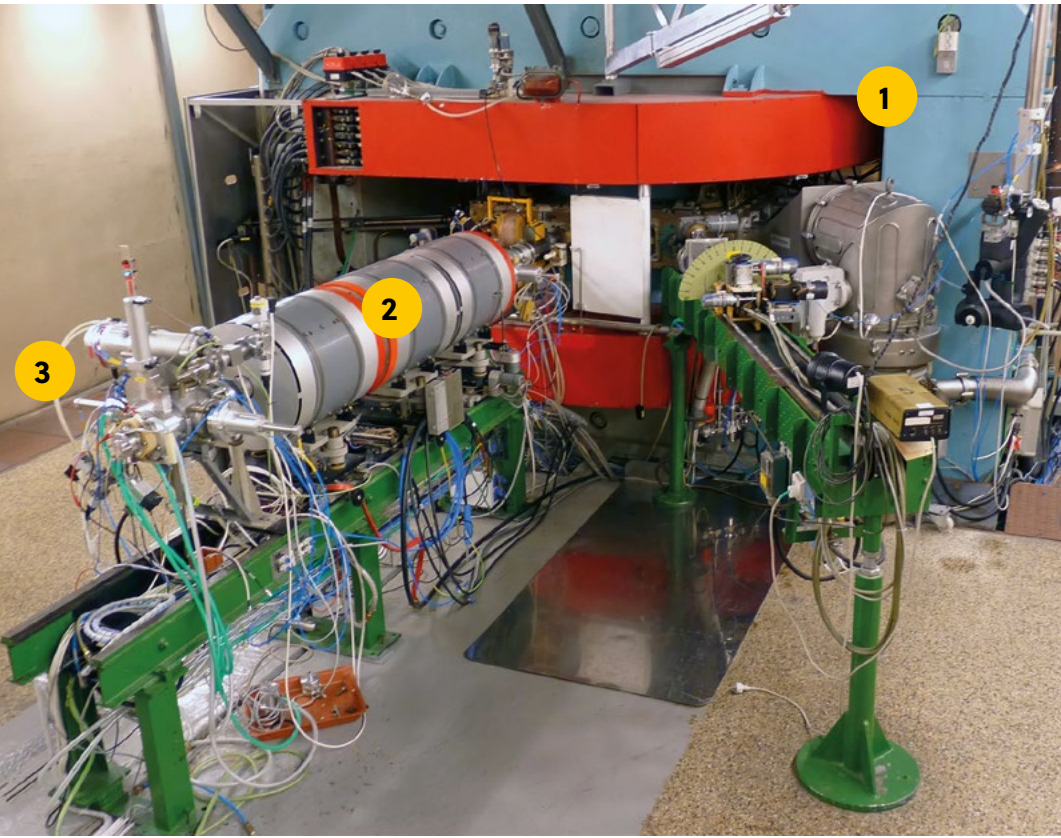
2.1 Laboratoř Tandetronu

Laboratoř Tandetronu je zaměřena na přípravu a charakterizaci mikro a nanostrukturovaných materiálů, které jsou významné pro materiálový, environmentální i biomedicínský výzkum. Iontové analytické metody (IBA), jako jsou RBS (Rutherford Back-Scattering Spectrometry), ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis), ToF-ERDA (Time of Flight-ERDA), PIXE (Particle Induced X-ray Emission), PIGE (Particle Induced gamma-ray Emission) či jejich kombinace, zahrnují analýzy pružně odražených iontů, produktů jaderných reakcí, emitovaného rentgenového záření a umožňují nedestruktivní kvantitativní a kvalitativní analýzu prvkového složení a struktury materiálů^[1, 2]. Tandetron typu MC s maximálním terminálním napětím 3 MV poskytuje iontové svazky v rozsahu energií od stovek keV po desítky MeV. K dispozici jsou tři iontové zdroje: odprašovací zdroj pro pevné terče a dva duoplasmatrony pro plyná média, z nichž jeden je optimalizován pro produkci vysokých proudů protonů. Laboratoř disponuje pěti vakuovými komorami pro různé kombinace IBA metod a specializované experimenty. Součástí je také iontová mikrosonda s optikou Oxford Instruments, umožňující 2D a 3D mapování prvkového složení pomocí PIXE, PIGE a RBS metod, studium vnitřní morfologie metodou STIM (Scanning Transmission Ion Microscopy) a realizaci iontové litografie. Externí svazek umožňuje analýzu vzorků mimo vakuum, což je klíčové zejména pro studium artefaktů kulturního dědictví, radiobiologické aplikace a specifické environmentální a biologické aplikace^[3], viz Obr. 1.

Materiály na bázi polymerů, kovů i grafenu byly úspěšně modifikovány implantací a ozařováním iontovými svazky, stejně jako iontovou litografií, a to pro široké spektrum aplikací. Struktury připravené těmito postupy byly systematicky charakterizovány metodami IBA^[4, 5, 6]. Záměrná modifikace struktury iontovým ozařováním byla rovněž provedena u dvourozměrného materiálu MoS₂, kde vedla ke zlepšení ka-



↑
Obr. 2a: Cyklotron TR-24 (1), ionto-optická trasa (2), rozdělovací magnet (3), poloha terče (4)



←
Obr. 2b: Izochronní cyklotron U-120M (1), ionto-optická trasa (2), poloha terče (3)

talytické účinnosti při reakci produkce vodíku (HER), jako čistého paliva pro budoucnost ^[7].

Ve spolupráci s laboratoří ATOMKI (Maďarsko) ^[1] byla iontová mikrosonda využita k vytváření mikrostruktur v polymerech a skle (optické mřížky) pomocí fokusovaných svazků těžkých iontů, což představuje experimenty unikátní i v evropském kontextu. Současně byly provedeny fundamentální studie ztrát energie rychlých těžkých energetických iontů, doplněné o validaci existujících semiempirických modelů pro výpočet energetických ztrát nabitých částic. Získaná data jsou velmi důležitá v oblasti dozimetrie a mikroelektroniky a byla doplněna do celosvětové databáze experimentálních energetických ztrát iontů ^[8].

Metody IBA lze kombinovaně využít s fokusovanými svazky na rozměr menší než 1 mikrometr pro prvkové 3D mapování a stanovit tak prvkové složení v kombinaci se studiem vnitřní morfologie pomocí STIM pro komplexní charakterizaci polymerních/grafen oxid/nanočásticových kompozitů, pro zobrazování či ozařování živých buněk a malých organismů v rámci environmentálních studií a také pro detailní analýzu vzorků kulturního dědictví ^[1, 6, 9, 10].

2.2 Oddělení urychlovačů: cyklotrony TR-24, U-120M a mikrotatron MT25

Cyklotron TR-24 (viz Obr. 2 a) poskytuje svazky protonů s energiemi v rozsahu 18–24 MeV. Urychlovač je vybaven krátkou výstupní ionto-optickou trasou zakončenou rozdělovacím magnetem, který umožňuje vychýlení svazku do dvou směrů s úhly $\pm 40^\circ$. Do centra cyklotronu je svazek zaveden pomocí systému axiální injekce s externím iontovým zdrojem typu CUSP. Tento speciální druh iontového zdroje využívá magnetické pole s vrcholovou (tzv. cusp) konfigurací, která umožňuje efektivní udržení plazmatu a zvyšuje ionizační účinnosti při pouštění pracovního plynu, v tomto případě vodíku.

Díky tomuto typu iontového zdroje je maximální dosažitelný proud urychleného a vyvedeného svazku až 300 μA . Cyklotron pracuje v režimu urychlování záporných vodíkových iontů H^- , které jsou po dosažení požadované

energie převedeny pomocí tzv. přebíjecí metody (ionty H^- ztrácejí elektrony při průchodu tenkou uhlíkovou folií) na protony a následně vyvedeny z urychlovací komory v magnetickém poli cyklotronu.

Konstrukce cyklotronu umožňuje vývod protonového svazku alternativně do terčového systému (možná volba jednoho ze tří instalovaných terčů) umístěnému přímo na vakuové komoře cyklotronu nebo na vstup do ionto-optické trasy s rozdělovacím magnetem. Díky dalšímu identickému terčovému systému za rozdělovacím magnetem je možné instalovat na TR-24 až osm terčů současně, což výrazně zvyšuje flexibilitu při výrobě radionuklidů i při experimentálních aplikacích.

Izochronní cyklotron U-120M (viz Obr. 2 b) je zařízení, které umožňuje urychlovat různé izotopy lehkých jader v rozsahu energií od MeV do desítek MeV. Jedná se o univerzální víceúčelový urychlovač, který lze nakonfigurovat podle požadavku na typ částic, energie i podle způsobu využití. Je unikátně provozován jak v kladných (vývod svazku pomocí deflektorové soustavy), tak v záporných (vývod svazku pomocí přebíjecí metody) režimech. V kladných režimech poskytuje vyvedené svazky protonů s energiemi 10–36 MeV, deutronů (10–20 MeV), dále svazky jader $^4\text{He}^{2+}$ (20–40 MeV) a $^3\text{He}^{2+}$ (17–54 MeV) s proudy několik μA . Urychlená He jádra, v rámci evropských laboratoří dostupná jen výjimečně, jsou velmi žádaná. Díky technologicky náročným inovacím realizovaným pracovníky Oddělení urychlovačů byl cyklotron U-120M modernizován a rozšířen o možnost urychlování záporných iontů H^- a D^- . Pomocí přebíjecího mechanismu ($\text{H}^- \rightarrow \text{p}^+$, resp. $\text{D}^- \rightarrow \text{D}^+$) lze následně získat stabilní svazky vyvedených kladných iontů o intenzitách jednotek nA až desítek μA . Svazky kladných částic na vnitřních poloměrech, tj. uvnitř urychlovací komory, dosahují desítek až stovek μA a lze je využít na speciálně navržených tzv. interních tercích.

Zároveň pro potřeby základního výzkumu i praktických aplikací byly navrženy, implementovány a využívány různé typy externích terčových stanic, držáků ozařovaných vzorků a souvisejících technologických systémů.

Jako příklad lze uvést vývoj a implementaci různých typů pevných i kapalných terčů vč. prototypu terče chlazeného kapalným dusíkem pro unikátní produkci fluorescenčních nanodiamantů. Nově byl vyvinut terč pro produkci izomeru ^{83}Rb v reakci $^{nat}\text{Kr}(\text{p}, \text{xn})$ ^{83}Rb , který je následně klíčový pro kalibrační postupy v experimentech KATRIN a XENON.

Dále byl navržen a zkonstruován nový beryliový (Be) terč pro produkci rychlých neutronů. Při jaderné reakci urychlených protonů (max. 36 MeV/10 μA) s Be terčem (tl. 2,5 mm) vznikají neutrony s maximální energií přibližně 34 MeV a tokem až $8,8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ve vzdálenosti 50 cm od terče. Pro tento terč byl navržen a instalován neutronový kolimátor o délce přibližně 2,6 m, který umožňuje efektivní kolimaci a extrakci rychlých neutronů do experimentální haly s nízkým elektromagnetickým rušením a volným prostorem o délce zhruba 20 m. Takové uspořádání umožňuje provádět spektrometrická měření energie neutronů metodou času průletu (time-of-flight, TOF).

Urychlené svazky deuteria a vzácného izotopu ^3He jsou využívány pro studium jaderných reakcí při velmi nízkých energiích – typických pro reakce tvorby prvků ve stelárním prostředí. Tato měření využívají složené struktury uvedených projektilových iontů a dovolují extrahovat účinné průřezy reakcí nukleosyntézy z měření, které probíhá při laboratorních energiích. Svazky se dále využívají k měření a validaci jaderných dat pro astrofyziku ^[11], k produkci homologů supertěžkých prvků ^[12] (zde je využíván obtížně dostupný svazek $^3\text{He}^{2+}$), k měření excitačních funkcí jaderných reakcí významných pro produkci medicínsky relevantních radionuklidů ^[13], k ozařování biologických vzorků pro účely buněčné dozimetrie ^[14], k testování nových typů dozimetrů a detektorů kosmického záření ^[15], k testování radiační odolnosti elektronických komponent ^[16], k výrobě kalibračních zdrojů ^[17] a k testování radiačního poškození ozářených materiálů urychlenými protony i neutrony ^[18]. Významnou oblast výzkumu dále představují experimenty s neutrony pro jadernou fúzi, experimentální simulace neutronových polí budoucího zařízení IFMIF (Internatio-

nal Fusion Materials Irradiation Facility), měření aktivačních účinných průřezů ^[19] a určování neutronových ^[20, 21] a částicových polí.

2.3 Mikrotatron MT25

Mikrotatron MT25 poskytuje elektronové svazky s maximální energií 24 MeV. Energie je laditelná v krocích 1 MeV v rozsahu 12–24 MeV a v krocích 0,5 MeV v rozsahu 5–12 MeV. Elektronový svazek je generován v pulzním režimu s délkou pulzu 3,5 μs , opakovací frekvencí přibližně 423 Hz a středním proudem 0,5–20 μA . Velikost svazku je nastavitelná od 2 do 20 mm^2 a lze vytvářet homogenní pole $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ve vzdálenosti 1 m s homogenitou $\pm 5\%$. Dávkový příkon dosahuje stovek $\text{Gy} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \mu\text{A}^{-1}$, v kolimovaném svazku o několik řádů více. Brzdné gama záření je generováno dopadem elektronového svazku na wolframový terč, kde prudké zpomalení elektronů v těžkém jádře vede ke vzniku spojitého spektra fotonů s horní energetickou hranicí odpovídající energii dopadajících elektronů. Dávkový příkon gama záření činí přibližně $10 \text{ Gy} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \mu\text{A}^{-1}$ v ose svazku ve vzdálenosti 1 m a $0,5 \text{ Gy} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \mu\text{A}^{-1}$ v homogenním poli ^[22] a rovněž lze produkovat sekundárně neutrony ^[23].

Mikrotatronová laboratoř je vybavena HPGe detektorem, vícekanálovým analyzátozem a automatickým pneumatickým transportním systémem pro rychlé měření radionuklidů s krátkým poločasem. Zařízení je využíváno pro testování detektorů TimePix a MediPix, studium radiačního poškození materiálů, sterilizaci a produkci opticky aktivních center v nanodiamantech ^[24–26]. Studie radiační odolnosti mohou být prováděny za přesně kontrolovaných a monitorovaných podmínek pomocí elektronových a fotonových svazků. Fotonové svazky se často využívají pro charakterizaci a prvkovou analýzu geologických, biologických, environmentálních a dalších typů vzorků metodou PAA (Photon Activation Analysis).

Studují se a testují optická centra vzniklá ozařováním v různých materiálech, sklech a krystalech, způsobené brzdným zářením a také změny jejich optických, elektrických a mechanických vlastností. Elektronové i fotonové svazky jsou vhodné pro sterilizaci; v případě elek-



tronového svazku je sterilizační dávky dosaženo během několika minut. Svazky s energií až 10 MeV se používají k ozáření biologických, potravinářských a podobných vzorků. Elektronové svazky se rovněž využívají k produkci center dusík-vakance (nitrogenvacancy centers) v nanodiamantech [26].

2.4 AMS MILEA

Systém MILEA (Multi-Isotope Low-Energy Accelerator mass spectrometer) představuje zařízení nové generace, jehož součástí je urychlovač s vakuově izolovanou vysokonapěťovou platformou, která umožňuje provoz při terminálním napětí až 300 kV. Tento nízkoenergetický systém pro urychlovačovou hmotnostní spek-

trometrii (AMS – Accelerator Mass Spectrometry) je navržen pro vysoce citlivé stanovení radionuklidů s dlouhým poločasem přeměny, jako jsou ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{41}Ca , ^{129}I , ^{236}U , ^{239}Pu a další aktinoidy, a dosahuje detekčních limitů o několik řádů nižších než konvenční radiometrické nebo hmotnostněspektrometrické metody. Nízkoenergetická část systému zahrnuje odprašovací iontový zdroj, který generuje stabilní svazky záporných iontů. Ty jsou vedeny přes achromatickou kombinaci 90° elektrostatického a 90° magnetického deflektoru, která zajišťuje účinné separace iontů podle energie a hybnosti. Záporné ionty poté vstupují do urychlovače, kde procházejí heliovou stripovací komorou. Srážkami s atomy helia dochází u části urychlených

↑
Obr. 3: Hala laboratoře AMS s urychlovačem MILEA, Foto: AV ČR - Jana Plavec

iontů ke ztrátě několika elektronů, která vede k potlačení izobarických molekulových interferencí a především ke změně polarit y iontů. Tato část systému je klíčová pro přesné měření radionuklidů s velmi nízkými koncentracemi. Vysokoenergetická část systému za urychlovačem je tvořena sekvencí 90° magnetického analyzátoru, 120° elektrostatického deflektoru a 110° magnetického deflektoru, které společně zajišťují vysokou transmisní účinnost a selektivitu měřených izotopů. Za urychlovačem je umístěn kvadrupólový triplet, který poskytuje jednotné ionto-optické podmínky pro všechny analyzované izotopy a výrazně usnadňuje nastavení optimálních parametrů systému.

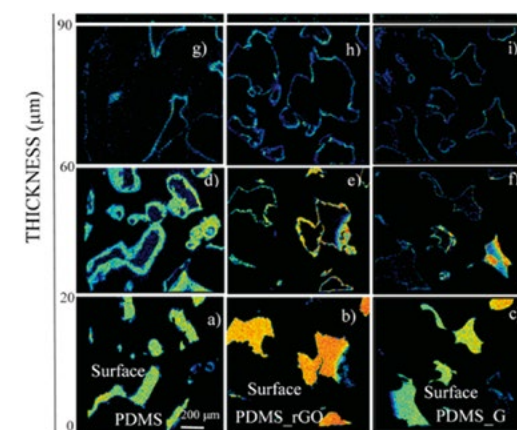
Na konci měřicí dráhy je plynem plněná ionizační komora, která umožňuje vynikající separaci a identifikaci interferujících částic na základě energie a specifické ztráty energie v detektoru. Tato detekční technologie je zásadní pro dosažení extrémně nízkých pozadí a vysoké selektivity. Systém MILEA prokázal při akceptačních testech výrobce (Ionplus AG, Švýcarsko) schopnost dosáhnout izotopových poměrů srovnatelných se zařízeními s výrazně většími urychlovači s vyššími nároky na provoz a údržbu [27]. Tyto parametry řadí MILEA mezi nejpresnější nízkoenergetické AMS systémy současnosti, viz Obr. 3.

3. Výsledky a aplikace

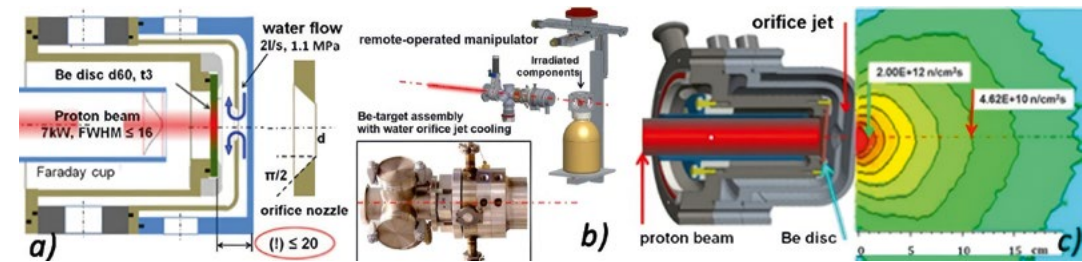
Flexibilní materiály a dvourozměrné uhlíkové struktury, jako je grafen oxid (GO), polymery např. polymethylmethakrylát (PMMA) a polyimid (PI), byly rozsáhle studovány a úspěš-

ně modifikovány pomocí iontové implanta-ce a iontové litografie. Iontové ozařování GO vede v závislosti na typu použitých iontových svazků, jejich hmotnosti a energii k výraznému energetickému brzdění a tvorbě defektů, které způsobují redukci funkčních skupin obsahujících kyslík a případnému vzniku grafenových domén. Tyto procesy zásadně mění elektrické vlastnosti GO a umožňují řízenou funkční úpravu elektrických a následně i senzorických vlastností [4]. U polymerních materiálů dochází při iontovém ozařování k uvolňování těkavých fragmentů, štěpení makromolekulárních řetězců, dehydrogenaci a zesíťování, což vede k výrazným změnám elektrické vodivosti i mechanických parametrů. Pomocí fokusovaného iontového mikrosvazku s fluencí 1 800 nC·mm⁻² byly vytvořeny mikrostruktury, v nichž ozářené oblasti fungují jako elektrody, zatímco neozářené části plní funkci dielektrika. Nejvyšší dosažená kapacita mikrokondenzátoru, přibližně 4 pF, byla naměřena u struktur na bázi GO ozářeného uhlíkovými ionty, zatímco PMMA a PI vykazovaly nižší hodnoty. Iontová mikro-litografie se ukázala jako rychlá a přímá metoda vhodná pro výrobu mikroelektronických prvků a mikrosenzorů.

Kompozitní materiály obsahující PDMS (polymethyldisiloxan) s redukováným grafenovým oxidem (rGO) a grafenem (G) byly charakterizovány pomocí pokročilých iontových analytických metod STIM, PIXE, RBS a PIGE. STIM s protony o energii 2,7 MeV umožnil detailní vizualizaci vnitřní morfologie kompozitů s vysokým kontrastem. PIXE mapy odhalily distribuci křemíku mimo póry kompozitního materiálu, což korespondovalo s morfologií identifikovanou metodou STIM [5, 9], viz Obr. 4. Kombinace těchto metod umožnila jednoznačně rozlišit objemovou hmotu kompozitu (tmavé oblasti) od pórů (barevné oblasti). RBS poskytlo laterální rozložení uhlíku, přičemž bylo zjištěno, že uhlík vyplňuje póry v případě G-PDMS, avšak nikoli u rGO-PDMS. Finální 3D elementární mapování, doplněné o SEM (Scanning Electron Microscope) analýzu, umožnilo vizualizovat ukotvení nanovýplní v porézní matici i velikost grafenových nanočástic v pórech ma-



→ **Obr. 4:** STIM snímky z různých hloubek vzorku (od povrchu) neozářeného PDMS (a, d, g), rGO-PDMS (b, e, h) a G-PDMS (c, f, i)



← **Obr. 5:** a) detail beryliového terče b) uspořádání neutronového generátoru HPNC c) simulované neutronové pole

trice PDMS. Tato komplexní charakterizace významně přispívá k optimalizaci mechanických, elektrických a funkčních vlastností grafen-polymerních hybridních kompozitů pro aplikace v mikroelektronice a biomedicině.

Pro potřeby experimentů v oblasti neutronové fyziky byl na cyklotronu U-120M vyvinut nový systém časového shlukování neutronů ve svazku. Neutronově indukované reakce jsou klíčové pro jadernou energetiku, vývoj pokročilých technologií (např. urychlovačem řízené systémy pro jadernou energetiku) i fúzní aplikace. Metoda měření doby letu neutronů (neutron *time-of-flight*, TOF) vyžaduje specifickou časovou strukturu protonového svazku s poměrem šířky pulzu k periodě. Standardní provoz cyklotronu poskytuje poměr přibližně 1:8, což omezuje využitelný rozsah neutronových energií. Nově vyvinutý shlukovací systém [28] umožňuje posunout tento poměr až k hodnotě 1:200 a tím významně zlepšit parametry TOF měření na U-120M.

Na cyklotronu TR-24 byl vyvinut vysoce výkonný neutronový generátor (HPNC) založený na zdrojové reakci p(24 MeV) + Be, schopný produkovat intenzivní neutronové pole s hustotou toku rychlých neutronů řádu až 10¹² cm⁻²·s⁻¹ v blízkých geometriích u terče. Spektrální složení neutronového pole odpovídá podmínkám blízkým fúzním experimentům typu ITER [29]. I při třetinovém výkonu představuje neutronový generátor HPNC cyklotronu TR-24 neefektivnější neutronový zdroj v Evropě, umožňující testování radiační odolnosti diagnostických komponent ITER v relevantním energetickém spektru, což není možné na štepných jaderných reaktorech (viz Obr. 5).

Cyklotron U-120M poskytuje unikátní svazky ³He a deuterónů, které umožňují studium

jaderných reakcí významných pro astrofyziku. Přímá měření účinných průřezů reakcí při nízkých energiích vstupních nabitých částic nejsou realizovatelná kvůli extrémně nízkým hodnotám účinných průřezů, a proto se využívají nepřímé metody, zejména THM (Trojan Horse Method) a ANC (Asymptotic Normalisation Coefficients). Obě metody tak umožňují získat nepřímo astrofyzikálně relevantní data v energetickém rozsahu, který je jinak experimentálně nedostupný nebo velmi obtížně dostupný. Účinné průřezy u nízkých (nebo nulové limity energií u metody ANC) mohou být vyvozeny z naměřených dat při energiích v oblasti 10–20 MeV. Těmito metodami byly na U-120M studovány S-faktory (astrofyzikální S-faktory charakterizují jadernou reakci po vyčlenění vlivu průniku Coulombovou bariérou) např. pro reakce jako ¹⁸O(p,γ), ²⁶Si(p,γ) [30, 31] nebo data pro reakce d+d [32] nezatížená elektronovým screeningem v oblasti energií od termálních hodnot po oblast energií nukleosyntézy Velkého třesku. Microtron MT25 je významným zdrojem fotonového záření pro PAA (Photon Activation Analysis), která umožňuje stanovení širokého spektra prvků v různých maticích, zejména geologických. Některé prvky přitom nelze stanovit neutronovou aktivační analýzou (NAA). PAA byla úspěšně využita například při analýze náramku z pozdní doby bronzové, kde koncentrace dusíku umožnila určit, že artefakt byl vyroben z kůry stromu, nikoli ze zvířecí kůže, a díky ne-destruktivní povaze metody mohl být vrácen do muzejní sbírky [33].

V oblasti AMS byla vyvinuta šetrná metoda odběru vzorků pro radiouhlíkové datování skalních kreseb v jeskyních, minimalizující poškození maleb. Analýza provedená ve spolupráci s ATOMKI (Maďarsko) ukázala, že kresby v Ka-

teřinské jeskyni v Moravském krasu představují nejstarší známé jeskynní malby v České republice, datované do období 4 450–4 230 př. n. l. [34]. Dále byla navržena nová metoda přípravy fluoridové terčové matrice pro stanovení ²³⁶U v přírodních vzorcích, která je výhodnější než běžně používané oxidové matrice s nosičem Fe₂O₃ [35], a zlepšuje citlivost i stabilitu měření pro environmentální monitoring, jadernou bezpečnost a forenzní aplikace. Zavedeny byly také metody zpracování vzorků pro stanovení kosmogenních ¹⁰Be a ²⁶Al v křemenu. Jedním z významných výstupů týmu působícího v laboratoři je stanovení stáří vrstvy sedimentů, ve které se nacházejí kamenné nástroje. Se stářím 1,42±0,10 miliónů let je to v současné době nejstarších známá lokalita výskytu předchůdců člověka v Evropě [36].

Shrnutí a výhled

Tento článek představil hlavní přístrojové vybavení a výzkumné aktivity urychlovačových laboratoří výzkumné infrastruktury CANAM ÚJF AV ČR. Laboratoř Tandetronu disponuje širokým portfoliem iontových technik, od fokusovaných mikrosvazků až po iontové metody, které umožňují syntézu, modifikaci a detailní charakterizaci nových materiálů. Pokročilé instrumentace, vyvíjené týmem zkušených vědců a techniků, vedly k významnému zvýšení přesnosti, citlivosti a prostorového rozlišení analytických metod a současně umožňují změny materiálů na atomární úrovni, např. pro kvantové technologie. Další rozvoj bude směřovat k vysoce rozlišovacím a extrémně povrchově a hloubkově citlivým technikám, k metodám s velmi nízkými detekčními limity a k pokročilému 3D mapování.

Cyklotrony TR-24 a U-120M díky širokému rozsahu energií a proudů svazků nabitých částic

poskytují unikátní možnosti pro experimenty v jaderné fyzice, astrofyzice i materiálovém výzkumu. Umožňují také produkci radionuklidů pro nukleární medicínu a generování intenzivních neutronových polí s energetickým rozsahem až 33 MeV. Nově vyvinuté systémy – shlukovací systém na urychlovači U-120M a vysoce výkonný neutronový generátor na TR-24 – rozšiřují experimentální možnosti a řadí pracoviště mezi přední evropská centra v oblasti fyziky s rychlými neutrony.

Mikrotron MT25 zůstává důležitým nástrojem pro fotonovou aktivační analýzu, testování detektorů, studium radiačních účinků a modifikaci materiálů. Pokračující výzkum zahrnuje ozařování nanodiamantů, studium radiační odolnosti materiálů pro kosmické aplikace a spolupráci s domácími i zahraničními institucemi.

AMS systém MILEA rozšiřuje analytické možnosti CANAM o ultracitlivé stanovení radionuklidů. Je využíván pro radiouhlíkové datování, monitorování životního prostředí, forenzní analýzy, ochranu ohrožených druhů (CITES) i studium geologických a archeologických procesů. Nové metody přípravy terčů, například fluoridové matrice pro stanovení ²³⁶U, zvyšují citlivost a spolehlivost měření.

CANAM představuje moderní, dynamicky se rozvíjející infrastrukturu, která kombinuje urychlovače částic a neutronovou fyziku, pokročilé analytické metody a interdisciplinární výzkum. Všechny laboratoře jsou otevřeny studentům a mladým vědcům, čímž infrastruktura významně přispívá k výchově nové generace odborníků v oblasti jaderné vědy a materiálového výzkumu.

Poděkování

Tento výzkum byl realizován v rámci infrastruktury CANAM (Centre of Accelerators and Nuclear Analytical Methods), která je podporována Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky projektem LM 2015056. Publikace vznikla s podporou OP VVV, MŠMT ČR v rámci projektu CANAM OP (CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_013/0001812), dále s podporou Grantové agentury České republiky (GAČR č. 1902482S) a projektu RAMSES (CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000728) financovaného z OP VVV, MŠMT ČR. Astrofyzikální experimenty byly podpořeny projektem SPIRAL2CZ, EF16_013/0001679.

Reference

[1] A. Romanenko, V. Havránek, A. Macková, M. Davidková, M. Cutroneo, A. G. Ponomarev, G. Nagy, J. H. Stammers, I. Rajta, Rev. Sci. Instrum. 90, 013701 (2019).

[2] Nuclear Physics Institute of the Czech Academy of Sciences, <https://www.ionbeamcenters.eu/ion-beam-facilities/nuclear-physics-institute/>

[3] L. Giuntini, M. Massi, S. Calusi, L. Castelli, L. Carraresi, M. E. Fedi, N. Gelli, L. Liccioli, P. A. Mandò, A. Mazzinghi, L. Palla, F. P. Romano, C. Ruberto, F. Taccetti, Nucl. Instrum. Meth. B 348, 14 (2015).

[4] P. Malinský, A. Romanenko, V. Havránek, J. H. Stammers, V. Hnatowicz, M. Cutroneo, J. Novák, P. Slepíčka, V. Švorčík, K. Szökölóvá, D. Bouša, Z. Sofer, A. Macková, Appl. Surf. Sci. 528, 146802 (2020).

[5] M. Cutroneo, V. Havránek, A. Macková, P. Malinský, L. Torrisi, J. Lorinčík, J. Luxa, K. Szökölóvá, Z. Sofer, J. H. Stammers, Vacuum 163, 10–14 (2019).

[6] M. Cutroneo, V. Havránek, A. Macková, A. Torrisi, J. Flaks, P. Slepíčka, L. Torrisi, Nucl. Instrum. Meth. B 459, 137 (2019).

[7] J. Luxa, V. Mazánek, A. Macková, P. Malinský, S. Akhmadaliev, Z. Sofer, Appl. Mater. Today 14, 216 (2019).

[8] R. Mikšová, A. Macková, P. Malinský, Nucl. Instrum. Meth. B 406, 179–184 (2017).

[9] A. Macková, J. Kučera, J. Kameník, V. Havránek, K. Kranda, Nucl. Phys. News 27, 12 (2017).

[10] A. Macková, J. Kučera, J. Kameník, V. Havránek, Z. Smit, L. Giuntini, Zs. Kasztovszky, Nuovo Cimento C 42, 53 (2019).

[11] V. Burjan, Z. Hons, A. Tumino, Eur. Phys. J. A 55, 114 (2019).

[12] K. Cubová, M. Semelová, M. Němec, J. John, J. P. Omtvedt, J. Radioanal. Nucl. Chem. 318(3), 2455–2463 (2018).

[13] J. Červenák, O. Lebeda, Nucl. Instrum. Meth. B 458, 118–123 (2019).

[14] L. Vyšín, K. Pachnerová Brabcová, V. Štěpán, P. MorettoCapelle, B. Bugler, G. Legube, P. Cafarelli, R. Casta, J. P. Champeaux, M. Sence, M. Vlk, R. Wagner, J. Štursa, V. Zach, S. Incerti, L. Juha, M. Davidková, Radiat. Environ. Biophys. 54(3), 343–352 (2015).

[15] C. Granja, J. Jakubek, S. Polanský, V. Zach, P. Krist, D. Chvátil, J. Štursa, M. Sommer, O. Ploch, S. Kodaira, M. Martšířiková, Nucl. Instrum. Meth. A 908, 60–71 (2018).

[16] F. Krížek, J. Ferencei, T. Matlocha, J. Pospíšil, J. Dudák, P. Šálek, B. Sopko, J. Voltr, Nucl. Instrum. Meth. A 894, 87–94 (2018).

[17] M. Aker, K. Altenmüller, M. Arenz *et al.*, Phys. Rev. Lett. 123, 221802 (2019).

[18] S. Menke, IEEE Nucl. Sci. Symp. Med. Imaging Conf. (NSS/MIC) (2012).

[19] M. Majerle *et al.*, Nucl. Phys. A 953, 139–157 (2016).

[20] M. Štefánik *et al.*, Radiat. Phys. Chem. 155, 294–298 (2019).

[21] M. Štefánik *et al.*, Radiat. Phys. Chem. 190, 109767 (2022).

[22] M. Vognar, C. Šimáně, A. Burian, D. Chvátil, Nucl. Instrum. Meth. A 380(3), 613–617 (1996).

PŘEDSTAVUJEME

[23] M. Králík, J. Šolc, D. Chvátil, P. Krist, K. Turek, C. Granja, Rev. Sci. Instrum. 83(8), 083502 (2012).

[24] Z. Randa, J. Kučera, J. Mizera, J. Frána, J. Radioanal. Nucl. Chem. 271, 589–594 (2007).

[25] C. Granja, K. Kudela, J. Jakubek *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A 911, 142–150 (2018).

[26] H. Raabová, D. Chvátil, P. Cigler, Nanoscale 11(40), 18537–18545 (2018).

[27] J. Kučera, S. Maxeiner, A. Müller, M. Němec, J. John, I. Světlík, J. Kameník, D. Dreslerová, K. Pachnerová Brabcová, J. Tecl, J. Bourquin, Nucl. Instrum. Meth. B 527, 29–36 (2022).

[28] M. Cihák, J. Štursa, P. Krist, R. Běhal *et al.*, Proc. 22nd Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Cape Town (2019).

[29] P. Bém, R. Běhal, J. Štursa, M. Štefánik *et al.*, EPI Web Conf. 231 (2020).

[30] A. Tumino *et al.*, Astrophys. J. 785(2), 96 (2014).

[31] G. D’Agata *et al.*, Phys. Rev. C 103(1), 015806 (2021).

[32] A. Tumino, C. Spitaleri, A. M. Mukhamedzhanov, S. Typel, M. Aliotta, V. Burjan, M. Gimenez del Santo, G. G. Kiss, V. Kroha, Z. Hons, M. La Cognata, L. Lamia, J. Mrázek, R. G. Pizzone, S. Piskor, G. G. Rapisarda, S. Romano, M. L. Sergi, R. Spartà, Phys. Lett. B 700, 111–115 (2011).

[33] I. Krausová, J. Tajer, I. Světlík *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. B 448, 26–31 (2019).

[34] P. Zajíček, M. Golec, I. Světlík, Vesmír 98, 588–591 (2019).

[35] T. Prášek, M. Němec, P. Steier, M. Kern, M. Honda, M. Hain, K. Zhang, Nucl. Instrum. Meth. B 472, 64–71 (2020).

[36] R. Garba, V. Usyk, L. YläMella, J. Kameník, K. Stübner, J. Lachner, G. Rugel, F. Veselovský, N. Gerasimenko, A. I. R. Herries, J. Kučera, M. F. Knudsen, J. D. Jansen, Nature 627(8005), 805–810 (2024).



Prof. RNDr. Anna Macková, Ph.D.

působí v Ústavu jaderné fyziky AV ČR jako vedoucí Laboratoře Tandetronu, kterou vede již 14 let, a jako zástupkyně ředitele. Ve své vědecké práci se zaměřuje na modifikaci a charakterizaci materiálů energetickými iontovými svazky, studium radiačního poškození pokročilých materiálů pro fúzi, nanoelektroniku, sensoriku atd. Současně působí na Přírodovědecké fakultě Univerzity Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem jako profesorka aplikované fyziky, kde se věnuje výuce a vedení studentů. Má dlouholeté zkušenosti s působením v mezinárodních odborných organizacích, hodnotících komisích a poradních orgánech. Působí v Programme Advisory Committee centra tandemových urychlovačů IFIN-HH v Rumunsku, v User Selection Panelu Ion Beam Center při Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf a v externí vědecké radě evropského konsorcia iontových center RADIATE. Je také členkou mezinárodních poradních výborů konferencí Ion Beam Modification of Materials (IBMM) a Applied Nuclear Physics Conference (ANPC). Dlouhodobě se podílí na odborném rozvoji výzkumné infrastruktury CANAM a na řešení národních i mezinárodních výzkumných projektů.

INVITATION TO THE NTERNATIONAL CONFERENCE

pwr

PRAGUE 2026

20-21 October

Grand Hotel International Prague

160+ PARTICIPANTS | 36 PRESENTATIONS | COUNTLESS DISCUSSIONS

TOPICS OF THE CONFERENCE

Nuclear Fuel and Fuel Cycle

Safe Long-Term Operation

Efficient Maintenance Solutions for NPPs

New PWR Builds (large and small)

ORGANIZED BY

UNDER THE AUSPICES

GENERAL PARTNER

Czech Nuclear Society

Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic

ENSR

EUROPEAN NUCLEAR SOCIETY

framatome

PARTNERS

fortum

Studsvik

FNC

ÚJV

Westinghouse

bertin

vt nuclear

REGISTER BY 14 OCTOBER AT

www.pwr-prague.com

Zlatá éra experimentálního výzkumu hydrodynamiky palivových kazet rychlých reaktorů v Ústavu jaderného výzkumu v Řeži

Ing. Jaroslav Hejna, CSc.
17. dubna 1945 – 11. června 2023

Tento medailonek je věnován Ing. Jaroslavu Hejnovi a kolektivu Oddělení teplotníky palivových článků Ústavu jaderného výzkumu v Řeži, který v 70. a 80. letech minulého století prováděl unikátní experimentální výzkum lokální hydrodynamiky a mikrostruktury turbulentního proudění v centrální a periferní oblasti palivových kazet na maketách rychlých reaktorů.

This profile is dedicated to Ing. Jaroslav Hejna and the team at the Fuel Assembly Thermal Engineering Department of the Nuclear Research Institute in Řež, who in the 1970s and 1980s conducted unique experimental research on the local hydrodynamics and microstructure of turbulent flow in the central and peripheral regions of fuel assemblies in fast reactor mockups.



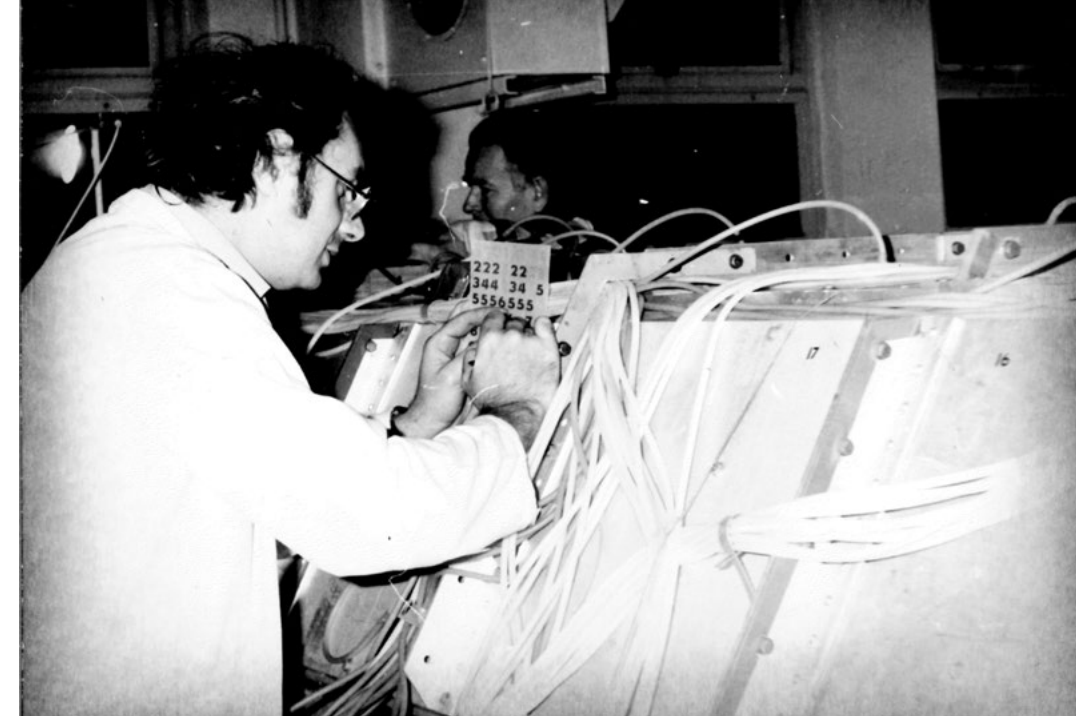
↑
Obr. 1:
Ing. Jaroslav Hejna, CSc.

Jádro kolektivu experimentátorů vedených Ing. Františkem Mantlíkem tvořili Ing. Jaroslav Hejna, Ing. Jaroslav Červenka a Ing. Libor Vosáhlo. Experimenty probíhaly na aerodynamických modelech svazků tyčí o průměru 120 mm, které simulovaly proudění sodíku v kazetách rychlých reaktorů. K měření lokálních parametrů proudění používali vedle klasických Pitoto-vých a Prestonových trubic také tehdy moderní „hot-wire“ anemometrii. S jejich pomocí sledovali rozložení statických tlaků v obálce po délce i obvodu, statické tlaky v hlavní měřicí rovině po obvodu měřících tyčí, tečné napětí na stěně měřících tyčí a složky vektoru časově středova-

né rychlosti i mikrostrukturu turbulence v okolí centrální tyče.

Unikátní byl zejména samotný aerodynamický model simulující svou geometrií šestihannou palivovou kazetu rychlého reaktoru BN-600. S délkou 6 000 mm a průměrem měřících tyčí 120 mm umožňoval detailní zkoumání mikrostruktury turbulentního proudění jak v centrální buňce mezi měřícími tyčemi, tak v boční buňce mezi tyčemi a stěnou kazety.

Ideovým tvůrcem metodiky a realizace těchto experimentů byl zejména Ing. Jaroslav Hejna, který navázal na svého předchůdce Ing. Jaroslava Maláka. V této práci bravurně uplatnil vzdělání a poznatky z oblasti aerody-



←
Obr. 2: Ing. Jaroslav Hejna, CSc., při experimentech na aerodynamickém modelu simulujícím palivovou kazetu

namiky v letectví, které získal při studiu na Vojenské akademii v Brně.

Jaroslav Hejna se narodil 17. dubna 1945 v Sepekově. Po maturitě na SPŠ strojnické (1963) absolvoval Vojenskou akademii v Brně v oboru letecké motory (1963–1968). Celý svůj profesní život zasvětil experimentální hydrodynamice – v Řeži pracoval od ukončení vyso-koškolského studia v roce 1968 až do úplného završení svých pracovních aktivit v roce 2011. Zemřel 11. června 2023.

Výzkum hydrodynamiky palivových kazet rychlých reaktorů probíhal v ÚJV Řež v rámci státního úkolu rozvoje vědy a techniky „Vývoj rychlého reaktoru v ČSSR“ a v těsné spolupráci se sovětským ústavem FEI v Obninsku (dnes Fyzikálně-energetický institut A. I. Lejpuňského v Ruské federaci). Po ukončení programu vývoje rychlého reaktoru v Československu byl experimentální výzkum hydrodynamiky v Řeži po určitou dobu zadáván a finančně podporován mimo jiné Dr. Karlem Rehmem, významným expertem z jaderného výzkumného střediska Kernforschungszentrum Karlsruhe v tehdejší Spolkové republice Německo, s nímž se Jaroslav Hejna seznámil v roce 1980 během odborné stáže v Karlsruhe.

Díky přímé vědecké synergii mezi Karlsruhe a Řeží vznikly jedny z nejlepších hydrodynamických studií té doby v rámci celého tehdejšího východního bloku. Jaroslav Hejna publikoval řadu prací o výzkumu hydrodynamiky palivových kazet rychlých reaktorů, přičemž Rehmeho „západní“ metodiky v nich hrály klíčovou roli. K přímému protnutí jejich jmen došlo v rám-

ci rozsáhlých sborníků mezinárodních jaderných konferencí o termohydraulice (NURETH), kde se výsledky z Karlsruhe a z Řeže potkávaly. V těchto sbornících byly práce Jaroslava Hejny (např. o měření Reynoldsových napětí v excentrických kanálech) publikovány bok po boku s Rehmeho vlastními experimentálními daty. Výsledky obou vědců byly nakonec Mezinárodní agenturou pro atomovou energii celosvětově integrovány do oficiálních kompendií jaderného výzkumu, jako je například *Sodium Coolant Handbook*, kde jsou rovnice Karla Rehmeho i experimenty Jaroslava Hejny citovány společně v jedné kapitole o hydrodynamice reaktorového jádra.

To samo o sobě svědčí nejen o mimořádné kvalitě výzkumu prováděného Jaroslavem Hejnou, ale i o vysoké profesionální úrovni celého tehdejšího řežského výzkumného kolektivu.

↓
Obr. 3: Ing. Jaroslav Hejna, CSc., s částí aerodynamického modelu – makety palivové kazety reaktoru BN-600

Miroslav Hrehor a Tereza Jungmannová



Vliv kovových materiálů na filtraci spektra mobilních rentgenových generátorů s ohledem na možnou aktivaci nástražných výbušných zařízení

Mgr. David Zoul¹, Bc. Marián Zelený², Mgr. Pavlo Bakhmachuk¹, Jakub Haberhauer³

¹ Centrum výzkumu Řež, s.r.o., ² Útvar vzdělávání a služební přípravy Policie České republiky, ³ TESTIMA, spol. s r. o.

Tato práce se zabývá studiem změn ve spektru rentgenového záření produkovaného mobilními generátory při průchodu různými kovovými filtry. Hlavním cílem je poskytnout přehled o vlivu těchto materiálů na radiační spektrum, což je zásadní pro aplikace v oblasti detekce nástražných výbušných zařízení (Improvised Explosive Devices – IED) a dalších bezpečnostních opatření. Při detekci podezřelých objektů hrají rentgenové systémy klíčovou roli. V praxi však mohou být IED také vybaveny senzory reagujícími na rentgenové záření a jeden impuls často stačí k vyvolání nechtěné detonace výbušného zařízení. Z tohoto důvodu se v přenosných rentgenových systémech používají kovové filtry, které snižují pravděpodobnost aktivace senzoru IED. Filtry jsou instalovány přímo před rentgenovým generátorem. Cílem naší práce bylo určit vliv filtrace různými materiály na spektrum a určit rozsah tohoto vlivu na funkci spínačů IED. Pomocí gama spektrometru s vysoce čistým germaniem (HPGe) GC2018 (CANBERRA) jsme změřili rentgenová spektra kontinuálního přenosného rentgenového zdroje ECO 200DS, skrze filtry z hliníku, Ti, mosazi, Cu, Zr, Pb a W různých tloušťek. Nejlepší výsledky z hlediska kvality zachyceného obrazu byly dosaženy použitím 2 mm silného Cu filtru nebo 0,5 mm silného Pb filtru ve vzdálenosti zdroj-detektor přibližně 2 m. Pod uvedenými tloušťkami filtrů byly některé senzory občas aktivovány.

This work deals with the study of changes in the spectrum of X-ray radiation produced by mobile generators, when passing through various metallic filters. The main goal is to provide an overview of the effect of these materials on the radiation spectrum, which is crucial for applications in the field of IEDs (Improvised Explosive Devices) detection and other security measures. In the detection of suspicious objects or IEDs, X-ray systems play a key role. In practice, however, IEDs can also be found equipped with sensors that react to X-ray radiation, and single pulse is often enough to initiate an unwanted detonation of an explosive device. For this reason, metal filters are used in portable X-ray systems, which reduce the probability of activation of the IEDs sensor. The filters are installed directly in front of the X-ray generator. The aim of our work was to determine the effect of filtration with various materials on the spectrum and to determine the extent of this effect on the function of IEDs switches. Using High-Purity Germanium (HPGe) gamma spectrometer GC2018 (CANBERRA), we measured the X-ray spectra of continuous portable X-ray source ECO 200DS, transmitted through filters made of Al, Ti, Brass, Cu, Zr, Pb, and W of different thicknesses. The best results with regard to the quality of the captured image were achieved by using a 2 mm thick Cu filter, or a 0.5 mm thick Pb filter at a source-detector distance of approximately 2 m. Below the mentioned filter thicknesses, some sensors were already triggered occasionally.

1. Úvod do problematiky IED citlivých na rentgenové záření

Cílem této práce je poskytnout přehled o vlivu kovových filtrů na změny spektra rentgenového záření produkovaného mobilními generátory, ve vztahu k oblasti detekce nástražných výbušných zařízení (Improvised Explosive Devices – IED).

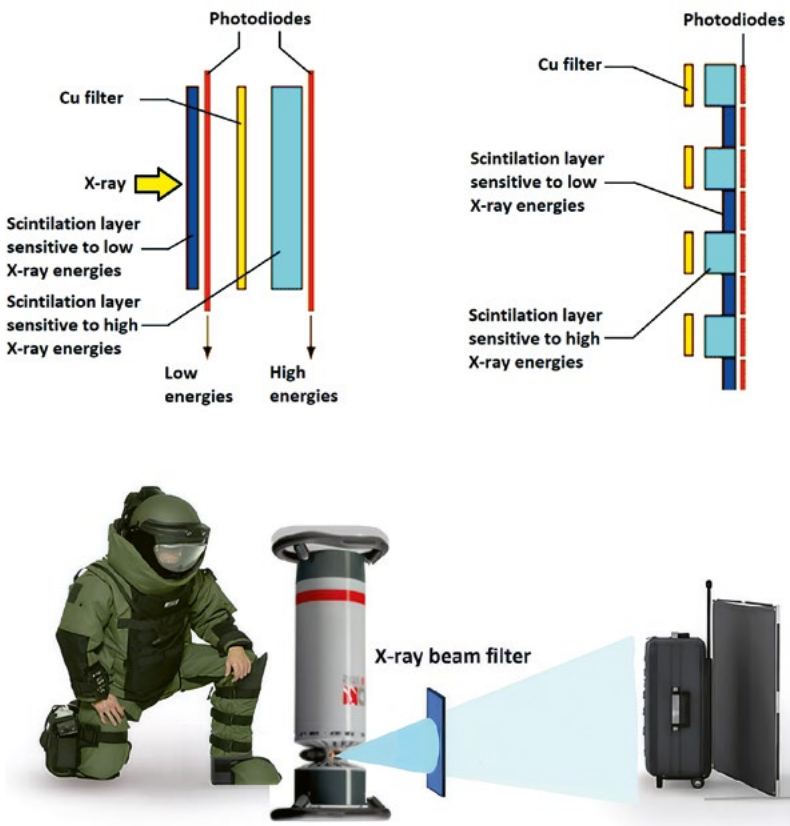
Při detekci podezřelých předmětů hrají rentgenové systémy klíčovou roli. V praxi však mohou být IED vybaveny senzory reagujícími na rentgenové záření. Z tohoto důvodu se v přenosných rentgenových systémech používají filtry z různých kovů, které snižují pravděpodobnost aktivace senzoru IED. Filtry jsou instalovány přímo před rentgenovým generátorem. Úkolem naší práce bylo určit vliv filtrace různými materiály na spektrum a stanovit míru tohoto vlivu na funkci spínačů IED.

Existují dva základní typy filtrů pro přenosné rentgenové systémy:

1. Filtry bránící aktivaci detektoru záření – viz Obr. 2,
2. Filtry používané k vytvoření obrazu s dvojím energetickým rozlišením.

První typ filtrů se používá v přenosných rentgenových systémech k zabránění spuštění nástražných výbušných zařízení schopných detekovat rentgenové záření přímo ve svém obvodu. Filtry mohou snížit počet fotonů specifických energií i celkový počet fotonů z přenosného rentgenového přístroje a zabránit spuštění senzoru, který reaguje na tento typ záření (tzv. antirentgenový senzor – viz Obr. 1) [1], [2], [3].

Druhý typ filtrů se používá pro zobrazování s rozlišením průměrného atomového čísla



rentgenovaného materiálu. Toto je standardní režim rentgenového zobrazování pro bezpečnostní rentgenové systémy. Operátorovi na základě barvy sděluje, zda je předmět organický, anorganický, kovový atd. – viz Obr. 3. K získání takového snímku je potřeba rentgenové snímkování s vysokou i nízkou energií. Software provádí dva skeny – první bez filtru před paprskem a druhý s filtrem (tzv. pseudo-duální energie).

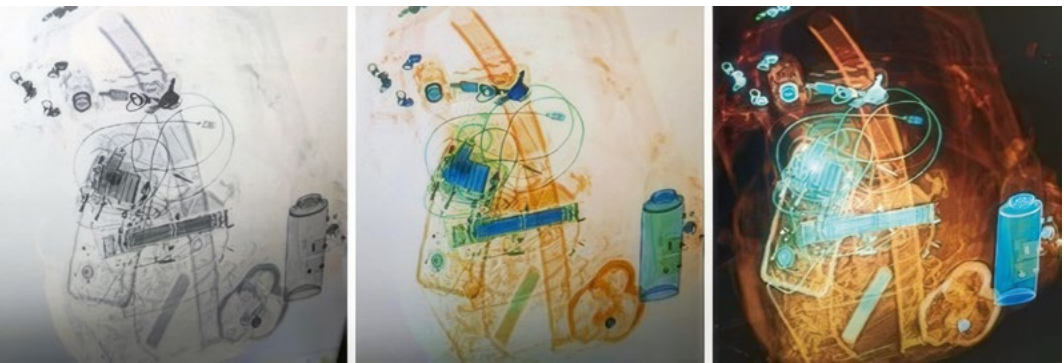
2. Vliv filtrace na rentgenové spektrum

Protože pravděpodobnost interakce, popsaná lineárním součinitelem zeslabení (μ), prudce roste s poklesem energie záření (fotony s vyš-

↑ ↑
Obr. 1: Příklad dvou různých konstrukcí antirentgenových spínačů [1]

↑
Obr. 2: Příklad použití přenosného rentgenového systému k detekci IED uvnitř zavazadel

↙
Obr. 3: Zobrazování s duální energií svazku



➔ **Obr. 4:** Ilustrativní příklad vlivu různých tlouštěk filtrů na tvar rentgenového spektra

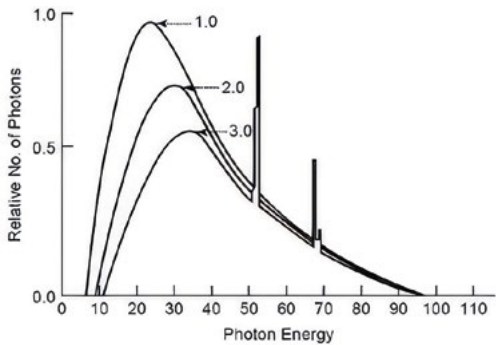
➔ **Obr. 5:** Mobilní rentgenový zdroj ECO 200DS s pevnou wolframovou anodou a maximálním napětím 200 kV

➔ **Obr. 6:** Mobilní bateriový rentgenový zdroj XRS-3 s pevnou wolframovou anodou, s nominálním anodovým napětím 270 kV

ší energií jsou pronikavější) a současně roste s atomovým číslem (Z) materiálu filtru (těžší prvky lépe pohlcují záření X), filtr primárně absorbuje nízkoenergetickou část spektra a zároveň umožňuje průchod většiny fotonů s vysokou energií.

Obecně platí, že po filtraci je spektrum prošlého záření „tvrdší“, tj. procházejí pouze pronikavější složky záření, zároveň celková intenzita záření klesá, protože část byla absorbována filtrem. Samozřejmě, obě změny mohou ovlivnit senzory IED.

Obr. 4 ukazuje změny relativní intenzity rentgenového záření generovaného rentgenovou trubicí s wolframovou anodou pracující při 100 kV pro tři různé tloušťky filtru.



3. Použité experimentální vybavení

3.1. Technické parametry testovaných rentgenových zdrojů

Testovaným rentgenovým generátorem byl mobilní ruční kontinuální rentgenový zdroj



ECO 200DS výrobce COMET, s pevnou wolframovou anodou a nastavitelným napětím od 30 do 200 kV (viz Obr. 5) [4].

- Parametry zařízení:
- Maximální napětí: 200 kV
 - Maximální proud: 6 mA
 - Průměr ohniska: 1 mm
 - Laserový zaměřovací systém.

Kromě ECO 200DS byl v rámci studie testován též pulzní rentgenový zdroj XRS-3 (provoz-



Materiál	Atomové číslo Z	Relativní atomová hmotnost	Hustota (kg/m³)
Al	13	26,982	2 700
Ti	22	47,867	4 506
Mosaz	-	-	8 500
Cu	29	63,546	8 940
Zr	40	91,222	6 520
W	74	183,840	19 250
Pb	82	207,200	11 340

ní napětí: 270 kV) (viz obr. 6) [5]. Použití tohoto pulzního zdroje však nebylo úspěšné, z důvodu vysoké mrtvé doby detektoru, již se nepodařilo snížit na přijatelnou úroveň ani při maximální možné kolimaci svazku wolframovým kolimátorem s otvorem 1 mm. Důvodem je pulzní charakter zdroje. Při použité vzdálenosti zdroj-detektor 600 mm byla dávka v pulzu stále až 10 µGy, což vzhledem k šíři pulzu pouhých 50 ns odpovídá dávkovému příkonu 200 Gy/s, tedy 720 kGy/h, se kterou si naše zařízení nedokázalo poradit.

Použití jiných typů detekčních elementů, popsanych v citovaných pracích [6], [7], určité smysluplné výsledky přineslo.

3.2. Technické parametry použitého spektrometru

Spektrální měření rentgenového zdroje byla provedena detektorem z vysoce čistého germania (HPGe) GC2018 od výrobce CANBERRA, chlazeným kapalným dusíkem. GC2018 je koaxiální HPGe detektor s výrazně klesající účinností pro rentgenové a gama záření pod energií 60 keV. Řídicím softwarem je GENIE-2000.

Pro charakterizaci vysoce aktivních vzorků je detektor stíněn modulárním wolframovým kolimátorem s volitelnou aperturou o průměru 1 mm, 2 mm nebo 3 mm, dodaným českým výrobcem INKOSAS. Tento kolimátor je dále vložen do speciálně navržené olověné vložky, která obklopuje detektor (Obr. 7). Kolem této vložky je umístěna 100 mm silná stínicí vrstva z olověných cihel (Obr. 7).

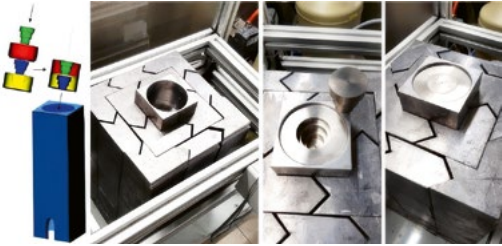
3.3. Parametry použitých filtrů

Pro měření byly vybrány následující filtry:

- Hliník: tloušťka 2 mm
- Titan: tloušťka 2 mm

- Mosaz: tloušťka 2 mm
 - Měď: tloušťka 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm
 - Olovo: tloušťka 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm
 - Zirkonium: tloušťka 1 mm, 2 mm
 - Wolfram: tloušťka 3,6 mm a 4,2 mm
- Wolframový filtr byl vyroben pomocí 3D tisku – viz např. [8]

Základním kritériem pro výběr filtrů bylo atomové číslo z důvodu získání škály – viz Tab. 1. Většina uvedených filtrů (kromě mosazi a zirkonia) je dodávána jako standardní příslušenství k testovaným komerčně vyráběným rentgenovým zdrojům.



4. Experimentální část

Cílem experimentu bylo určit vliv filtrace různými materiály na spektrum brzdného záření a určit míru tohoto vlivu na funkci spínačů IED.

Všechna měření rentgenových spekter, popsaná v sekcích 4.1. a 4.2., byla proto prováděna s kontinuálním zdrojem ECO 200DS, přes wolframový kolimátor s aperturou průměru 2 mm, při vzdálenosti ohnisko – detektor 690 mm, anodovém napětí 200 kV a proudu 1 mA. Každé měření trvalo 300 sekund. Získaná spektra byla následně korigována na energetickou účinnost detektoru.

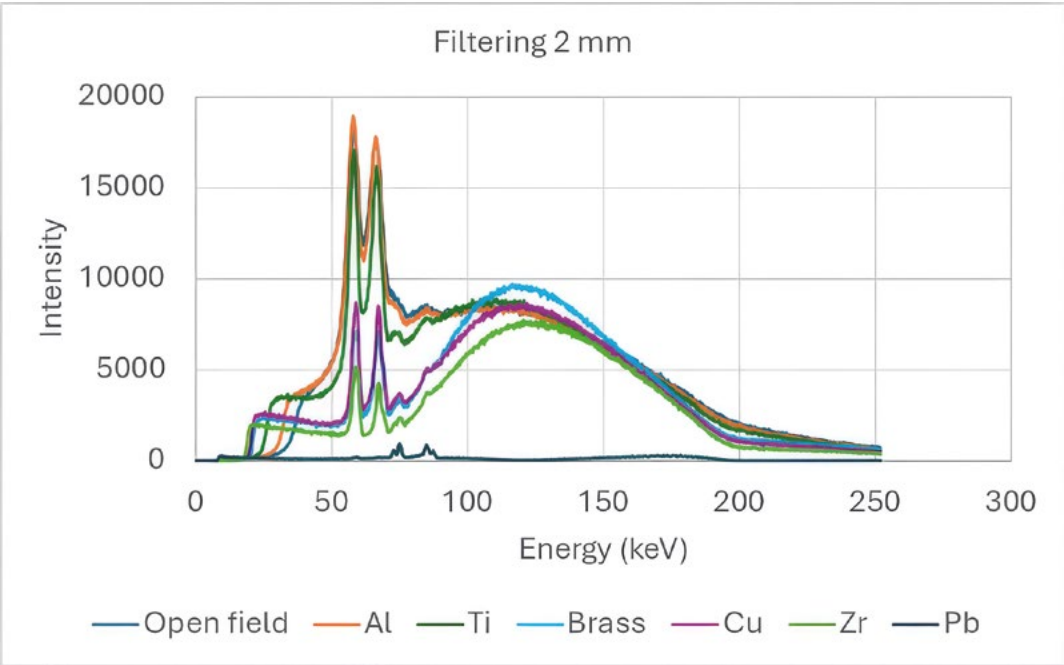
4.1. První měření

Absolutní srovnání bylo získáno pro otevřené pole, 2 mm Al, 2 mm Ti, 2 mm mosaz,

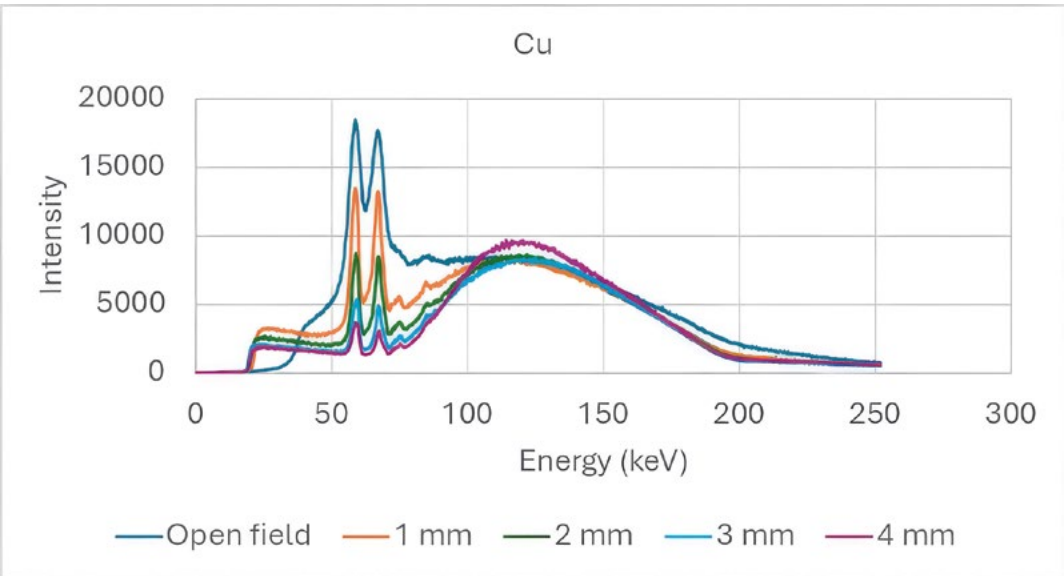
← **Tab. 1:** Fyzikální vlastnosti použitých filtrů, které mají přímý vliv na schopnost absorbovat ionizující fotonové záření

↙ **Obr. 7:** Olověné stínění detektoru HPGe s vloženým modulárním wolframovým kolimátorem

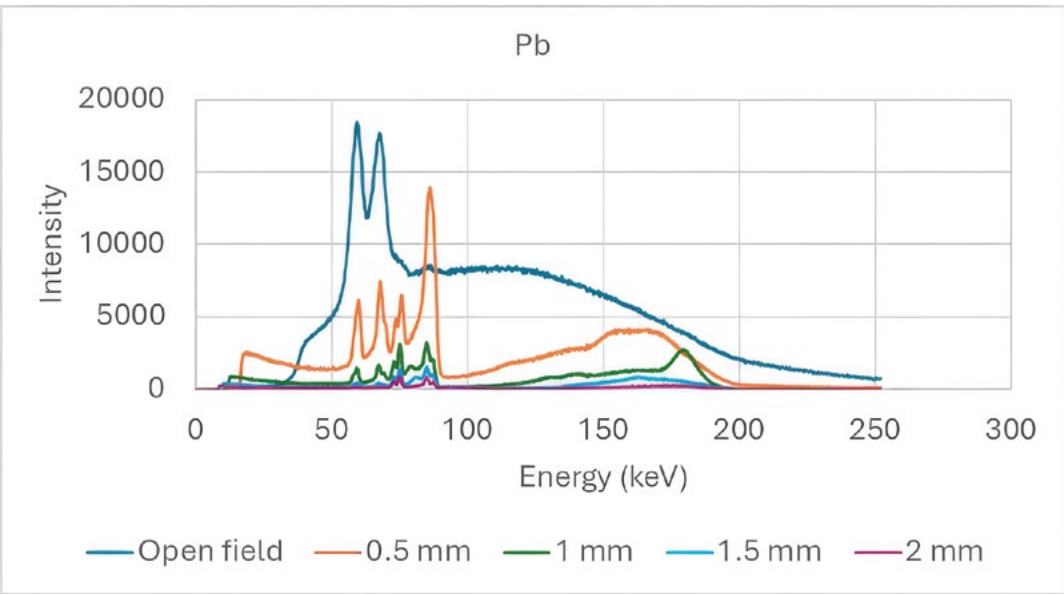
→ **Obr. 8:** Rentgenová spektra ECO 200DS pro různé filtry stejné tloušťky



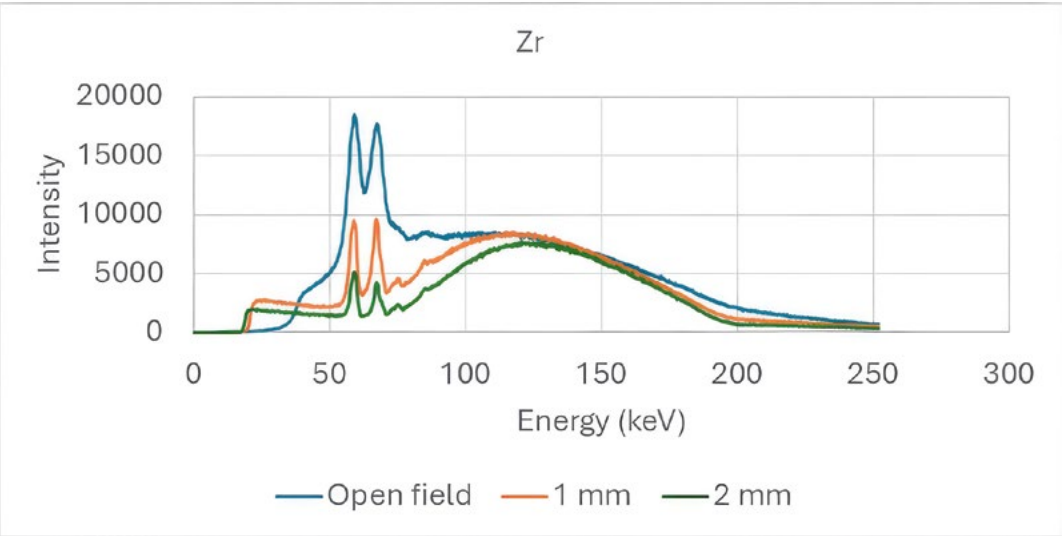
→ **Obr. 9:** Rentgenová spektra ECO 200DS pro měděné filtry různých tloušťek



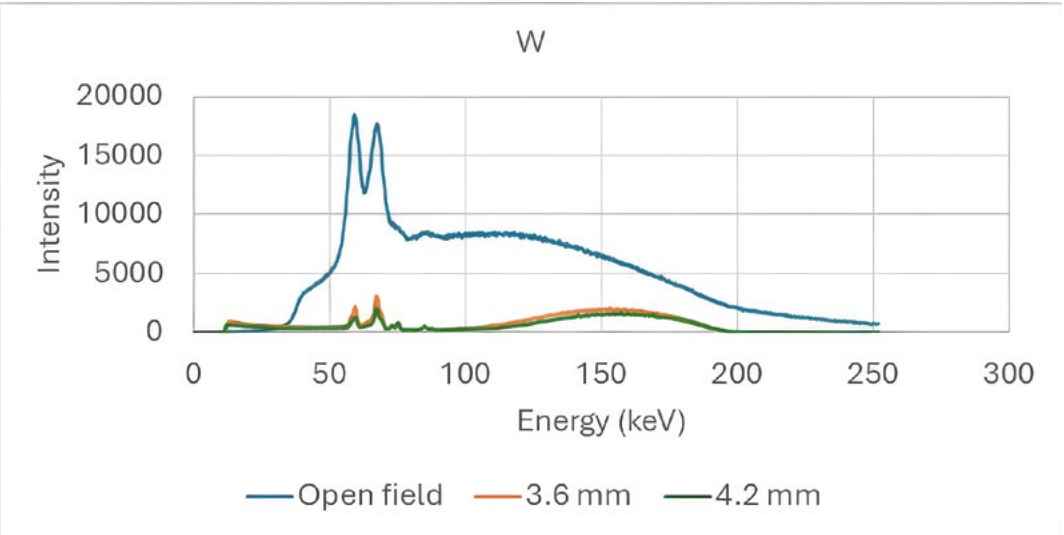
→ **Obr. 10:** Rentgenová spektra ECO 200DS pro olověné filtry různých tloušťek



← **Obr. 11:** Rentgenová spektra ECO 200DS pro zirkoniové filtry různých tloušťek



← **Obr. 12:** Rentgenová spektra ECO 200DS pro wolframové filtry různých tloušťek



2 mm Cu, 2 mm Zr a 2 mm Pb – viz Obr. 8. Výsledná spektra dávala dobrý fyzikální smysl vzhledem k atomovým číslům Z, hustotě a tloušťce různých použitých filtrů, které zásadně ovlivňují tvar spekter a jejich posuny v energetické a intenzitní škále.

Krom brzdného záření obsahují spektra rovněž K-čáry charakteristického záření wolframu ($K_{\alpha 1}$: 59,32 keV, $K_{\alpha 2}$: 57,98 keV, $K_{\beta 1}$: 67,24 keV), pocházející převážně z wolframové anody rentgenové trubice a v menší míře z wolframového kolimátoru. Dále jsou jasně viditelné charakteristické čáry olova ($K_{\alpha 1}$: 74,97 keV, $K_{\alpha 2}$: 72,80 keV, $K_{\beta 1}$: 84,94 keV) vycházející z olověného stínění detektoru, a v případě použití Pb filtru převážně z tohoto filtru.

4.2. Druhé měření

Druhý experiment se zaměřil na vliv různých tloušťek filtrů vyrobených ze stejného materiálu.

V tomto případě byly testovanými filtračními materiály měď o tloušťce 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, a olovo o tloušťce 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm a 2 mm. Výsledná rentgenová spektra jsou zobrazena na Obr. 9 a 10. Bylo také zajímavé porovnat účinek 1 mm a 2 mm Zr filtrů (viz Obr. 11), stejně jako 3,6 mm a 4,2 mm wolframových (W) filtrů (viz Obr. 12).

4.3. Testování s reálnými senzory

Filtry byly hodnoceny z hlediska účinnosti při prevenci spuštění senzorů pro detekci rentgenového záření.

Experimentální uspořádání je schematicky znázorněno na Obr. 2 při vzdálenosti zdroj-detektor 2 m. Olověné a wolframové filtry se ukázaly jako nejúčinnější pro snižování intenzity detekovatelného záření. Hustší filtry účinněji brání fotonům dosáhnout antirentgenového senzoru, současně ale snižují počet rentgenových paprsků dopadajících na flat-panel detektoru obrazu, což vede k výraznému snížení poměru signálu k šumu v obrazu (SNR).

Nejlepší výsledky z hlediska kvality zachyceného obrazu byly dosaženy použitím 2 mm silného Cu filtru nebo 0,5 mm silného Pb filtru. Pod uvedenými tloušťkami filtrů byly některé senzory občas aktivovány.

5. Závěr

Použití kovových filtrů významně ovlivňuje rentgenové spektrum. Znalost těchto efektů je zásadní pro aplikace v oblasti detekce podezřelých objektů a pro rozvoj zobrazovacích technologií.

Měření potvrdila teoretický předpoklad, že atomové číslo Z , hustota a tloušťka použitých filtrů zásadně ovlivňují tvar výsledných spek-

ter a jejich posun v energetických a intenzitních škálách.

Filtry byly testovány z hlediska jejich schopnosti zabránit spouštění antirentgenových senzorů. Nejlepších výsledků z hlediska kvality zachyceného obrazu bylo dosaženo použitím 2 mm silného Cu filtru nebo 0,5 mm silného Pb filtru při vzdálenosti zdroj-detektor přibližně 2 m. Pod uvedenými parametry byly některé senzory občas spouštěny.

Otevřenou nadále zůstává otázka, zda je odezva senzoru vyvolána celkovou hustotou toku RTG záření, či spíše jen specifickými energetickými příspěvky RTG spektra (např. jen nízkonoenergetickou složkou) nebo obojím.

Doporučení pro další výzkum zahrnují podrobnější analýzu vlivu různých tlouštěk filtrů nebo kombinace různých materiálů, stejně jako různých vzdáleností mezi zdrojem a detektorem, aby se optimalizovaly výsledky. Dále pak analýzu vlivu fotonů různých energií na aktivaci anti-X-Ray senzorů různého typu.

Výsledky by mohly být cenné pro studenty a odborníky zabývající se rentgenovou spektroskopií a bezpečnostními technologiemi.

Poděkování: Prezentované výsledky byly získány pomocí infrastruktury CICRR, která je finančně podporována Ministerstvem školství a kultury – projekt LM2023041 – a v rámci institucionální podpory Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky.

Reference

- [1] J. Howell, "Filters for Portable X-rays: What do they actually do?", LinkedIn, 2020.
- [2] Teledine ICM, "PIR Sensors in IEDs using constant potential generators", Counter-IED Report, 2023 <https://counteriedreport.com/wp-content/uploads/2023/05/63-67-Teledyne-ICM-article-Counter-IED-Report-Spring-Summer-2023.pdf>
- [3] International Bomb Disposal and Counter IED Professionals, "Passive Infrared Sensors (PIR) vs Fixed and Adjustable Kv portable X-Ray Generators", LinkedIn, 2021.
- [4] https://issuu.com/comet-xray/docs/comet_portables_and_mobile_catalog_v5
- [5] <https://www.elp-gmbh.com/en/produkte/golden-engineering-xrs3-gen-4/>
- [6] D. Zoul, M. Zelený, Vliv metalických materiálů na filtraci spektra brzdného záření pulzních generátorů s ohledem na možnou iniciaci nástražných výbušných systémů, Jaderná energie, 2/2024, s. 30–37.
- [7] R. Behrens, H. Zutz, J. Busse, Spectroscopy of pulsed photon radiation, Journal of Radiological Protection, 42 (2022) 011507. Doi: 10.1088/1361-6498/ac3dd0.
- [8] X. Ma, M. Buschmamm, E. Unger, P. Homolka. Classification of X-Ray Attenuation Properties of Additive Manufacturing and 3D Printing Materials Using Computed Tomography From 70 to 140 kVp. Front Biotecnol. 2021, Nov 29; 9:763960. PMID: 34912790; PMCID: PMC8666890. Doi: 10.3389/fbione.2021.763960.



Mgr. David Zoul

david.zoul@cvrez.cz

Absolvoval Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy v Praze v oborech Jaderná fyzika a Kvantová biofyzika. Na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze získal kvalifikaci a akreditaci pro výkon zdravotnického povolání v oboru Radiologická fyzika. V letech 2001–2014 pracoval ve Fakultní nemocnici v Motole a v Nemocnici na Homolce jako lékařský fyzik v oboru radiodiagnostiky a radiační onkologie se specializací na léčbu dětské leukémie a stereotaktickou radioterapii nádorů mozku. Současně zde vykonával soustavný dohled nad dodržováním požadavků radiační ochrany na pracovištích s radiodiagnostickými rentgenovými přístroji. V letech 2006–2013 přednášel lékařskou fyziku na 2. lékařské fakultě Univerzity Karlovy v Praze a Fakultě biomedicínského inženýrství ČVUT na Kladně. Od roku 2014 pracuje ve společnosti Centrum výzkumu Řež v oblasti dozimetrie ionizujícího záření, kde se zabývá mimo jiné výpočty a konstrukčním řešením rozmanitých zařízení pro nakládání s vysoce radioaktivními materiály, výzkumem a vývojem organických integrujících dozimetrů, gama spektrometrií a gama-tomografií. Současně vykonává soustavný dohled nad dodržováním požadavků radiační ochrany na pracovištích s otevřenými a uzavřenými radionuklidovými zdroji.

Modul lehkovodního SMR se zvýšenými tepelnými parametry získanými za SMR řazeným kompresorovým systémem

Ing. Petr Neuman, CSc.

člen spolku Jaderní veteráni

Všechny lehkovodní reaktory (LWR), tlakovodní (PWR) a varné (BWR), dodávají pouze sytou páru s teplotami do 290 °C. Nevýhodou LWR je obecně nemožnost dodávat vysoce potenciální teplo pro průmysl. Tuto nevýhodu však lze řešit systémem MARaK (MultiAplikační vysokoteplotní teplárenský a průmyslový SMR LWR a sekundární Kompresní stupeň). Využívají se pokročilé typy SMR Gen IV s vyššími parametry výstupní páry, které by vyhovovaly nejen vytápění, ale i průmyslu. Existuje šest slibných technologií s výstupními teplotami páry od 500 °C do 1 000 °C. Jejich nevýhodou je skutečnost, že typy SMR PWR a BWR budou ve větším měřítku použitelné kolem roku 2040 a SMR Gen IV až o deset a více let později. Bloky SMR typu PWR a BWR by však mohly českému průmyslu pomoci ještě dříve, než budou k dispozici pokročilé typy SMR Gen IV. Řešení je založeno na použití adiabatického kompresního systému na výstupu ze SMR. Český průmysl proto nemusí čekat na reaktory Gen IV, ale mohl by problém „dočasně“ vyřešit využitím technologicky již standardních SMR na bázi lehkovodních reaktorů s kompresorovým systémem připojeným na výstupu.

All light water reactors (LWR), pressurized water reactors (PWR) and boiling water reactors (BWR), only supply saturated steam with temperatures up to 290 °C. The disadvantage of LWR is generally the inability to supply high-potential heat for industry. However, this disadvantage can be addressed by the MARaC system (Multi-Application High-Temperature Heating and Industrial SMR LWR and Secondary Compression Stage).

Advanced SMR Gen IV types with higher output steam parameters are being developed, which would suit not only heating but also industry. There are six promising technologies with output steam temperatures from 500 °C to 1,000 °C. Their disadvantage is the fact that SMR PWR and BWR types will be applicable on a larger scale around 2040 and SMR Gen IV types only ten or more years later. However, SMR units of the PWR and BWR type could help Czech industry even before advanced SMR Gen IV types become available. The solution is based on the use of an adiabatic compression system at the outlet of the SMR. Therefore, the Czech industry does not have to wait for Gen IV reactors but could „temporarily“ solve the problem by using technologically already standard SMRs based on light water reactors, with a compressor system connected at the outlet.

ÚVOD

V autorově článku ^[1] z roku 2022 byl učiněn závěr, že bloky SMR PWR a BWR českému teplárenství nepomohou. **Proč?**

A. Protože koncepce rozvoje české

energetiky je zaměřena na elektrárénství.

Jediný kompetentní provozovatel jaderných elektráren v Česku – Skupina ČEZ, plánuje umístění SMR pro teplárenství do lokalit uhelných elektráren patřících Skupině ČEZ, kde je však velmi malý poměr odběru tepla k vyro-

bené elektřině. Jedná se totiž o elektrárny s velmi malým odběrem tepla pouze pro vytápění. Přitom první Rolls-Royce SMR umístí do jaderné lokality Temelín a další SMR rovněž především do jaderných lokalit (Temelín, Dukovany), kde sice je připravena infrastruktura pro jaderné bloky, ale situaci teplárenství to neřeší.

Pro zajištění tepla by bylo zapotřebí umístit nové bloky SMR do lokalit uhelných tepláren určených k postupnému ale rychlému odstavení (Dětmarovice, Tušimice), ve kterých jsou vybudovány a využívány SCZT, které by bylo možné uchovat a nadále rozšiřovat. Takových lokalit uhelných elektráren, tepláren a výtopen je v ČR mnoho, pouze zhruba třetina z nich však patří společnosti ČEZ a zbytek jsou lokality zdrojů vlastněných soukromými subjekty.

Stát (v čele s MPO), příslušné státní orgány (v čele s SÚJB) by se měly snažit o takové zjednodušení jaderné legislativy, příslušných zákonů, předpisů a povolení, aby se o výstavbu a provozování SMR mohly reálně zajímat také soukromé finanční a průmyslové subjekty.

B. Protože technické možnosti

lehkovodních reaktorů LWR jsou pro teplárenství ne zcela vhodné.

Nejekonomičtější je využití velkých jaderných tepláren, kdy reaktor může jet na plný výkon a teplo je odebíráno dle potřeby. Teplo lze odvádět na větší vzdálenosti a není nutné mít jiné požadavky na jadernou bezpečnost, než je dosud u Large Scale Reactors (LSR) standardní. Pro řešení se nabízí menší výkony SMR, protože v lokalitách uhelných elektráren nejsou podmínky pro JE o výkonu 1 200 MW, resp. 2 × 1 200 MW_e („dvojče“ z důvodů spolehlivosti dodávek tepla a lepší ekonomie). Bezpečnostní charakteristiky jsou přitom téměř shodné s provozovanými velkými LSR JE.

V současnosti jsou nejbližší výstavbě typy BWRX-300 a Rolls-Royce SMR (470 MW_e). Další alternativou jsou jaderné výtopny, známé jsou v Česku tyto: finský LDR-50, francouzská Calogena a také český TEPLATOR.

Všechny dodávají jen teplo, ale mají výrazně vyšší bezpečnost (tedy umístění v městské aglomeraci by neměl být problém). Ekonomi-

ka je však silně závislá na ročním využití, což je u nás horší než například ve Finsku.

Nedostatkem je tedy obecně nemožnost dodávek vysokopotenciálního tepla pro teplárenství a průmysl. Tento nedostatek však může být řešit popisovaným komplexním systémem MARaK (MultiAplikační vysokoteplotní teplárenský a průmyslový SMR LWR a sekundární Kompresní stupeň).

POPIS ŘEŠENÍ SYSTÉMU MARAK

Bloky SMR typu PWR a BWR by mohly pomoci českému teplárenství i českému průmyslu již před tím, než budou k dispozici pokročilé typy SMR Gen IV, s vyššími výstupními parametry páry.

Jak?

Využitím komprese k zvýšení tlaku a teploty páry.

Obory průmyslového tepla (vyšší parametry přehřáté páry pro průmysl) s nadějí vzhlížejí k pokročilým typům SMR čtvrté generace (Gen IV), které umožní aplikace s parou o teplotách vyšších než 300 °C, které nejsou dosažitelné běžně u typů PWR a BWR ^[1].

V Tabulce 1 jsou uvedeny typy pokročilých SMR Gen IV (jejich základní technické parametry), které dosahují až k teplotám 1 000 °C, případně vyšším. Nevýhodou je skutečnost, že zatímco reaktory SMR typu PWR a BWR budou pravděpodobně nasazeny do komerčního provozu kolem roku 2040, u pokročilých reaktorů SMR Gen IV se jejich komerční nasazení předpokládá nejméně o deset let později, tedy až po roce 2050.

Není však nutné čekat tak dlouho, protože vyšších průmyslových teplot lze dosáhnout dříve. Lze to realizovat použitím metod zvyšování parametrů páry (tlaku a teploty), což je obecně klíčovou metodou pro zvýšení tepelné účinnosti parních cyklů v průmyslu, elektrárnách a teplárnách.

Pro účely dodávky průmyslového tepla, a ovšem také tepla pro vytápění SCZT, lze metodami adiabatické komprese dosáhnout i u typů PWR a BWR teplot přehřáté páry 500 °C, a při vícestupňové kompresi i více než 650 °C.

POKROČILÉ SMR GEN IV

Nejprve je vhodné uvést fakt, že expertní skupina GIF sestávající z více než stovky odborníků z různých technických oborů vyhodnotila 130 aktuálně dostupných technologických konceptů a jako perspektivní k dalšímu rozpracování a vývoji vyhodnotila šest následujících technologií (zdroj: ČEZ):

- rychlé reaktory chlazené plynem (GFR – Gas-Cooled Fast Reactors),
- olovem chlazené rychlé reaktory (LFR – Lead-Cooled Fast Reactors),
- reaktory využívající roztavené soli (MSR – Molten Salt Reactors),
- reaktory využívající vodu v superkritické fázi (SCWR – SuperCritical Water Reactors),
- sodíkem chlazené rychlé reaktory (SFR – Sodium-Cooled Fast Reactors),
- vysokoteplotní reaktory (VHTR – Very-High-Temperature Reactors).

Typ	Výstupní teplota [°C]	Chladivo, charakteristika	Typ reaktoru	Příklad – výrobce
GFR	750–850	plyn, helium	Rychlý VT – bazénový typ	ALLEGRO (CVŘ), HeFASTo (CVŘ)
LFR	500–600	olovo	rychlý	LFR-AS-200 – Newcleo (FR/IT)
MSR	600–800	tekuté soli	palivo rozpuštěné v roztavené soli	Seaborg (Dánsko), Terrestrial (Kanada)
SCWR	625	designed as LWR , ale ~45 %	nadkritický tlak více než 22,1 MPa	SuperSafe (Kanada)
SFR	500–650	sodík, tekuté kovy	rychlý bazénový	Energy Well (CVŘ), Natrium – TerraPower
HTR/HTGR High-Temperature Reactor	750–900	plyn, pebble-bed module, TRISO	vysokoteplotní	HTR-PM (Čína), Xe-100 (USA)
VHTR	700 – 950, i více > 1000	helium, pebble bed core, TRISO	velmi vysokoteplotní	HTTR (Japan), NHDD (J. Korea)

↑
Tab. 1: Pokročilé SMR Gen IV podle klasifikace MAAE (IAEA)

Vývoj SMR Gen IV je však opožděn za lehkovodními LWR, PWR a varnými BWR reaktory. Dá se říci, že jejich vývoj lze popsat vztahem (rovnicí) „T + 20 roků“. Toto zpoždění vysokoteplotních reaktorů vhodných pro průmysl se však dá dohnat i využitím reaktorů LWR, PWR, a BWR, a to kompresí výstupní páry na vyšší požadované parametry průmyslové páry (teplota, tlak). Pokud se týká konkrétních způsobů zvyšování parametrů páry, tak v provozu se technologie parní komprese (označovaná jako MVR – Mechanical Vapor Recompression) nejčastěji vy-

užívá v průmyslových odparkách a v poslední době jako klíčový prvek pro dekarbonizaci těžkého průmyslu a také teplárenství.

Průmyslové procesy

Mezinárodní fórum reaktorů Gen IV i národní průmyslové orgány publikovaly požadavky na parametry páry pro jednotlivé průmyslové procesy – viz Tab. 2.

V souvislosti s popisovanou metodou parní komprese (MVR – Mechanical Vapor Recompression), lze uvést konkrétní příklady komprese páry:

- **Potravinářský průmysl (cukrovary a mlékárny)**
Při odpařování vody z roztoku (např. z cukrové šťávy nebo mléka) vzniká tzv. brýdová pára. Tato pára má nízkou teplotu (kolem 80–100 °C) a nízký tlak, takže je pro další vaření nevyužitelná. Aplikuje se tedy mechanický kompresor (turbokompresor), který tuto odpadní páru

stlačí. Výsledkem je, že teplota páry stoupne o 20–40 °C a tlak se zvýší natolik, že ji lze znovu zavést do topné komory téhož odpařovačku. Tím se šetří až 90 % primární energie, protože teplo v páře neustále cirkuluje a reaktor (nebo kotel) dodává jen minimum nové energie.

- **Teplárenství (zpětné získávání tepla)**
V moderních teplárnách se komprese využívá u velkých tepelných čerpadel, která „vysávají“ teplo z kouřových plynů. Nízkotlaká pára vzniklá z odpadního tepla (např. chladičího okruhu turbíny) je stlačena na parametry

Průmyslový proces / Aplikace	Typ páry	Typická teplota páry
Potravinářský průmysl (sterilizace)	sytá (střednětlaká)	100–140 °C
Teplárenství, ohřev vody, sušení,	sytá (nízkotlaká)	100–150 °C
Papírenský průmysl (sušicí válce)	sytá (vysokotlaká)	150–200 °C
Chemická výroba (reaktory, destilace)	sytá/přehřátá	150–250 °C
Rafinérie, petrochemie	přehřátá	250–400 °C
Výroba elektřiny (turbíny)	přehřátá (vysokotlaká)	400–650 °C
Zplyňování uhlí	přehřátá (vysokotlaká)	600–900+ °C

horké vody/páry v rozvodné soustavě (např. ze 40 °C na 90 °C). Tento proces je instalován například ve Vídni nebo Kodani ve spalovnách odpadu ZEVO.

- **Průmyslová pára ze SMR Gen IV (rafinérie, petrochemie např. gumárenství)**
Zde je potřebná také pára s teplotou jen o něco vyšší než 250 °C. Protože SMR Gen IV ještě nejsou k dispozici, bude dostačovat standardní PWR SMR Gen III s odběrem páry přímo z PG, kdy může mít teplota od 250/280 °C. Např. nový NUWARD 400 s takovým odběrem v projektu počítá. Pro teploty vyšší, až 400 °C, bude dostačovat popisovaný „multiaplikační vysokoteplotní teplárenský a průmyslový komplex SMR LWR se sekundární kompresí“ (akronym MARaK).

- **Průmyslová vysokoteplotní pára z klasických designů LWR (PWR, BWR)**
U syté páry z reaktoru jsou pomocí vícestupňové komprese (poháněné kogenerační elektřinou z reaktoru) zvýšeny parametry teploty na 500 °C a tlak na 10,5 MPa. Příkladem je standardní PWR reaktor NuScale VOYGR™ (počet modulů 77 MW_e: 2, 4, 6, 12), který může produkovat přehřátou páru o teplotě 300 °C (8,6 MPa), vícestupňovou kompresí může být teplota zvýšena až na více než 650 °C (16,8 MPa).

METODY ZVYŠOVÁNÍ PARAMETRŮ PÁRY

Teoretickým základem je adiabatická komprese páry, což je termodynamický děj, při kterém dochází ke stlačení páry (zmenšení objemu, zvýšení tlaku) bez výměny tepla s okolím (Q = 0). Protože vnější síly konají práci, vnitřní energie páry roste, což vede k výraznému nárůstu teploty a tlaku. Tento děj je často izoent-

ropický (vratný). Klíčovou vlastností a principem je to, že nedochází k žádnému přenosu tepla. Děj probíhá buď při dokonalé tepelné izolaci, nebo extrémně rychle, takže pára nestihne vyměnit teplo s okolím.

Dochází k růstu teploty a tlaku. Při kompresi se plyn stlačuje, tlak stoupá a teplota roste. Tepelný děj se řídí Poissonovým zákonem, podle rovnice adiabaty. Adiabatická komprese se uplatňuje v kompresorech (turbokompresorech), vznětových motorech nebo v rámci chladicích cyklů.

Platí zde vztah: **pV^k** = konst., kde **k** (Poissonova konstanta) je poměr měrných tepelných kapacit **C_p/C_v**. Adiabatická komprese se uplatňuje v kompresorech (turbokompresorech), vznětových motorech nebo v rámci chladicích cyklů. V p-V diagramu je křivka adiabaty strmější než izotermy.

Rozdíl oproti izotermické kompresi je v tom, že zatímco u izotermické komprese se teplota udržuje konstantní odváděním tepla, při adiabatické kompresi se veškerá dodaná práce mění na vnitřní energii plynu, a proto teplota roste. U vratného adiabatického děje (tzv. izoentropického) zůstává entropie konstantní (s = konst.), což znamená, že proces probíhá po přímce rovnoběžné s osou teploty.

Klíčové vlastnosti v diagramu

Úsečka vede zdola nahoru, protože při kompresi roste teplota i tlak páry. Pokud komprese začíná v oblasti mokré páry (pod „zvonek“ sytostní čáry), směřuje do oblasti přehřáté páry nebo k čáře syté páry. Pokud začíná na čáře syté páry, končí v oblasti přehřáté páry.

V praxi není komprese dokonale adiabatická kvůli tření. Reálná komprese je tedy dopro-

←
Tab. 2: Parametry průmyslových procesů



Obr. 1: Diagram p-V adiabatické komprese



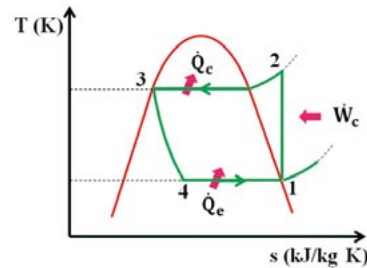
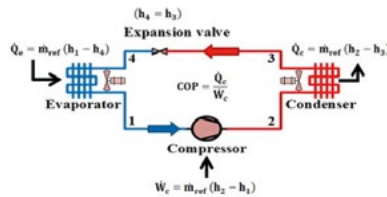
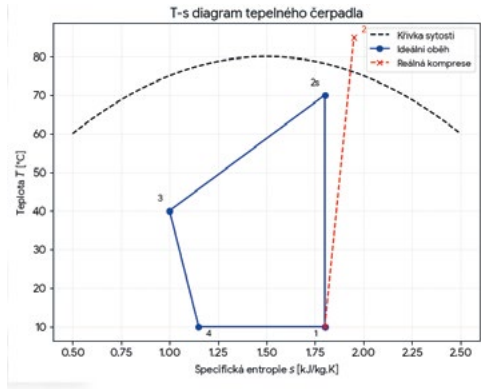
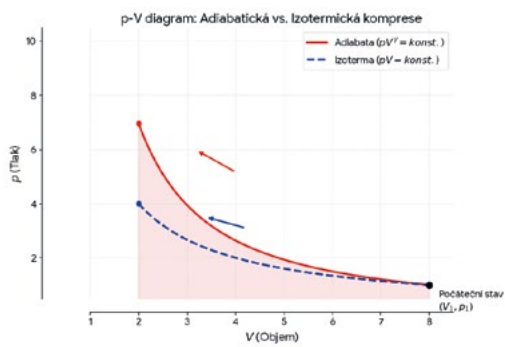
Obr. 2: Oběh tepelného čerpadla v souřadnicích T-s



Obr. 3: Schematický pohled na tepelné čerpadlo



Obr. 4: Diagram T-s tepelného čerpadla



vážena nárůstem entropie a v p-V diagramu se projevuje jako úsečka nakloněná doprava.

V tomto případě se mluví o polytropickém ději, kdy se malá část tepla ztratí, ale křivka je stále velmi blízká adiabatě.

Parní a mechanická komprese obecně

Pokud je potřeba páru o nízkém tlaku „povýšit“ na vyšší tlakovou úroveň, používají se parní ejektory, které využívají hnací vysokotlakou páru, ta v trysce zrychlí, vytvoří podtlak a strhne s sebou nízkotlakou páru. Výsledná směs má střední tlak. Dalším zařízením jsou mechanické kompresory par, kde je pára stlačována podobně jako plyn v kompresoru, což zvyšuje její tlak i saturační teplotu (využíváno v odpadkách pro úsporu energie).

Specifická mechanická komprese páry (MVR – Mechanical Vapor Recompression) využívá externí mechanickou energii (elektromotor) k pohonu kompresoru. Je to v podstatě tepelné čerpadlo, kde pracovní látkou je samotná technologická pára. V provozu se postupuje po krocích:

1. Sběr nízkotlaké páry. Odpadní pára (např. z odparky) o nízkém tlaku a teplotě se přivádí do kompresoru – výparníku.
2. Mechanické stlačení provádí rotační kompresor (často radiální ventilátor nebo objemové dmychadlo), který páru prudce stlačí. Podle stavové rovnice plynů vede stlačení k okamžitému nárůstu tlaku i teploty (adiabatický děj).
3. Recirkulace vrací „povýšenou“ páru zpět do procesu (např. do topného pláště té samé odparky), kde zkondenzuje a odevzdá své výparné teplo kondenzátoru.

4. Pára expanduje znovu do výparníku – expanze.

Metoda má extrémně vysokou účinnost, kdy malé množství elektřiny umožní získání velkého množství tepla. Obr. 4 znázorňuje standardní oběh tepelného čerpadla v T-s souřadnicích.

Na těchto principech vyprojektovaný systém SMR s parní kompresí pro zvýšení parametrů, je uzavřený systém, kde reaktor slouží jako primární generátor tepla a kompresor jako „zesilovač“ parametrů pro průmysl. Toto uspořádání může fungovat také jako virtuální baterie. Když je v síti přebytek elektřiny (např. větrníky v Německu jedou naplno), SMR neomezuje výkon, ale přesměruje více páry a elektřiny do kompresoru. Vyrobit se více tepla pro průmysl, které lze případně krátkodobě uložit v tepelných zásobnících, a elektrická síť se nepřetíží.

USER CASE # 1: NUSCALE, VOYGR 2 MODULY, NEBO 4 MODULY (4 × 77 = 308 MW_e)

Společnost NuScale nabízí potenciální využití SMR pro výrobu přehřáté páry již od roku 2023. Nabízí svůj malý modulární reaktor (SMR) k podpoře těžko dekarbonizovaného průmyslového sektoru pomocí přehřáté páry. Společnost uvedla, že nový výzkum demonstruje pokročilé schopnosti SMR NuScale pro snižování emisí v průmyslových odvětvích, což je rozhodující pro splnění globálních klimatických cílů.

Srovnávací výzkum, vedený spoluzakladatelem a technologickým ředitelem společnosti NuScale Dr. José Reyesem, zjistil, že SMR NuScale mají potenciál pro použití v široké škále nejen pro vytápění a využití průmyslového tepla (formou vysokoteplotní přehřáté páry), ale také pro vysokoteplotní průmyslové procesy, které dříve nebyly předpokládány pomocí technologie lehkovodních reaktorů (LWR západního typu a východního ruského typu VVER).

Tato schopnost tedy poskytne teplárnám, ropným rafineriím a chemickým společnostem nové možnosti dekarbonizace jejich provozů a produktů využívajících bezuhlíkovou jadernou energii [5].

Výzkum společnosti ukazuje, že pára generovaná jediným výkonovým modulem NuScale může být stlačena a zahřata za účelem výroby procesní páry v komerčním měřítku, teplotách a tlacích.

Společnost NuScale zjistila, že jediný napájecí modul, generující 250 MW_t (77 MW_e), může produkovat více než 225 t/h páry při 10,5 MPa, 500 °C, s potenciálem zvýšit parametry na 16,8 MPa, a více než 650 °C.

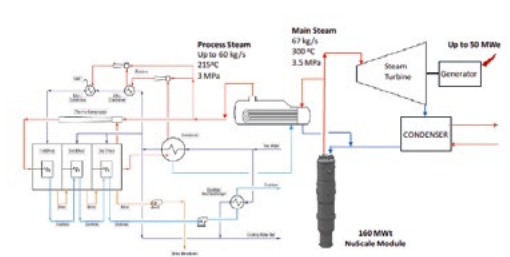
Energetický modul NuScale, na kterém jsou založeny jaderné elektrárny VOYGR, je tlakovodní reaktor se všemi komponenty pro výrobu páry a výměnu tepla začleněnými do jediného bloku o výkonu 77 MW_e. Jedná se o první návrh reaktoru SMR, který byl schválen americkou komisí Nuclear Regulatory Commission.

Společnost nabízí dvanáctimodulovou elektrárnu VOYGR-12 schopnou generovat 924 MW_e (77 × 12), čtyřmodulové elektrárny VOYGR-4 (308 MW_e) a šestimodulové VOYGR-6

(462 MW_e) a další konfigurace založené na potřebách zákazníka.

„V elektrárně VOYGR-12 s 12 moduly se vyrábí 3 000 MW tepelné energie (cca 250 MW_t × 12). Elektrárna nabízí jak elektrickou energii, tak velké objemy přehřáté páry, která může být bezpečně umístěna v blízkosti hlavních průmyslových procesů,“ uvádí firma.

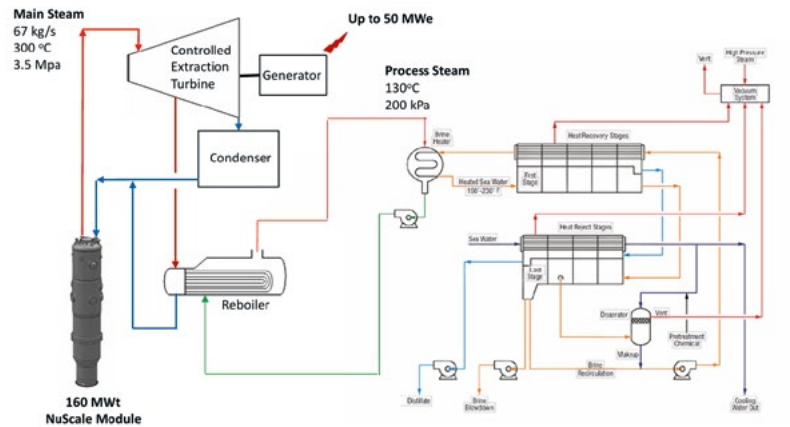
„Kompresorové topné systémy, které jsme navrhli, jsou ideální aplikací pro elektrárny VOYGR společnosti NuScale a mohly by také rozšířit roli LWR v globálním úsilí o dekarbonizaci,“ řekl její CEO Dr. José Reyes. Společnost NuScale dále uvedla, že bude „pokračovat ve zkoumání zvýšené flexibility, spolehlivosti a ekonomiky výroby páry s více moduly, která je rozšířena o nákladově efektivní a vysoce účinnou kompresi a ohřev páry“. Spolupracuje na vývoji a výrobě s koncovými uživateli páry, elektrické energie a vodíku na „posouzení a optimalizaci integrovaných energetických systémů s plány na podporu průmyslových cílů v oblasti čisté energie v komerčním měřítku“.



Obr. 5: Procesní diagram modulu NuScale připojeného k destilačnímu cyklu



Obr. 6: Procesní diagram modulu NuScale připojeného k odsolovacímu cyklu MSF prostřednictvím turbíny s řízeným odběrem





Tab. 3: Parametry vstupní páry modulu NPM

Procesní pára generovaná výkonným modulem NuScale

Velký počet procesů probíhá v rozsahu výstupní teploty páry NPM a jednoduchým a energeticky účinným stupněm tepelného zesílení lze do-

Parametry modulu NPM	hodnota
Jmenovitá výroba páry při plném výkonu [tun/hod]	370
Výstupní teplota páry [°C]	283
Výstupní tlak páry [MPa]	3,28
Energie páry [MW _e]	250

sáhnout mnohem vyšších hodnot teploty a tlaku. Řada petrochemických procesů vyžaduje procesní teplo v přibližném rozsahu možných výstupních teplot páry NPM. Tab. 3 ukazuje, že při nominálním provozu na plný výkon modul NPM produkuje 370 tun páry za hodinu.

Systém IHX (Intermediate Heat Exchanger) bude umístěn v budově turbín se stanovenou zónou EPZ (Zóna plánování pro případ nouze – The Emergency Planning Zone). Systém „úpravy a regulace procesní páry“ (PSCC – Process Steam Conditioning and Control) může být umístěn mimo EPZ. V systému PSCC se nacházejí parní kompresory a ohřivače a odpovídající řídicí a komunikační systémy – viz Obr. 7. Systém a proces PSCC je chráněn několika průmyslovými patenty [5].

Společnost NuScale Power pro své malé modulární reaktory (SMR) řady VOYGR™ vy-

užívá v rámci systému mechanické rekompresce páry (MVR) technologie vyvinuté ve spolupráci se strategickým partnerem Ebara Elliott Energy (EEE).

NPM dodává teplo pro generování vysoko-teplotní a tlakové procesní páry v komerčním procesu. Mezilehlý výměník tepla IHX zajišťuje soulad se stávajícími předpisy NRC.

U vícestupňových kompresorů EEE, zejména u těch poháněných převodovkou Flex-Op®, je mezichlazení (intercooling) klíčovým nástrojem pro snížení spotřeby energie a ochranu mechanických částí stroje.

Jak funguje mezichlazení u EEE:

- **1. Snížení příkonu (práce kompresoru):**

Ochlazením plynu mezi jednotlivými stupni se zmenší jeho měrný objem. Motor pak v dalším stupni stlačuje „hustší“ médium, což výrazně snižuje celkový potřebný příkon (často o 15–30 % u vícestupňových strojů).

- **2. Ochrana materiálů:**

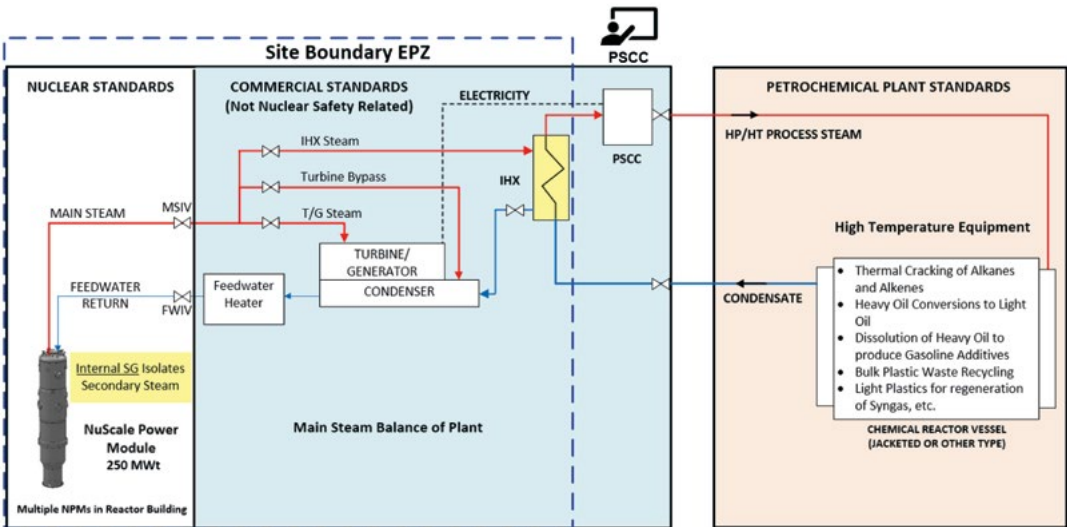
U aplikací, jako je MVR pro NuScale, kde pára dosahuje až 500 °C, pomáhá mezichlazení udržet teploty v jednotlivých stupních v mezích, které nepoškozují ložiska, těsnění a povrchy oběžných kol.

- **3. Technické provedení:**

— Externí výměníky: Pára je po výstupu z jednoho tělesa kompresoru vedena do vnějšího výměníku tepla a následně se vrací do dalšího stupně.



Obr. 7: Schéma znázorňující jeden z vícemodulových NPM



— stříkávání kondenzátu (quenching): V systémech MVR se často používá přímé vstřikování malého množství vody (kondenzátu) do proudu páry mezi stupni. Voda se odpaří, čímž páru ochladí a zároveň zvýší její množství pro další stupeň.

Specifika pro systém NuScale + Ebara Elliott Energy (EEE)

Pracuje se s adiabatickou kompresí, kde je cílem zvýšit teplotu. Mezichlazení se používá strategicky:

- pokud je cílem maximální teplota (pro chemii), mezichlazení se omezuje, aby se využilo teplo vznikající kompresí;
- pokud je cílem maximální tlak při rozumné spotřebě energie, mezichlazení se zapojuje naplno.

V p-V diagramu bez mezichlazení křivka tlaku prudce stoupá vzhůru (vysoká teplota i spotřeba).

S mezichlazením se křivka „láme“ směrem k ose objemu, což v diagramu představuje menší plochu = méně spotřebované elektřiny. Tato úspora je v grafu vidět jako plocha mezi adiabatickou a izotermickou křivkou.

V diagramu sledujeme cestu plynu od nízkého tlaku (P₁) k vysokému tlaku (P₂):

- **1. Adiabatická křivka (bez chlazení):**

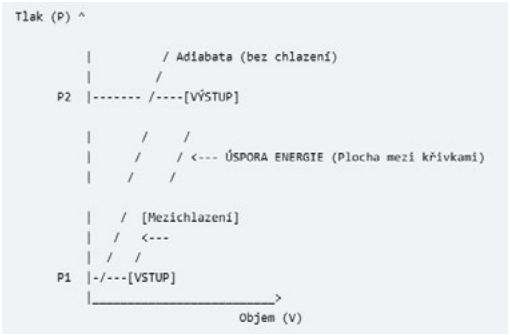
Pokud bychom plyn stlačili v jednom stupni bez chlazení, křivka by stoupala prudce nahoru. Práce vykonaná kompresorem odpovídá celé ploše pod touto křivkou.

- **2. Izotermická křivka (ideální stav):**

Kdybychom plyn dokázali chladit dokonale během stlačování, křivka by byla pozvolnější. To je teoretické minimum energie.

- **3. Vícestupňová komprese (pily):**

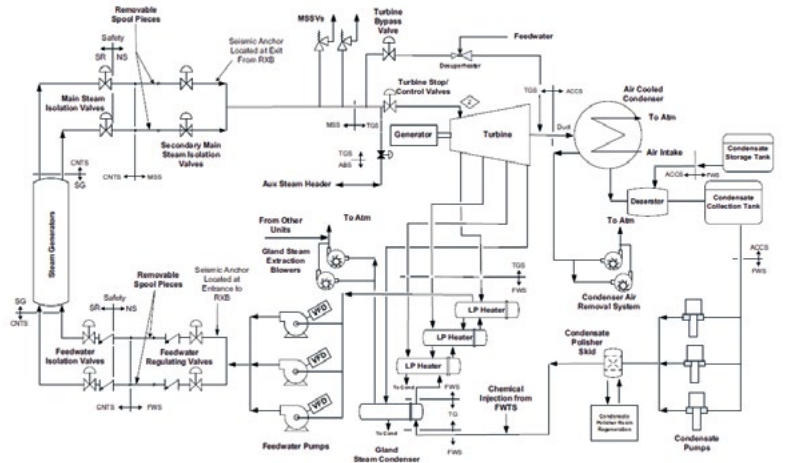
Skutečný proces v kompresorech EEE vypadá jako „zuby pily“:



Obr. 8: Pseudografické znázornění p-V křivky adiabatické komprese (nakresleno v kódu ASCII standardním nástrojem Google AI)



Obr. 9: Blokové schéma systému NuScale pro přeměnu páry a energie



- **3.1 Kompresce:**

Křivka stoupá (tlak roste, objem klesá, teplota roste).

- **3.2 Mezichlazení:**

Čára v grafu jde vodorovně (nebo mírně šikmo) doleva – tlak zůstává, ale objem se zmenšuje v důsledku ochlazení.

- **3.3 Další stupeň:**

Opětovně stoupání z nového bodu.

Díky těmto „zubům“ v diagramu na Obr. 8 spotřebuje kompresorový systém Ebara Elliott Energy mnohem méně elektřiny k dosažení cílového tlaku. Ušetřená plocha v grafu přímo představuje megawatty elektrické energie (MW_e), které se mohou prodat do elektrizační sítě.

Systém MARaK s jadernými reaktory NuScale (NPM) a sekundárním kompresním systémem zajišťuje flexibilní provozní režim. Tab. 4 ukazuje dva provozní režimy NPM:

1. bypass turbíny umožňuje rychlé změny výkonu odvedením až 100 % páry z turbín přímo do kondenzátorů,
2. změny výkonu lze dosáhnout také pomocí regulačních tyčí.



Tab. 4: Flexibilní provozní režimy pro modul NPM

Metoda	Snížení výkonu	Zvýšení výkonu
Obtok turbíny	100–20 % (8 min)	20–100 % (27 min)
Regulační tyče	100–20 % (< 24 min)	20–100 % (96 min)

Flexibilní ovládání umožňuje systém PSSC, kde klíčové vlastnosti náběhu a snižování výkonu jsou:

- jmenovitý výkon na maximum: < 1 minuta,
- jmenovitý výkon na minimum: < 1 minuta,
- studený start/vypnutí: závisí na typu procesu.

Kompresor je dimenzován tak, aby splňoval požadavky. Hodnoty průtoku a tlaku páry z kompresoru jsou nastavitelné v reálném čase s možností snížení o 20–30 %.

Zatímco samotný reaktorový modul (NPM) pracuje na principu přirozené cirkulace bez čerpadel, pro průmyslové aplikace (jako je teplárenství nebo petrochemie) využívá NuScale externí kompresní systémy k „zvýšení“ parametru páry.

Hlavní typy a dodavatelé kompresorů

- **Parní kompresory Ebara Elliott Energy (EEE):**

V březnu 2026 oznámila společnost NuScale strategické partnerství s EEE pro vývoj a dodávku parních kompresorů. Tyto kompresory jsou optimalizovány pro náročné podmínky v petrochemickém průmyslu, kde se používají k recyklaci a zvýšení tlaku procesní páry generované reaktorem.

- **Vícestupňová komprese:**

V integrovaných energetických systémech NuScale využívá koncepty založené na vícestupňové kompresi, které umožňují zvýšit teplotu procesní páry až na úroveň potřebnou pro specifické chemické procesy (např. přes 400 °C).

Vývoj těchto specializovaných kompresorů stále probíhá, přičemž dokončení prototypu a zahájení polních testů ve spolupráci s Ebara Elliot Energy se očekává kolem roku 2027.

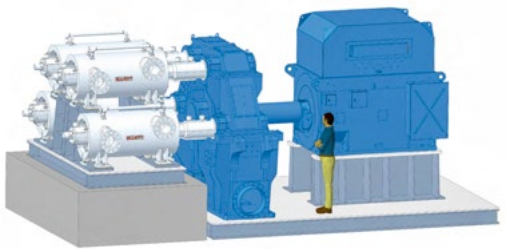
- **Flex-Op® kompresor neboli Elliottův kompresor**

Společnost Elliott vyvinula kompresor Flex-Op® s cílem zlepšit provozní flexibilitu ve vodíkových aplikacích, včetně zvýšení dopravní výšky a prů-

toku. Toto uspořádání umožňuje lepší spolehlivost a přístup k rotujícím komponentům.

Konstrukce Flex-Op® je efektivní a má mnoho výhod oproti pístovým kompresorům nebo extrémně vysokorychlostním odstředivým kompresorům. Používá standardní kompresory a oběžná kola. Uspořádání je kompaktní a snadněji se udržuje a opravuje. Je provozně flexibilní a umožňuje zapínat/vypínat jednotlivé kompresory, přepínat mezi sériovým a paralelním provozem a provozovat každý kompresor různými otáčkami [12].

Nejdůležitější pro kompresi čistého vodíku je, že procesní plyn je na rozdíl od pístové-

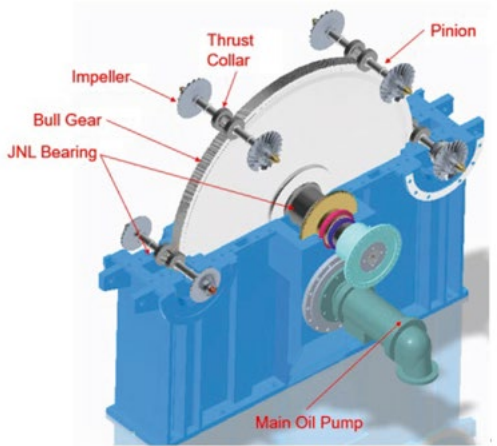
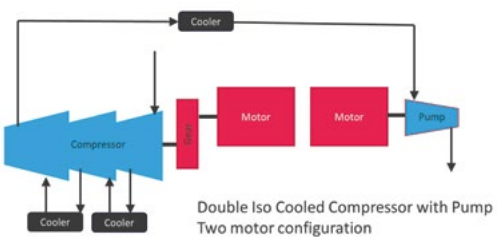
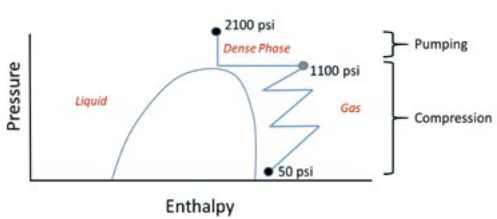


ho kompresoru chráněn před rizikem kontaminace olejem. Konstrukce Flex-Op® se konečně neomezuje pouze na vodíkové aplikace. Je stejně vhodná i pro další servisní aplikace, jako je skladování energie, procesní procesy, rafinace a chemická komprese.

Osvědčená technologie kompresorů Elliott je flexibilní se dvěma až čtyřmi kompresorovými tělesy, jednou vícepastorkovou převodovkou, až 40 oběžnými koly ve čtyřech tělesech s volitelným mezichlazením a kompresory s různými otáčkami.

Komprese a uspořádání

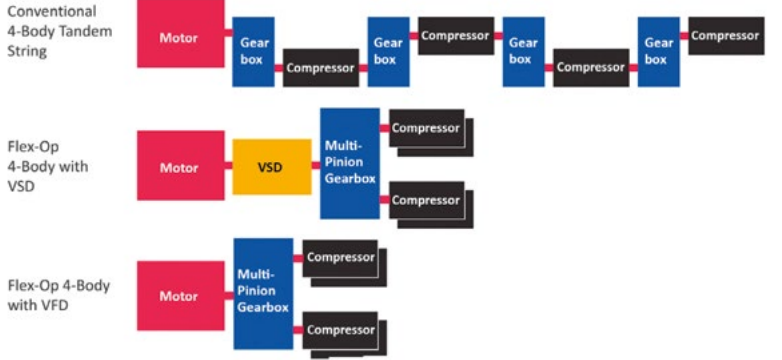
Uspořádání kompresoru Flex-Op® umožňuje flexibilitu, protože jednotlivé kompresory mo-



hou být provozovány sériově nebo paralelně (nebo jejich kombinací). Toho je dosaženo třemi až čtyřmi jednotlivými odstředivými kompresory uspořádanými kolem jedné vícepastorkové převodovky (viz Obr. 10.5).

Možnosti konfiguračního uspořádání

Protože je každý rotor připojen k vlastnímu pastorku pomocí ohebné hřídele spojené s centrálním ozubeným kolem, lze otáčky rotoru individuálně optimalizovat pro dosažení nejvyšší aerodynamické účinnosti [13]. Konfigurace válcového pláště Elliott ve spojení s jednou vícepastorkovou převodovkou umožňuje pohánět celou sestavu pohonem s proměnnou frekvencí – frekvenčním měničem (VFD – Variable Frequency Drive) nebo pohonem spojeným s frekvenčním měničem pro regulaci otáček (VSD – Variable Speed Drive).



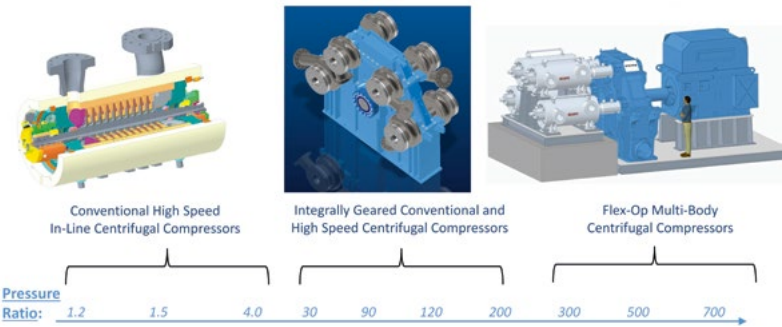
Výhodami je velmi flexibilní provoz, konfigurovatelné a ekonomicky optimalizovatelné možnosti komprese, dosažitelné pomocí vysokého kompresního poměru vzhledem k rozměrům a možnostmi sério-paralelního provozu. Přitom procesní plyn (v našem případě vodní pára) je bez kontaminace olejem.

Ve spolupráci s EEE dosahují tyto systémy následujících parametrů:

- **Výstupní parametry (po kompresi)**

Po průchodu kompresním systémem (adiabatická komprese) získává procesní pára tyto hodnoty:

- Teplota: standardně 500 °C a více (932 °F+), což je hranice pro samostatné lehkovodní reaktory nedosažitelná; výzkumy ukazují možnost zvýšení až na 650 °C (1 200 °F).
- Tlak: typicky kolem 10,3 MPa (1 500 psia), s potenciálem dosáhnout až 16,5 MPa (2 400 psia) pro nejnáročnější procesy.
- Průtok: jeden modul (NPM) o výkonu 250 MW_i dokáže po kompresi



Obr. 10.2: Konvenční tandemový kompresor vs. možnosti Flex-Op®



Obr. 10.3: Trajektorie pracovního bodu komprese a čerpání v diagramu P-s (3,45/75,84/144,79 bar, tlakový poměr 42)



Obr. 10.4: Dvojitý kompresor chlazený dle normy ISO s čerpadlem, konfigurace se dvěma motory



Obr. 10.5: Integrovaný převodový kompresor /Integrally Geared Compressors/



Obr. 10.6: Možnosti kompresní technologie (tlakový poměr až 580)



Obr. 10.7: Odstředivá kompresorová linka Elliott, a. Tříkompresorová linka (smontovaný stav), *obrázek vlevo*, b. Jeden kompresor (rozmontovaný stav), *obrázek vpravo*

vyprodukovat přes 225 tun páry za hodinu (> 500 000 lb/hr).

• Vstupní parametry (před kompresí)

Pro srovnání, pára přímo z reaktoru NuScale (sekundární okruh) má před vstupem do kompresoru tyto parametry:

- Teplota: cca 300–315 °C.
- Tlak: cca 3,3 MPa (475 psia) na vstupu do turbíny.

Bezpečnost provozu je u NuScale vyřešena systémem několika fyzických bariér a oddělených okruhů. Cílem je zajistit, aby se radioaktivní látky za žádných okolností nedostaly do koncového rozvodu tepla. Klíčové mechanismy, které tuto izolaci zajišťují jsou tyto:

- Tři oddělené okruhy (systém bariér)
- Primární okruh: Uzavřený uvnitř reaktorového modulu (NPM). Voda zde omývá palivo a přenáší teplo do parogenerátoru.
- Sekundární okruh: Pára vznikající v parogenerátoru, která běžně pohání turbínu. Právě z tohoto okruhu se odebírá pára pro další využití.
- Terciární (teplárenský/průmyslový) okruh: V tomto okruhu proudí voda nebo pára, která opouští elektrárnu směrem k městu nebo továrně. Od sekundárního okruhu je oddělena dalším mezi-výměníkem tepla (Intermediate Heat Exchanger). Tlaková bariéra (ochrana proti netěsnosti) Jedním z nejučinnějších technických opatření je udržování vyššího tlaku v čistém okruhu oproti okruhu s potenciální kontaminací.

Tlak v terciárním (teplárenském) okruhu je záměrně udržován vyšší než v okruhu sekundárním. Pokud by došlo k mikroskopické netěsnosti ve výměníku, čistá voda by díky vyššímu tlaku proudila směrem dovnitř k reaktoru, nikoliv radioaktivní pára ven k lidem. Pára z jaderného modulu je od průmyslového provozu oddělena a izolována pomocí mezi-výměníku tepla, takže do kompresoru Ebara Elliott Energy vstupuje již „čistá“ sekundární pára.

Reaktorové moduly NuScale Power Module (NPM) jsou od počátku navrženy jako víceúčelové zdroje energie, které kromě výroby elektřiny přímo počítají s využitím také pro teplárenství (District Heating). Spolupráce se společnostmi EEE hraje specifickou roli především v průmyslových aplikacích, kde jsou nároky na parametry páry odlišné od systémů vytápění měst SCZT.

Role NuScale a Ebara Elliott

Energy v teplárenství

- Standardní teplárenství: Pro běžné dálkové vytápění měst postačuje pára o nižších teplotách (obvykle do 150 °C). K tomu NuScale nepotřebuje vysokoteplotní kompresory od EEE; teplo lze odebírat přímo z terciárního okruhu přes výměníky tepla.
- Průmyslové teplárenství (process heat): Zde přichází ke slovu partnerství s EEE. Jejich technologie MVR (mechanická rekompresce par) umožňuje zvýšit teplotu páry z reaktoru na 500 °C i více. To je klíčové pro petrochemické závody, kde je vyžadována velmi horká

procesní pára pro chemické reakce. Dále pro vysokoteplotní distrikty (průmyslové zóny), které vyžadují páru o vysokém tlaku a teplotě pro technologické účely, nikoliv jen pro ohřev vody v radiátorech. Klíčové výhody pro teplárenské systémy

- Dekarbonizace: Moduly NPM mohou nahradit dosluhující uhelné teplárny (tzv. coal-to-nuclear repowering).
- Flexibilita: Díky modulární konstrukci VOYGR™ lze výkon teplárny škálovat podle velikosti města či průmyslového areálu (od 1 po 12 modulů).
- Kogenerace: Reaktor může současně vyrábět elektřinu pro síť a zbytkové teplo dodávat do městské teplárenské sítě, což dramaticky zvyšuje celkovou energetickou účinnost systému.

Systém monitoringu je vybaven citlivými čidly radiace na všech výměnících. Při jakékoliv detekci anomálie dojde k okamžitému automatickému uzavření izolačních ventilů, které fyzicky odpojí budovu reaktoru od venkovní rozvodné sítě. Izolační ventily se mimo jiné zkoumají, vyvíjí a vyrábí v německém centru HZDR (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf). Stejně centrum vyvíjí i izolační ventily používané u SMR BWRX-300 [2], [3].

Díky popsaným odděleným okruhům je možné reaktory NuScale umísťovat v blízkosti obytných zón či průmyslových center (tzv. Site Boundary Emergency Planning Zone), což u velkých klasických elektráren není možné. Vývoj komerčního kompresoru má být dokončen v roce 2027, přičemž aktuálně probíhá výběr partnerů pro provozní testování.

Dynamické řešení komprese

Společnost EEE používá převodovky a uspořádání Flex-Op®, které představují zásadní inovaci v efektivitě komprese. Jejich hlavní výhoda spočívá v extrémní provozní flexibilitě, která přímo vede k úsporám energie v porovnání s konvenčními systémy s jedním hřídelem.

Převodovky Flex-Op® šetří energii následujícími způsoby:

• Individuální optimalizace otáček

U běžných kompresorů jsou všechna oběžná kola na jednom hřídeli a točí se stejnou rychlostí.

Flex-Op® využívá vícepastorkovou převodovku (multi-pinion gearbox), která umožňuje:

- Optimalizaci každého stupně: Každé oběžné kolo (rotor) může běžet na svých vlastních, ideálních otáčkách.
- Maximální aerodynamickou účinnost: Plyn (nebo pára) mění své vlastnosti (hustotu) v každém stupni komprese. Možnost přizpůsobit rychlost rotoru těmto změnám minimalizuje energetické ztráty.

• Dynamická konfigurace (sériově-paralelní provoz)

Systém Flex-Op® umožňuje měnit zapojení jednotlivých kompresních těles za chodu:

- Přepínání režimů: Jednotlivé kompresory lze zapojit sériově (pro vysoký tlak) nebo paralelně (pro velký průtok).
- Odpojování stupňů: Pokud klesne poptávka po kompresi, lze jednotlivá tělesa zcela vyřadit z provozu (engage/disengage), čímž se zamezí plýtvání energií při částečném zatížení.

• Kompaktnost a snížení mechanických ztrát

Díky integraci až čtyř kompresních těles kolem jedné centrální převodovky se výrazně zmenšují rozměry celého soustrojí:

- Úspora prostoru: Lineární stopa kompresní sekce se může zkrátit z běžných 12 metrů na pouhé 3 metry.
- Méně komponent: Menší počet ložisek a těsnění v porovnání s několika samostatnými stroji snižuje celkové mechanické tření a ztráty energie.

Využití s pohony s proměnnými otáčkami (VSD/VFD)

Celá sestava Flex-Op® je navržena pro spolupráci s frekvenčními měniči (Variable Frequency Drives):

- to umožňuje plynule regulovat výkon celé soustavy podle aktuální potřeby procesu, což může ušetřit 30–50 % energie ve srovnání se stroji běžícími na fixní otáčky.

U vícestupňových kompresorů Ebara Elliott Energy (EEE) s technologií Flex-Op® může být kolem jedné centrální převodovky umístěno až 10 oběžných kol (rotorů). Typické průmyslové konfigurace pro MVR (mechanickou rekompresi par) však nejčastěji využívají 4 až 8 stupňů. Systém Flex-Op® přepíná mezi režimy pro maximální efektivitu, a lze tedy realizovat:

- **Sériové zapojení (pro vysoký tlak / teplotu)**

Pára prochází postupně všemi stupni. Každý stupeň zvýší tlak a teplotu.

- **Paralelní zapojení (pro vysoký průtok)**

Pára se rozdělí a prochází více stupni současně. Ideální, když reaktor běží na plný výkon a potřebujete zpracovat maximum páry.

- **Hybridní / Dynamické odpojení (úsporný režim)**

Pokud klesne potřeba, spojka fyzicky odpojí nepotřebné rotory, aby neběžely naprázdno.

Řešení společnosti EEE je unikátní, protože umožňuje díky integrovaným převodovkám a vnějším přepouštěcím potrubím měnit konfiguraci podle toho, zda zákazník (např. teplárna, chemička) zrovna potřebuje extrémně horkou páru, nebo jen velké množství středně teplé páry, zatímco u běžných kompresorů je cesta páry fixně daná potrubím a konstrukcí stroje.

Mezichlazení u EEE funguje stručně řečeno takto:

Snížení příkonu (práce kompresoru): Ochlazením plynu mezi jednotlivými stupni se zmenší jeho měrný objem. Motor pak v dalším stupni stlačuje „hustší“ médium, což výrazně snižuje celkový potřebný příkon (často o 15–30 % u vícestupňových strojů).

Ochrana materiálů: U aplikací, jako je MVR pro NuScale, kde pára dosahuje až 500 °C, pomáhá mezichlazení udržet teploty v jednotlivých stupních v mezích, které nepoškozují ložiska, těsnění a povrchy oběžných kol.

Technologie EEE je klíčová pro projekty NuScale, protože umožňuje efektivně „vyladit“ parametry páry pro různé průmyslové zákazníky s minimálními energetickými ztrátami.

Shrnutí pilotního systému MARaK na bázi NuScale a Ebara Elliott Energy

Role NuScale a EEE je významná v průmyslovém teplárenství (Process Heat), kde ve spolupráci s EEE technologie MVR umožňuje zvýšit teplotu páry z reaktoru na 500 °C i více.

Klíčovými výhodami pro teplárenské systémy je dekarbonizace (moduly NPM mohou nahradit dosluhující uhelné teplárny, tzv. coal-to-nuclear repowering). Velmi důležitá je flexibilita, protože díky modulární konstrukci VOYGR™ lze výkon teplárny škálovat podle velikosti města či průmyslového areálu (od 1 po 12 modulů).

Výhody jsou významné především v kogeneračním režimu, což dramaticky zvyšuje celkovou energetickou účinnost systému. V současné době NuScale aktivně spolupracuje na projektech v Polsku a Rumunsku, kde je integrované do stávajících teplárenských sítí jedním z hlavních cílů nasazení těchto SMR.

USER CASE #2 NUWARD, 400 MW_e

V elektrárenském režimu může vyrobit až 400 MW_e (celkový tepelný výkon reaktoru 1 150 MW_t). V kogeneračním režimu výroba 200 MW_e a současně teoreticky až 575 MW_t pro teplárenství.

Z tepelného výkonu reaktoru je využívána pára z turbínových odběrů pro regeneraci a ohřev napájecí vody (Obr. 14 pro Rolls-Royce SMR), která je započtena ve výrobě 200 MW_e. V nevýrobní oblasti je odebrané teplo využíváno např. pro vlastní spotřebu areálu, vytápění obytných budov, TUV pro provozní personál apod. Specificky významné právě u NUWARD 400 je to, že se plánuje a projektuje také „teplárenská varianta NUWARD Cogeneration“, kde je vyšší odběr pro teplárenství, a sice ve dvou variantách:

- dodávka horké vody s teplotami 150 °C pro vytápění, nebo
- dodávka horké vody, resp. syté páry s teplotou až 280 °C pro odsolování nebo výrobu vodíku.

Algebraicky, bez započítávání tepelných ztrát a účinností, lze napsat tepelnou výkonovou rovnici:

$$1\,150\ (400\ \text{MW}_e) = 575\ (200\ \text{MW}_e) + 330\ (115\ \text{MW}_e) + 245\ (85\ \text{MW}_e)$$

NUWARD 400 má flexibilně proměnný výkon „100–30–100“ v % jmenovité hodnoty, s frekvencí změny výkonu 2 × denně.

Stav vývoje v roce 2026 a hlavní milníky jsou následující:

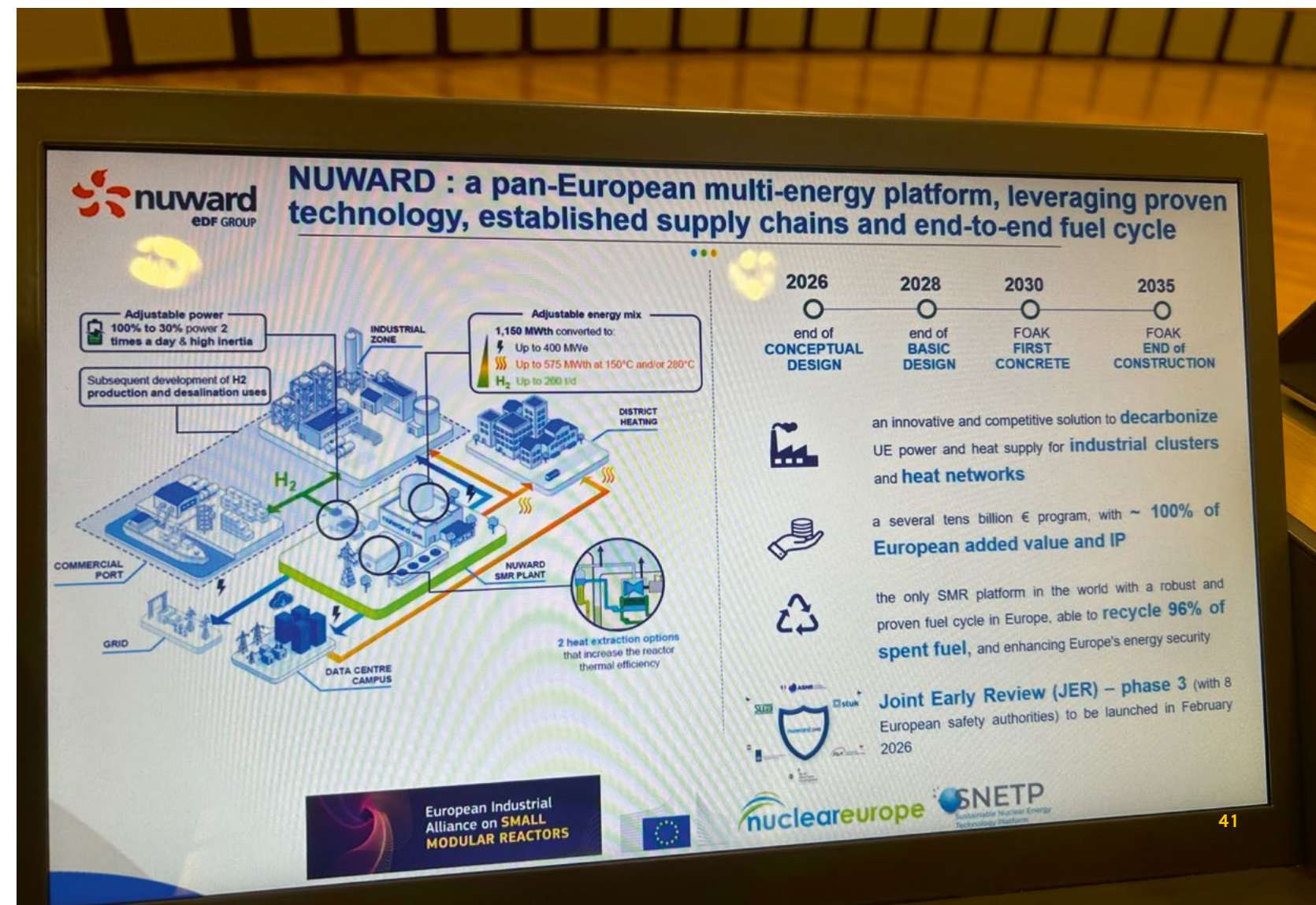
- Dokončení koncepčního návrhu reaktoru NUWARD 400 do poloviny roku 2026.
- Zahájení základního projektu (Basic Design). Po schválení konceptu má v druhé polovině roku 2026 následovat fáze základního projektování, která potrvá do roku 2029.

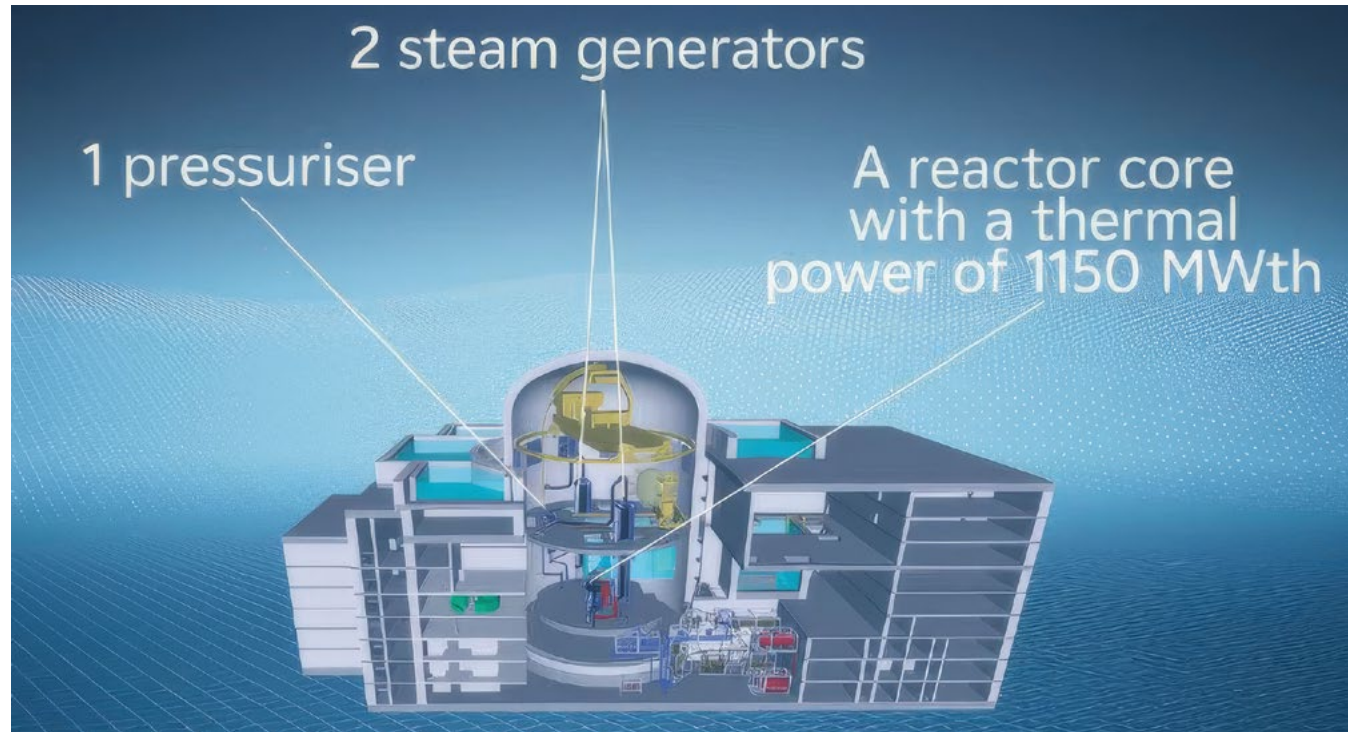
— Regulační přezkum. Na konci roku 2026 se očekávají závěry třetí fáze společného evropského hodnocení bezpečnosti JER (Joint Early Review), na kterém spolupracují národní regulační orgány z Francie (ASN), Finska (STUK), Česka (SÚJB) a dalších zemí. Nedávno se připojily švédské (SSM), polské (PAA) a nizozemské (ANVS) regulační orgány.

Francouzská státní energetická společnost EDF a její dceřiná společnost NUWARD v současnosti spolupracují se společnostmi Arabelle Solutions, Framatome, Tractebel a Ansaldo Nucleare na stanovení technologických možností nové verze reaktoru NUWARD 400.

Finální technická specifikace by měla být dokončena v polovině roku 2026.

↓
Obr. 11: Přehledové schéma projektu NUWARD 400





↑
Obr. 12: Technologické schéma #1 zdroje SMR NUCWARD 400

Obchodní a technické charakteristiky NUCWARD 400

Nová verze se liší od původního konceptu ($2 \times 170 \text{ MW}$)^{[1], [7], [8]}, především vyšším výkonem a orientací na průmyslové využití. Cílová výše nákladů na výrobu elektřiny (LCOE) je v rozmezí 80–100 €/MWh.

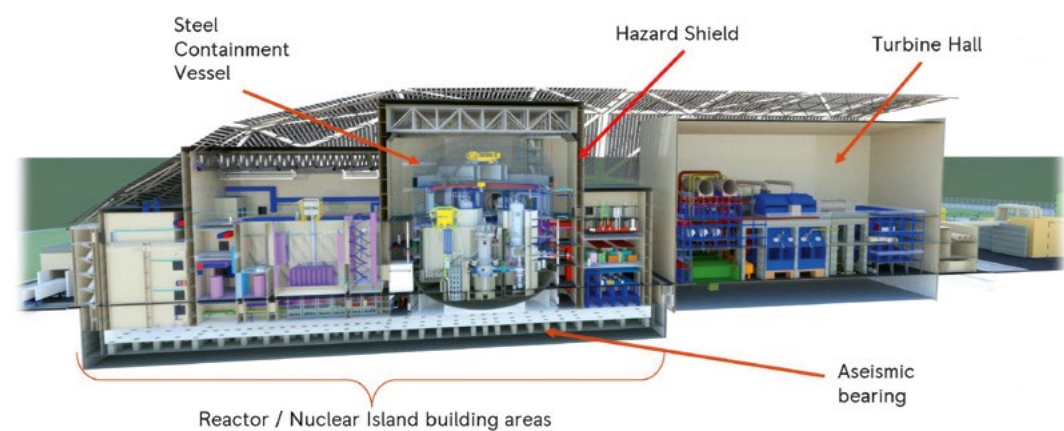
První prototyp (FOAK) by měl být postaven ve Francii, přičemž uvedení do provozu se očekává kolem roku 2035. Do roku 2050 má EDF ambici provozovat až 30 těchto jednotek.

NUWARD 400 je jeden z vhodných SMR pro systémy centrálního zásobování teplem (SCZT), vzhledem k několika specifickým konstrukčním vlastnostem, které jej odlišují od čistě elektrárenských projektů. Zatímco většina SMR je primárně optimalizována na výrobu elektřiny, NUCWARD 400 byl od začátku navrhován s ohledem na kogeneraci. Výhodou přitom je, že při kombinované výrobě elektřiny a tepla dosahuje systém výrazně vyšší celkové energetické účinnosti než při pouhé kondenzační výrobě elektřiny. Zároveň teplotní parametry topného média jsou vhodné pro české teplárenství, protože NUCWARD 400 je schopen dodávat teplo v rozmezí 150 °C až 280 °C.

Nižší teplota je vhodná pro české soustavy SCZT, které typicky vyžadují v horkovodních napájecích teploty kolem 130–150 °C. Teplota až 280 °C umožňuje využití v průmyslové energetice pro technologickou páru, což rozšiřuje jeho komerční uplatnění mimo topnou sezónu. Dosazení vyšších teplot než 280 °C už je z principu nemožné, a právě proto je v tomto článku popisován vysokoteplotní systém MARaK, který může být realizován také s blokem NUCWARD.

Pokud je prioritou lokality nejen elektřina, ale i masivní a stabilní dodávka tepla pro velké aglomerace, NUCWARD 400 nabízí technologicky vyladěné rozhraní pro napojení na teplárenskou síť, což může být právě pro české teplárenství s velkým množstvím rozsáhlých SCZT.

USER CASE #3 ROLLS-ROYCE SMR, 470 MW. V rámci odborné konference^[11] uvedl pracovník ČEZ v prezentaci „Rolls-Royce SMR v ČR: design a energetické využití“ a následné diskusi, že typy PWR/LWR, mezi které patří také Rolls-Royce SMR, jsou vhodné primárně pro výrobu elektrické energie v režimu základního zatížení (baseload), kdy výroba tepla je vedlejší produkt. Toto stanovisko zastává Skupina ČEZ.



→
Obr. 13: Schéma rozložení elektrárny (Plant Layout)

Toto stanovisko lze doložit také tepelným schématem na Obr. 13.

Technologie řízení Hlavní parní turbína – generátor (TG) je vyvinuta na bázi Siemens SST-8000, což je komerčně široce dostupná parní turbína založená na vyspělé technologii a osvědčených postupech.

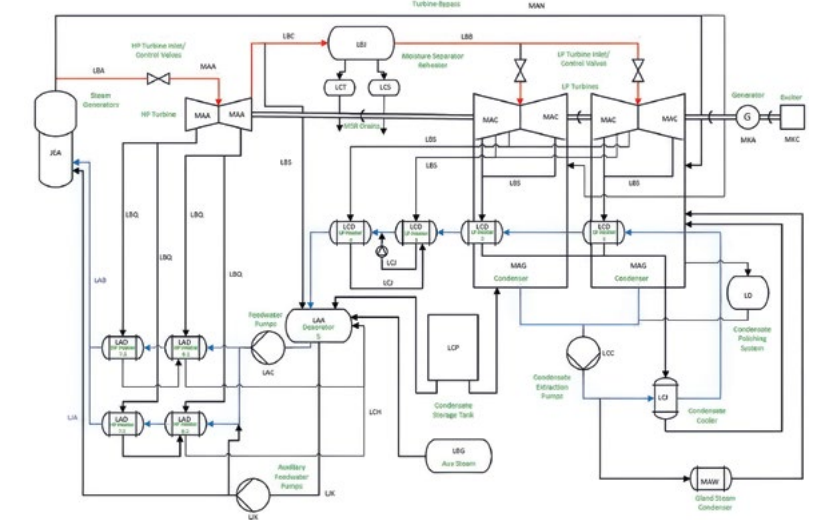
Elektrárenský blok Rolls-Royce SMR je navržen tak, aby obsahoval standardní kontejnery na vyhořelé palivo. Vyznačuje se zvýšenou flexibilitou skladování pro provozovatele a odstraňuje potřebu nových řešení pro skladování vyhořelého paliva.

Rolls-Royce SMR se z hlediska bezpečnosti nespolehlá pouze na hlavní chladicí vodu, což zvyšuje složitost a náklady na infrastrukturu chladicí vody. V závislosti na umístění elektrárny existují celosvětově dvě varianty řešení chladicí vody – přímé chlazení (mořskou vodou, což není případ ČR), a nepřímý systém mechanického nuceného tahu pro lokality s omezenější dostupností vody.

ZÁVĚR

Je třeba zmínit, že v teplárenství nejsou požadavky tak náročné a přesně definované jako ve specifických provozech chemického, gumárenského a petrochemického průmyslu. Kompresní systém proto lze optimalizovat pro konkrétní provozní podmínky bez nutnosti vysoké provozní flexibility. Vedle dodávky tepla pro vytápění může systém současně zajišťovat i dodávku průmyslové páry o požadovaných parametrech, ovšem za cenu určitého snížení celkové tepelné účinnosti.

Příkladem je Teplárna Otrokovice (TOT), která dodává nízkotlakou páru (NT 0,15 MPa, 230 °C; NT 0,6 MPa, 260 °C), středotlakou páru



(ST 1,4 MPa, 290 °C) a vysokotlakou páru (VT 3,6 MPa, 320 °C), přičemž nominální parametry páry jsou pevně stanoveny. Průmyslovými odběrateli jsou tři podniky. Společnost Continental Barum odebírá páru o tlacích 3,6 MPa, 1,4 MPa a 0,6 MPa, společnost Fatra Napajedla páru o tlaku 1,4 MPa a společnost TOMA středotlakou páru o tlaku 1,4 MPa.

Do hlavní výměňkové stanice (HVS) je přiváděna nízkotlaká pára (NT) o tlaku 0,15 MPa a teplotě 230 °C. Z výstupu HVS jsou teplem zásobovány čtyři základní oblasti: sídliště Batov (Bahňák), městská část Malenovice a města Otrokovice a Napajedla. Obdobná situace je také v Teplárně České Budějovice (TpČB), kde je do podniku Mondi Bupak dodávána stredo-

↑
Obr. 14: Sekundární okruh Rolls-Royce SMR (verze pro SMR ETE bez teplárenského odběru pro vytápění a průmysl)

tlaká pára (ST) o tlaku 1,6 MPa a teplotě 240 °C a do městské nemocnice nízkotlaká pára (NT) o tlaku 0,8 MPa a teplotě 200 °C.

České teplárenství tedy nemusí vyčkávat na komerční dostupnost vysokoteplotních reaktorů a pokročilých SMR Gen IV. Potřebu dodávky páry s vyššími parametry lze v přechodném období řešit s využitím standardních lehkovodních SMR (LWR), zejména reaktorů tlakových PWR a varných BWR.

Nejvhodnější se zdají popisované NuScale VOYGR 2, nebo 4 moduly (4 × 77 = 308 MW_e), nebo 6, 12 modulů^[1, 5]. Nebo nová verze NUWARD 400^[7, 8], nebo také varný BWRX-300^[2, 3, 4]. Pokud se týká způsobu řešení, tak zvyšování tlaku páry je v technické praxi klíčové pro potřeby průmyslových technologií. Tlak a teplota páry se zvyšuje v našem případě mechanickou kompresí.

Pro realizaci „teplárenského a průmyslového modulu SMR“ se jeví jako vhodné typy na horní výkonové hranici třídy středních SMR, z pohledu České republiky tedy s výkonem 300 MW_e.

Typy SMR s nižším výkonem, než je horní hranice kategorie malých SMR, například SMART (100/110 MW_e) od korejské společnosti KAERI^[1, 9, 10], jsou pro rozšíření o navazující technologii adiabatické komprese za účelem zvýšení parametrů páry méně vhodné, protože by neúměrně snižovaly výkon dostupný pro kogenerační výrobu.

Typy SMR s vyšším výkonem, které již spadají do střední kategorie SMR, například Rolls-Royce SMR o výkonu 470 MW_e^[6], jsou vhodné spíše pro zajištění výkonové přiměřenosti elektrizační soustavy na celostátní úrovni, tedy pro

využití ve středně velkých elektrárnách. Tomu odpovídá i skutečnost, že společnost ČEZ vybrala technologii Rolls-Royce SMR pro realizaci české flotily SMR. Pokud Skupina ČEZ plánuje instalovaný výkon přibližně 3 GW_e, znamenalo by využití reaktorů SMART 100/110 MW_e potřebu zhruba 30 reaktorových jednotek. Naproti tomu při použití reaktorů Rolls-Royce SMR by stejného výkonu bylo dosaženo přibližně šesti reaktory.

Také z hlediska velikosti provozovaných tepláren se soustavami SCZT, a velikosti průmyslových procesů je výkon 300 MW_e optimální.

Zpoždění vývoje vysokoteplotních reaktorů generace IV za reaktory PWR/BWR se dá aplikálně dohnat v průmyslovém nasazení využitím reaktorů PWR/LWR a BWR, vybavených technologií komprese výstupní syté páry na vyšší požadované parametry průmyslové přehřáté páry (MARaK).

U bloků NuScale VOYGR 2, kde jeden modul generuje 250 MW_t (77 MW_e), může komplex SMR PWR produkovat více než 225 t/h páry při tlaku 10,5 MPa, a teplotě 500 °C. Při použití víceetapňové komprese existuje dokonce potenciál zvýšit parametry až na 16,8 MPa, a více než 650 °C.

Spolu s rozvojem středně velkých SMR jednotek, se vyvíjejí také mikroreaktory MMR z kategorie Gen IV. Lze formulovat závěr, že české teplárenství a průmysl nemusí čekat na reaktory Gen IV, ale můžeme jejich potřebu, tedy potřebu zdrojů s vysokou teplotou výstupního média, řešit „na přechodnou dobu“ využitím technologicky již standardních typů SMR na bázi reaktorů lehkovodních LWR.

Reference

[1] Neuman, P. Malé modulární bloky SMR českému teplárenství nepomohou, *All for Power*, č. 2, 2022.

[2] Neuman, P., Královec, J. BWRX-300 jediný malý modulární reaktor varného typu, *Jaderná energie/Jadrová energia*, č. 1, 2025.

[3] Neuman, P. Jaderné elektrárny BWR a příprava k výstavbě BWRX-300, *Jaderná energie/Jadrová energia*, č. 2, 2025.

[4] Neuman, P. Jadrové elektrárny BWR a příprava na výstavbu BWRX-300, díl (1), *ATP Journal*, č. 1, 2026, str. 20–21, díl (2), *ATP Journal*, č. 2, 2026, str. 46 47, díl (3), *ATP Journal*, č. 3, 2026, (počet stran 2).

[5] NuScale Small Modular Reactor Integration for Hydrogen and Ammonia Production, WP-178373, Rev 2, February 25, 2025.

[6] Rolls-Royce SMR Overview for US NRC. Rolls-Royce SMR Ltd, 2026.

[7] Neuman, P. NUWARD™ SMR – evropský reaktor pro českou energetiku a teplárenství. *All for Power*, č. 2, 2023.

[8] Neuman, P. NUWARD™ SMR – evropský malý modulární reaktor pro teplárenství. *PRO-ENERGY*, č. 3, 2023.

[9] Korejský plovoucí modulární reaktor SMART 100/110: Koncept získal předběžné schválení. <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/korejsky-plovouci-modularni-reaktor-koncept-od-samsungu-ziskal-predbezne-schvaleni> 24. prosince 2025.

[10] Sang-Gyu Lim. Overall Introduction to the SMR Development in Korea. Workshop EVT2404165, 31 March 2025.

[11] Neuman, P. Jaderné teplárny a výtopny – pohled na České možnosti. Odborná konference Kotle, tepelná a jaderná energetika, 9. – 10. března 2026, Brno.

[12] Elliott Flex-Op Compressor. White paper CMP 2006.1221. ©2021 ELLIOT Group EBARA Corp.

[13] Brun, K. Compression for Carbon Capture. Ebara Elliott Company, 2024.



Ing. Petr Neuman, CSc.
neumanp@volny.cz

Je členem spolku Jaderní veteráni, působí jako energetický senior konzultant ve sdružení NEUREG. Oblastí jeho odborného zájmu je řízení, modelování a simulace energetických procesů, zdrojů a soustav, simulátory a trenažéry pro energetiku, automatická regulace a řízení procesů elektroenergetiky, dodávka služeb výkonové rovnováhy (SVR). Aktuálně se věnuje současnému stavu a rozvoji energetiky v České republice a Evropě. Zaměřuje se na jaderné elektrárny velké i SMR, specificky s odběrem tepla pro dálkové vytápění soustav SCZT v teplárenství.

ITER ve fázi integrace: technická realita největšího zařízení pro termojadernou fúzi

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

Článek pojednává o současné fázi projektu ITER, který vstoupil do kritického období systémové integrace. Popisuje, jak se z původně izolovaných fyzikálních experimentů stává komplexní technologický celek, v němž se propojují materiálová, konstrukční, magnetická a plazmová problematika. Popsány jsou problémy s montáží vakuové nádoby, extrémní zatížení supravodivých magnetů a technologické limity divertoru vystaveného tepelným tokům až 20 MW/m². ITER je prezentován jako klíčový krok k ověření inženýrských řešení nutných pro budoucí fúzní energetiku.

The article discusses the current integration phase of the ITER project, marking the transition from isolated plasma experiments to a fully interconnected industrialscale fusion system. It highlights engineering challenges such as geometric tolerances in the vacuum vessel, extreme mechanical and thermal loads on superconducting magnets, and the demanding conditions faced by the tungsten divertor exposed to heat fluxes up to 20 MW/m². ITER is presented as a crucial platform for validating the engineering solutions required for future fusion power plants, demonstrating that the main obstacles lie in system integration rather than plasma physics alone.

Projekt ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) je dnes jedním z nejambicióznějších a technologicky nejnáročnějších inženýrských počinů, které lidstvo realizuje. Ačkoli bývá v médiích často prezentován jako „reaktor budoucnosti“ nebo „umělé Slunce na Zemi“, těžiště jeho skutečného významu se však nachází jinde: ITER představuje první systematický pokus převést desítky let experimentální fyziky plazmatu do podoby plně integrovaného průmyslového a technologického systému, který musí bezchybně fungovat jako jeden provázaný celek.

Právě v tomto rozdílu – mezi izolovaným fyzikálním experimentem a komplexním inženýrským systémem – se skrývá podstata současných výzev. Experimentální tokamaky minulých generací byly schopny zkoumat jednotlivé fyzikální jevy relativně odděleně a v časově omezeném rozsahu. ITER naproti tomu musí všechny tyto dynamické jevy spojit do jediného stabilního provozního režimu. V něm musí být sou-

časně splněny extrémní podmínky vysoké teploty, dostatečné hustoty plazmatu, dlouhé doby udržení a zároveň kontinuální, bezpečná interakce s materiálovou konstrukcí samotného zařízení.

Tento rigidní požadavek zásadně mění charakter projektu: z akademického experimentu



se stává čistě systémový problém. V něm jsou fyzika plazmatu, materiálové inženýrství, kryogenní technika a pokročilé řídicí systémy neoddělitelně a nelineárně provázány.

Od stavební fáze k integraci

Dokončení masivní stavební infrastruktury v jihofrancouzském Cadarache – tokamakové haly, obřího kryostatu, biologického stínění a navažujících podpůrných technologických objektů – představovalo vizuálně působivý milník. Z pohledu laické veřejnosti může ITER působit jako téměř dokončený reaktor. Z pohledu inženýrského a manažerského je však právě tento okamžik teprve začátkem nejkomplexnější a nejrizikovější fáze celého projektu – fáze systémové integrace.^[1, 2]

Integrace v tomto měřítku znamená, že se tisíce jednotlivých částí – navržených v různých zemích, vyrobených z odlišných materiálů a testovaných izolovaně – začínají fyzicky i funkčně spojoovat. V této fázi se poprvé naplno a bez možnosti simulace projevují kritické faktory:

- kumulace výrobních tolerancí: odchylky v řádu milimetrů u obřích struktur se při montáži sčítají do nepřijatelných deformací;
- skutečné mechanické vazby: pnutí vznikající při svařování a mechanickém ukotvení masivních komponent;
- interakce polí a proudů: neočekávané interference mezi gigantickými magnetickými poli a okolními kovovými konstrukcemi;
- dynamické chování: jak se celý systém chová při prudkých změnách tepelného a mechanického zatížení.

Teoretické modely a numerické simulace nedokážou stoprocentně zachytit všechny multifyzikální vazby. ITER se proto postupně stává sám o sobě experimentem – kdy se až na místě testují propojené systémy a technologie.

Tokamak jako geometrický extrémní konstrukce

Jedním z nejzřetelnějších příkladů této materiálové a geometrické complexity je samotný tokamak – vakuová nádoba obklopená masivními

magnetickými cívkami. Jde o konstrukci, která musí skloubit požadavky těžkého velkorozměrového strojírenství s mikrometrovou přesností high-tech technologií.

Vakuová nádoba ITERu je vertikálně rozdělena do devíti samostatných sektorů, které se přímo na místě montáže svařují do jednoho hermetického celku.^[2] Každý z těchto sektorů je již v průběhu sestavování spojen s příslušnou toroidální magnetickou cívkou a pokročilým tepelným stíněním do jednoho masivního, tisícitunového modulu.^[1] Tento kolos se následně s milimetrovou přesností spouští do hluboké tokamakové jámy, kde musí dokonale dosednout na již instalované sousední části.

Zde se v uplynulých letech objevil zásadní technologický problém: i když každý jednotlivý díl z pohledu výrobce splňoval nominální tolerance, jejich reálná kombinace a drobné tvarové deformace (např. nedokonalosti svarů na sektorech vakuové nádoby) vedly k odchylkám, které byly pro finální provoz nepřipustné. V praxi to znamenalo:

- styčné plochy sektorů k sobě ideálně nelícovaly a vyžadovaly navařování a frézování přímo na místě;
- při pokusech o mechanické stažení vznikala v materiálu obrovská vnitřní napětí;
- hrozily mikrodeformace, které by v budoucnu fatálně ovlivnily geometrii magnetického pole.

Tyto odchylky nejsou pouze mechanickým problémem. Výsledné magnetické pole je extrémně citlivé na jakékoli geometrické asymetrie. I nepatrný posun cívký o několik milimetrů může deformovat konfiguraci magnetického pole, což následně vede k destabilizaci plazmatu a jeho předčasnému kolapsu (tzv. disrupci). Z tohoto důvodu musely být některé již instalované komponenty vakuové nádoby nákladně demontovány, podrobeny precizním opravám a znovu usazeny. Tento proces si vyžádal zásadní revizi harmonogramu.^[1, 3]

→
Obr. 1: Výstavba tokamaku ITER (zdroj: www.iter.org)

Magnetický systém

Magnetický systém ITERu představuje jedinečný technologický systém. Jeho primárním úkolem je vygenerovat magnetické pole, které udrží plazma o teplotě 150 milionů stupňů Celsia bezpečně daleko od stěn vakuové nádoby. Zároveň však tento systém funguje jako hlavní zdroj enormního mechanického a strukturálního zatížení celé nosné konstrukce reaktoru.

Soustava supravodivých magnetů – zahrnující centrální solenoid, osmnáct toroidálních a šest poloidálních cívek – vytváří magnetické pole o intenzitě přesahující hodnotu 13 tesla. Při průtoku elektrických proudů v řádu desítek kiloampér vznikají uvnitř magnetů Lorentzovy síly, které lze jen obtížně přirovnat k běžným pozemským aplikacím. Tyto síly se permanentně snaží celou konstrukci destruovat: trhají toroidální cívky směrem ven, obrovským tlakem stlačují centrální solenoid a vyvolávají masivní torzní momenty v celé konstrukci.

Klíčovým inženýrským problémem je, že toto zatížení není statické. ITER bude pracovat v pulzním režimu, což znamená, že celá tisícitunová konstrukce bude opakovaně, během tisíců fúzních zážehů, vystavována mechanickým

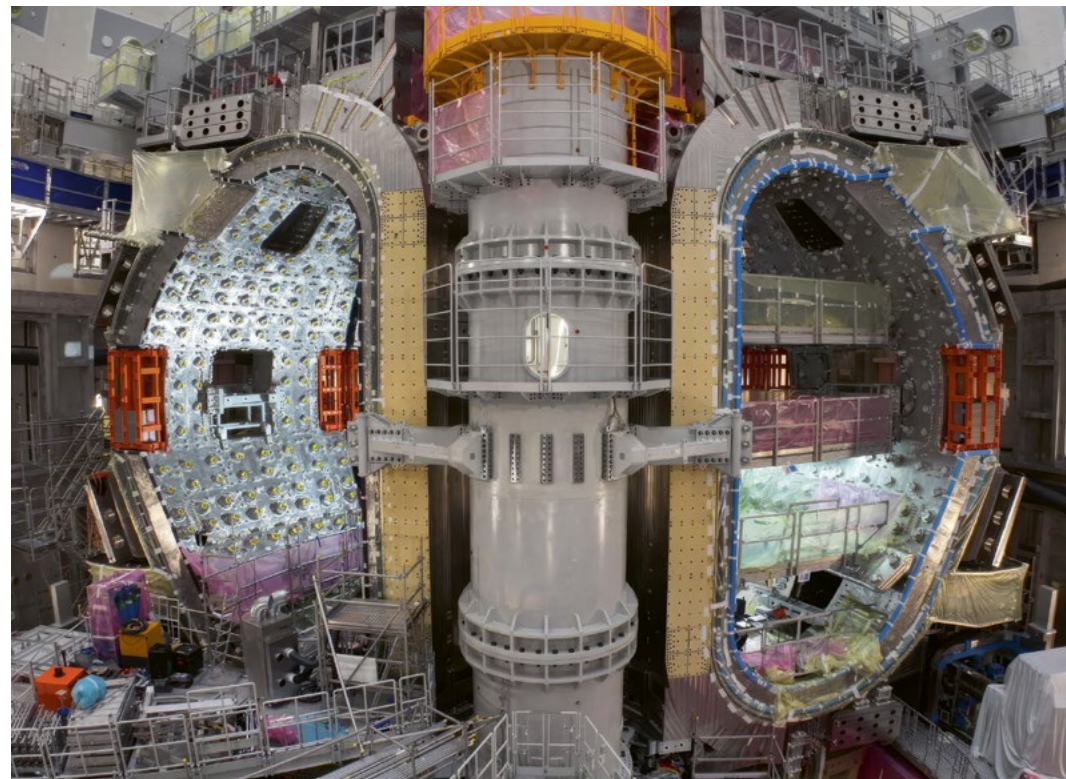
rázům.^[5] To klade extrémní nároky na únavovou pevnost materiálů a integritu spojů.

Dalším kritickým aspektem je obrovský teplotní gradient. Supravodivé magnety z niobu a cínu (či niobu a titanu) musí být chlazeny supratekutým heliem na teplotu -269 °C .^[4] Pouhých několik metrů od nich se však nachází vakuová nádoba ohřívána plazmatem na stovky stupňů Celsia. Tento permanentní teplotní spád vyvolává obrovské tepelné dilatace a dodatečná vnitřní napětí, která musí mechanická ložiska a pružné závěsy kontinuálně kompenzovat.

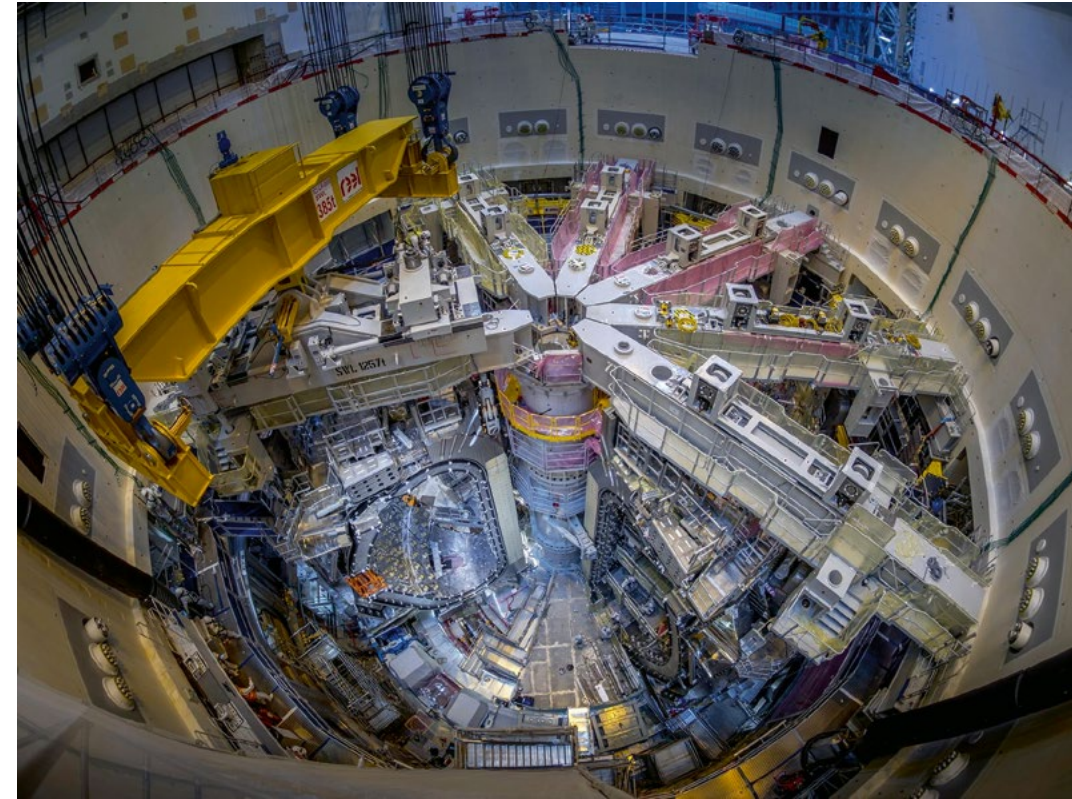
Plazma jako vysoce nelineární systém

Z fyzikálního hlediska je hlavním vědeckým cílem ITERu dosažení stabilního režimu tzv. „hořícího plazmatu“ (burning plasma).^[6] Jde o stav, kdy je fúzní reakce natolik intenzivní, že podstatná část energie potřebné k udržení extrémní teploty plazmatu není dodávána zvenčí, ale generuje se přímo uvnitř něj prostřednictvím vysoce energetických alfa částic vznikajících při fúzi jader deuteria a tritia.

Tento přechod radikálně mění dynamiku celého systému. V menších současných tokamacích je plazma relativně pasivní a je plně



→
Obr. 2: Konstrukce vakuové nádoby
(zdroj: www.iter.org)



←
Obr. 3: instalace šestého sektorového modulu v jámě tokamaku
(zdroj: www.iter.org)

kontrolováno externími mikrovlnnými ohřevy či injektáží neutrálních svazků. V ITERu však vnitřní samoohřev vytvoří silnou vnitřní zpětnou vazbu. Plazma se začne chovat jako komplexní nelineární systém s vlastním autonomním chováním, kde:

- i minimální lokální fluktuace teploty či hustoty může vyvolat lavinovou odezvu v celém objemu plazmatu;
- makroskopické parametry (tlak, proud, magnetická konfigurace) jsou navzájem silně svázány transienčními jevy;
- udržení stability vyžaduje ultra-rychlé diagnostické systémy a korekční magnety reagující v řádu milisekund.

Největší neznámou zůstává anomální transport energie a částic. Ideální plazma by bylo dokonale izolováno uvnitř magnetických ploch, avšak v reálném prostředí vznikají turbulence a nestability. Tyto turbulence fungují jako trhliny v izolaci, kterými uniká teplo ven. Pochopení a potlačení těchto mikroskopických turbulencí je hlavním klíčem k tomu, aby reaktor dosáhl plánovaného desetinásobného energetického zisku ($Q \geq 10$).^[6]

Divertor: energetické rozhraní a nejnamáhanější článek

Ačkoli se většina vědecké pozornosti upírá k samotnému plazmatu, z hlediska provozní spolehlivosti je nejkritičtější subsystémem ITERu divertor. Tato komponenta, umístěná na dně vakuové nádoby, funguje jako jakýsi výfukový systém reaktoru. Jeho úkolem je kontinuálně absorbovat a odvádět obrovské tepelné toky a odčerpávat helium.

Tepelné zatížení, kterému budou desky divertoru vystaveny, dosahuje v ustáleném stavu hodnot až 20 MW/m^2 . Pro srovnání: jedná se o energetický tok, kterému čelí tepelné štíty návratových modulů kosmických lodí při vstupu do atmosféry. Materiál divertoru navíc netrpí pouze tepelným namáháním, ale je permanentně bombardován intenzivním proudem iontů, neutrálních částic a vysokoenergetických neutronů.

Od berylia k wolframu

V původním konstrukčním návrhu ITERu se počítalo s tím, že panely první stěny a divertor budou kombinovat více materiálů. Panely měly být původně potaženy beryliem nebo uhlíkovými

kompozity pro počáteční fáze provozu s čistým vodíkem, přičemž wolfram měl být nasazen až později. Berylium bylo dlouho preferováno, protože jako prvek s nízkým protonovým číslem minimálně znečišťuje a ochlazuje plazma, pokud se jeho atomy odpaří do komory.

Nicméně v průběhu let a na základě klíčových experimentů na britském tokamaku JET padlo strategické rozhodnutí od berylia a uhlíku v divertoru zcela upustit a instalovat hned od počátku divertor kompletně celowolframový.^[8, 9] Důvody pro tuto radikální záměnu byly čistě technologické a ekonomické:

- retence tritia: berylium i uhlík vykazují vysokou schopnost absorbovat a vázat do své struktury okolní vodík. V reálném provozu s radiotoxickým tritiem by tyto materiály fungovaly jako gigantická houba. Reaktor by velmi rychle dosáhl limitů pro maximální povolené množství absorbovaného tritia zadrženého v konstrukci, což by si vynutilo časté odstávky kvůli čištění. Wolfram má oproti tomu retenci tritia řádově nižší;
- materiálová eroze a nízký bod tání: berylium má bod tání pouze kolem

1 287 °C, což je pro extrémní špičkové zatížení v divertoru (např. při nestabilitách typu ELM) naprosto nedostatečné. Docházelo by k masivnímu tavení, odparu a destrukci povrchu. Wolfram s bodem tání přes 3 400 °C těmto teplotním šokům odolává nesrovnatelně lépe.^[8]

Dnes je tedy čistý wolfram definitivní volbou. Nicméně jeho chování v dlouhodobém agresivním prostředí je stále předmětem intenzivního výzkumu. Vlivem cyklického tepelného šoku a bombardování heliovými ionty dochází k povrchové erozi, napěňování wolframu (tvorba křehkého tzv. wolframového „fuzzu“) a vzniku mikrotřlin, které mohou vést až k odlupování materiálu. Pokud se navíc atom wolframu kvůli svému vysokému protonovému číslu dostane hlouběji do horkého jádra plazmatu, funguje jako extrémně silný zářič, který dokáže fúzní reakci bleskově ochladit a zastavit.

Divertor tak představuje absolutní materiálový a technologický limit výkonu celého zařízení. Bez jeho bezchybné funkce a sofistikovaného vodního chlazení pod vysokým tlakem nelze

horké plazma udržet v požadovaném energetickém režimu déle než několik sekund.

Česká stopa ve vývoji kritických komponent pro ITER

Na vývoji těchto kritických komponent se velmi významně podílí Česká republika – konkrétně experimentální zařízení HELCZA (High Energy Load Czech Assembly), které bylo vyvinuto a postaveno v Centru výzkumu Řež.^[10] Byly na něm úspěšně testovány první prototypy panelů první stěny z berylia a následně i wolframové komponenty včetně divertoru. Díky své konstrukci – HELCZA je světově unikátní zařízení z pohledu parametrů tepelného zatěžování i rozměrů vakuové testovací komory – umožňuje testování všech komponent tokamaku v reálných provozních podmínkách.

Kryogenika a globální energetická bilance

Provoz obřích supravodivých magnetů vyžaduje masivní doprovodnou kryogenní infrastrukturu, která nemá obdoby. Kryogenní centrum ITERu je největším centralizovaným systémem na zkapalňování helia na Zemi. Musí distribuovat chladicí výkon do tisíců tun konstrukcí a udržovat je stabilně na provozní teplotě kolem –269 °C.^[11]

Tento systém je kriticky propojen s bezpečnostními funkcemi reaktoru. Největším rizikem je tzv. quench – náhlá lokální ztráta supravodivosti v magnetu (např. v důsledku mikroposunu cívký nebo selhání chlazení). V tom okamžiku se obrovská energie akumulovaná v magnetickém poli začne bleskově měnit na teplo. Kryogenní systém a navazující ochranné obvody musí během několika sekund bezpečně odvést tisíce litrů expandujícího plynného helia a energii magnetů bezpečně disipovat v masivních odporových stanicích, aby nedošlo k explozivnímu zničení cívek.

Tritium: přechod od čistého experimentu k jaderné technologii

Použití tritia jako paliva představuje definitivní krok směrem k realistickému provozu komer-

-čního fúzního reaktoru. Zároveň však tato chemická složka transformuje ITER z čistě elektro-technického a fyzikálního systému na jaderné zařízení se všemi souvisejícími legislativními a bezpečnostními nároky.

Vzhledem k tomu, že tritium má extrémní schopnost permeovat strukturálními materiály, snadno uniká i nejmenšími netěsnostmi a kontaminuje vnitřní povrchy, vyžaduje ITER komplexní, uzavřený palivový cyklus (Tritium Plant).^[12] Ten musí zajistit bezpečné skladování, kontinuální čištění plynné směsi přímo z vakuové nádoby a opětovnou injektáž tritia zpět do plazmatu.

ITER proto bude v pozdějších fázích provozu testovat koncepty tzv. breeding blanketů.^[12, 13] Tyto testovací moduly obsahující lithium budou umístěny na vnitřní stěně reaktoru. Cílem je, aby neutrony unikající z fúzního plazmatu reakcí na lithiu přímo v reaktoru generovaly (množily) nové tritium. Úspěšné otestování této technologie je absolutní podmínkou pro budoucí fúzní energetiku, jelikož budoucí komerční elektrárny musí být v produkci svého vlastního tritiového paliva stoprocentně soběstačné.

Závěr

ITER v současné fázi odkrývá plnou realitu toho, co obnáší zkrocení fúzní energie na průmyslové úrovni. Ukazuje se, že největší překážkou není samotná fyzika plazmatu, ale především materiálové výzvy a inženýrská integrace.

I přes všechny technické i logistické komplikace a nutné revize harmonogramu zůstává ITER zcela klíčovým a nenahraditelným projektem pro další rozvoj fúzních technologií. Bez dat, která toto zařízení poskytne, nelze v budoucnu postavit žádnou ekonomicky udržitelnou fúzní elektrárnu. Úspěch ITERu se nakonec nebude měřit tím, že dosáhne prvního plazmatu a jeho udržení, ale především tím, zda dokáže ověřit inženýrská řešení pro složité multifyzikální problémy, která nebylo dosud možné na jiných experimentálních zařízeních testovat.

↓
Obr. 4: Technologie HELCZA (zdroj: Centrum výzkumu Řež)



Reference

[1] ITER ORGANIZATION. *Aligning building-size components with millimetric precision* [online]. 2021 [cit. 2026-09-04]. Dostupné z: <https://www.iter.org/node/20687/aligning-building-size-components-millimetric-precision>

[2] ITER ORGANIZATION. *Vacuum Vessel* [online]. Saint-Paul-lez-Durance: ITER Organization [cit. 2026-09-04]. Dostupné z: <https://www.iter.org/machine/vacuum-vessel>

[3] KIM, H. et al. Manufacturing Completion of the First ITER Vacuum Vessel Sector. In: *28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2020)*. Vienna: IAEA, 2021.

[4] ITER ORGANIZATION. *Magnets* [online]. Saint-Paul-lez-Durance: ITER Organization [cit. 2026-09-04]. Dostupné z: <https://www.iter.org/machine/magnets>

[5] MITCHELL, N.; DEVRED, A.; LIBEYRE, P. et al. The ITER Magnets: Design and Construction Status. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2012, 22(3).

[6] ITER ORGANIZATION. ITER completes world's largest and most powerful pulsed magnet system [online]. 2025 [cit. 2026-09-04].

[7] ITER ORGANIZATION. *Divertor* [online]. Saint-Paul-lez-Durance: ITER Organization [cit. 2026-09-04]. Dostupné z: <https://www.iter.org/machine/divertor>

[8] ITER ORGANIZATION. *Design review for tungsten divertor shows way ahead* [online]. 2013 [cit. 2026-09-04]. Dostupné z: <https://www.iter.org/node/20687/design-review-tungsten-divertor-shows-way-ahead>

[9] THOMSER, C. et al. Plasma Facing Materials for the JET ITER-Like Wall. *Fusion Science and Technology*. 2012, 62(1).

[10] CENTRUM VÝZKUMU ŘEŽ. *HELCAZ – High Energy Load Czech Assembly* [online]. [cit. 2026-09-04]. Dostupné z: <https://www.helcaz.cz>

[11] ITER ORGANIZATION. *Cryogenics* [online]. Saint-Paul-lez-Durance: ITER Organization [cit. 2026-09-04]. Dostupné z: <https://www.iter.org/machine/supporting-systems/cryogenics>

[12] ITER ORGANIZATION. *Tritium Breeding* [online]. Saint-Paul-lez-Durance: ITER Organization [cit. 2026-09-04]. Dostupné z: <https://www.iter.org/machine/supporting-systems/tritium-breeding>

[13] ITER ORGANIZATION. *Blanket* [online]. Saint-Paul-lez-Durance: ITER Organization [cit. 2026-09-04]. Dostupné z: <https://www.iter.org/machine/blanket>



Ing. Daneš Burket, Ph.D.
danes.burket@cvrez.cz

Po absolvování Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze v roce 1994 pracoval v Jaderné elektrárně Dukovany, kde prošel různými pozicemi až po vedoucího oddělení Reaktorová fyzika. V roce 2007 přešel na centrálu společnosti ČEZ, kde působil jako ředitel sekce Technická podpora a byl kromě jiného zodpovědný za zavádění programů údržby na jaderných i klasických elektrárnách a projekty prodloužení životnosti elektráren Dukovany a Temelín. V letech 2016–2022 vedl sekci Výzkum a vývoj a od roku 2022 je ředitelem úseku Strategie v Centru výzkumu Řež. Od roku 2024 je jednatelem ve společnosti Centrum výzkumu Řež Innovations, zaměřené na transfer výsledků výzkumu a vývoje do průmyslové praxe. Od roku 2026 je členem rady jednatelů Jihočeského jaderného parku. Daneš Burket získal doktorát v oboru jaderné inženýrství, je členem vědecké rady Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze, působil v dozorčí a vědecké radě Výzkumného a zkušebního ústavu Plzeň. Byl členem týmů WANO (World Association of Nuclear Operators) Peer Review v japonské společnosti TEPCO v jaderných elektrárnách Fukušima-Daiiči a Kašivazaki-Kariwa a v čínské jaderné elektrárně Tchien-wan. Od roku 2010 je prezidentem České nukleární společnosti.



What is AMALTO?

AMALTO is a conference on ageing management and long term operation that brings together international experts to discuss the latest approaches to ensuring the safe, reliable and long term operation of nuclear power plants and research reactors. As many facilities worldwide consider operation beyond 60 years, effective ageing management has never been more important. The conference will focus on practical solutions, lessons learned, and emerging strategies that support long term operation, with special emphasis on PWR and VVER reactors as well as the unique needs of research reactors. The Conference is organized by ÚJV Řež in cooperation with the International Atomic Energy Agency.

Conference Topics

- Regulatory framework for ageing management and LTO licensing
- Implementation of ageing management
- Ageing management programmes (AMPs)
- Time Limited Ageing Analyses (TLAAs)
- Inspection, monitoring, and diagnostics
- Operating experience and lessons learned
- Modernization and digitalization
- Economics of ageing management and LTO



ŠKODA JS – sedmdesát let od zahájení jaderného programu ve Škodovce

Ing. Josef Říha, Mgr. Karel Samec
ŠKODA JS a.s.

ŠKODA JS (člen Skupiny ČEZ) vznikla v roce 1956, kdy byly ve Škodě Plzeň zahájeny práce na výstavbě první jaderné elektrárny v tehdejší Československu (Jaslovské Bohunice). K pozici významného evropského výrobce zařízení pro jadernou energetiku se vypracovala především díky skvělé práci několika generací svých zaměstnanců. Vyrobila 21 kompletních reaktorů typu VVER-440 a 3 reaktory typu VVER-1000 pro ČR i zahraničí. Dodávala a dodává inženýring, zařízení a servis pro jaderné elektrárny, výzkumné reaktory a sklady použitého jaderného paliva do řady zemí Evropy, Asie či Ameriky. Nedávno si ji jako svého strategického dodavatele vybral Rolls-Royce SMR pro oblast stěžejních dodávek malých modulárních reaktorů. Za 70 let své existence se ŠKODA JS stala respektovanou silou jaderného strojírenství.

ŠKODA JS (a member of the ČEZ Group) was founded in 1956, when work began at Škoda Plzeň on the construction of the first nuclear power plant in what was then Czechoslovakia (Jaslovské Bohunice). It has established itself as a major European manufacturer of nuclear power equipment primarily thanks to the outstanding work of several generations of its employees. It has manufactured 21 complete VVER-440 reactors and 3 VVER-1000 reactors for the Czech Republic and abroad. ŠKODA JS has supplied and continues to supply engineering, equipment, and services for nuclear power plants, research reactors, and used nuclear fuel storage facilities to numerous countries in Europe, Asia, and the Americas. Rolls-Royce SMR recently selected it as its strategic supplier for key components of small modular reactors. Over the course of its 70-year history, ŠKODA JS has become a respected power of nuclear engineering industry.

↓
Obr. 1: Spodní hrdlový prstenec nádoby reaktoru JE A1 v Jaslovských Bohunicích byl vyráběn svařením dvanácti segmentů obsahujících vykovaná hrdla (1965)

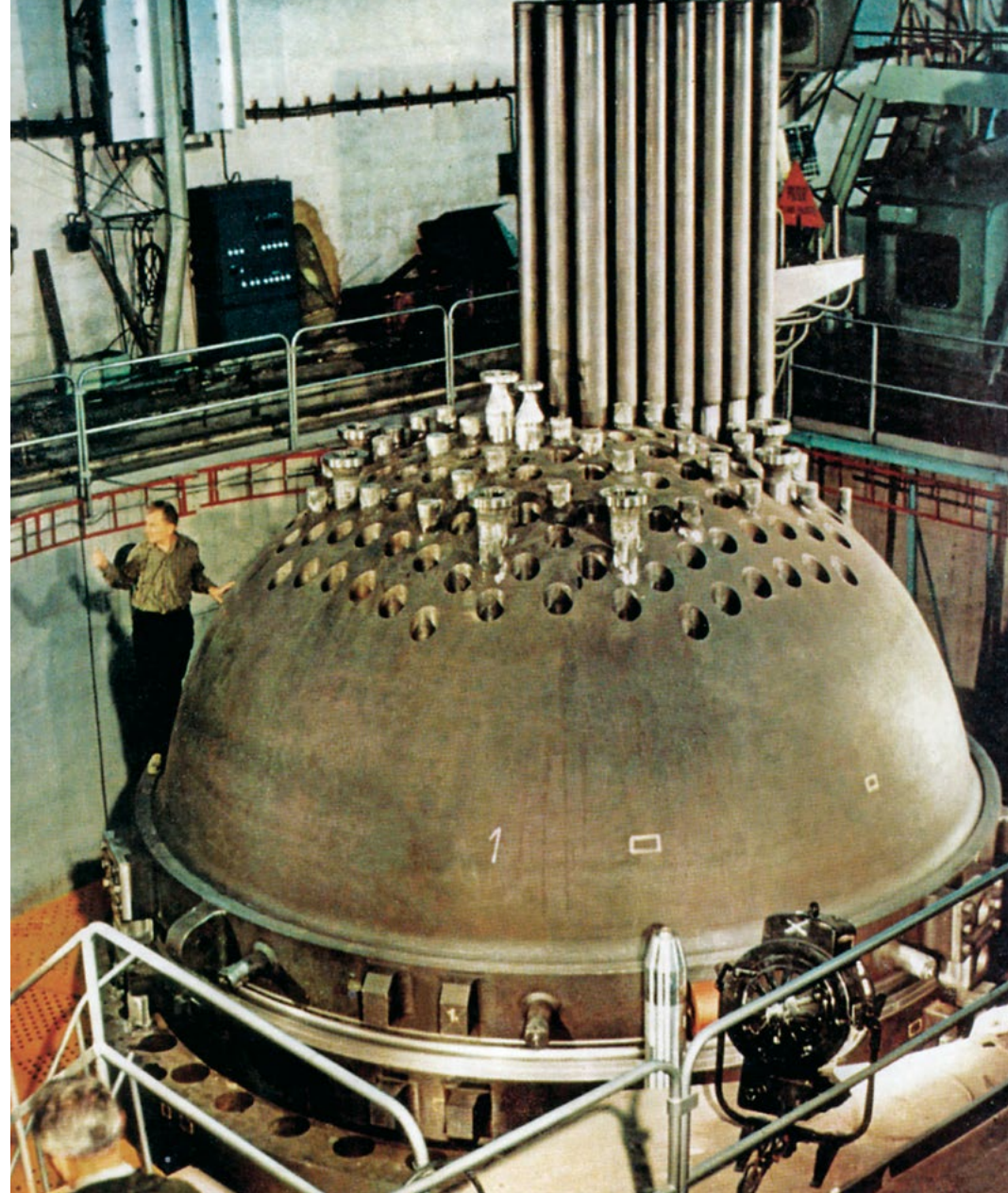


Jádro místo střelnice

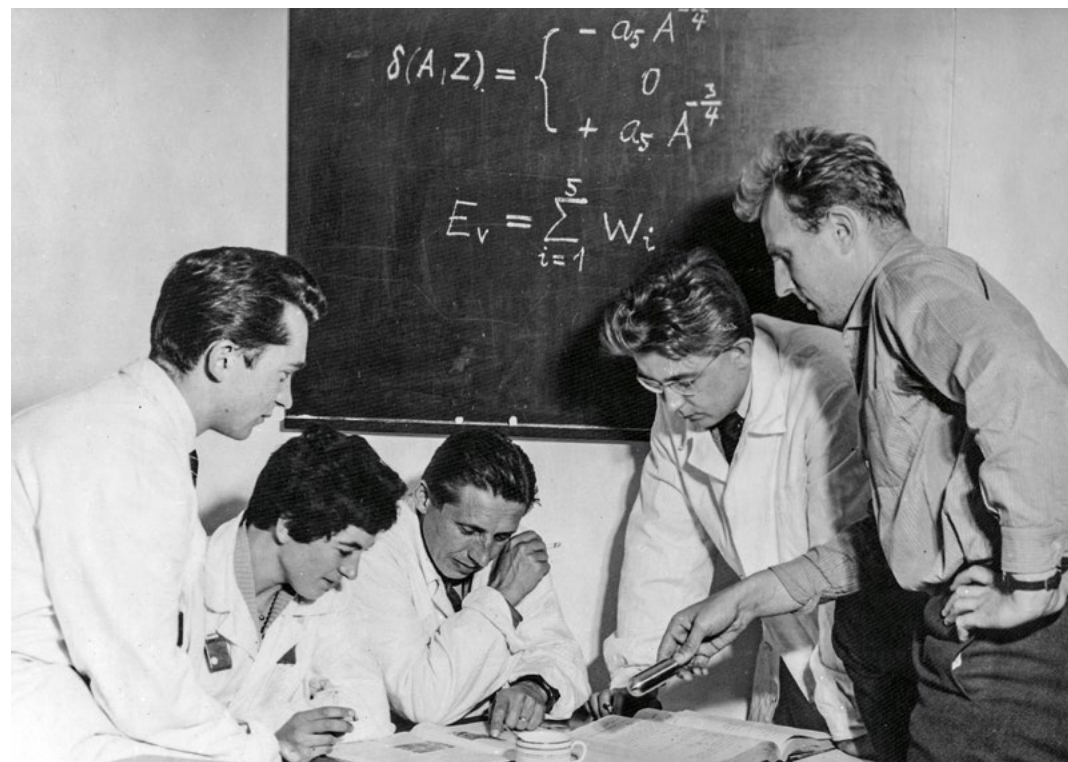
Na přelomu 19. a 20. století hledalo vedení tehdejších Škodových závodů prostory, které by nedaleko Plzně mohly sloužit jako zkušební střelnice pro zbrojní program tehdy největší zbrojovky rakousko-uherské monarchie.

Nakonec bylo vybráno místo, které je dnes sídlem společnosti ŠKODA JS – pozemek zvaný Na Orlíku u Třemošné. V roce 1901 tady byl zahájen provoz tunelové střelnice. V období první světové války byla vybudována muniční továrna, kde pracovalo přes dva tisíce zaměstnanců. Po katastrofálním výbuchu v roce 1917 areál sloužil opět jen jako střelnice. Její význam vzrostl v době protektorátu, kdy Škodovka vyráběla zbraně pro německou armádu. V padesátých letech 20. století začala studená válka a zbrojní výroba byla přesouvána ze západu na východ republiky. V roce 1956 už byla střelnice u Plzně opuštěná a čekala na nové využití.

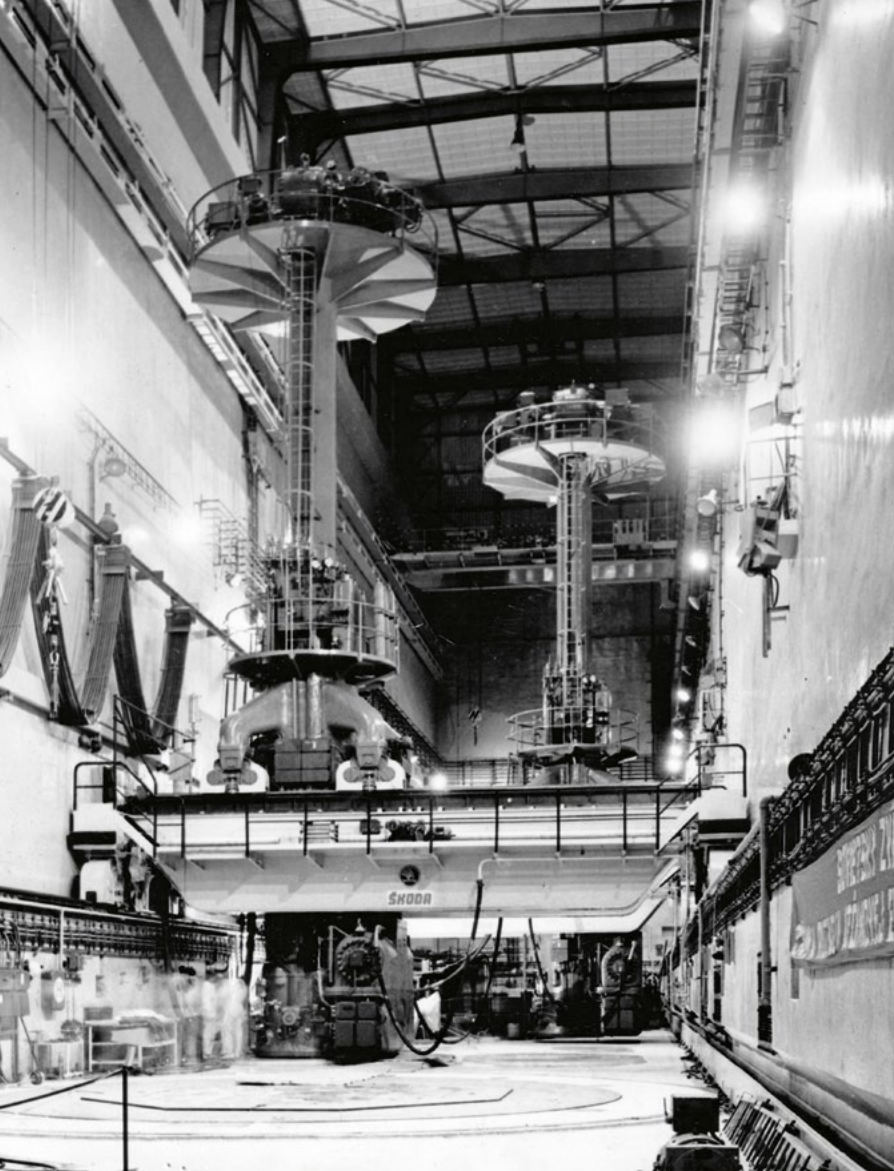
Novodobá historie původního areálu, spojeného se zbrojní výrobou, se začala psát 18. května 1956, kdy byly na základě mezistátní dohody ČSR–SSSR v plzeňském podniku Škoda zahájeny přípravné práce pro výstavbu jaderné elektrárny A1 ve slovenských Jaslovských



←
Obr. 2: Usazování vrchlíku víka na přírubu modelu nádoby reaktoru KS-150 (JE A1_1966)



←
Obr. 3: V roce 1960 byla v areálu Bolevec zahájena výstavba experimentální základny, která umožňovala fyzikální, termohydraulický, materiálový a defektoskopický výzkum. Na snímku z roku 1965 je skupina jaderných fyziků pod vedením Ing. Josefa Kotta, pozdějšího profesora a doktora věd (1932–2021)



Obr. 4: Zavážecí stroj JE A1 sloužil pro výměnu paliva za provozu reaktoru a byl ovládán dálkově z oddělené dozorny. Na společné dráze v reaktorovém sále byly dva zavážecí stroje, druhý stroj sloužil jako záloha (1971)



Obr. 5: Kancelář oddělení Konstrukce v 70. letech dvacátého století

Bohunicích. Od tohoto roku se datuje i historie současné ŠKODA JS, významného evropského výrobce zařízení pro jadernou energetiku a dnes člena Skupiny ČEZ.

Ve Škodovce byla v tomto období založena obchodní skupina pro jadernou oblast – zárodek pozdějšího škodovského jaderného programu. Byla ustavena pracovní skupina konstruktérů pod vedením Josefa Hauera. Škodovka měla zajistit výrobu reaktoru, zařízení hospodářství paliva a převzít funkci generálního dodavatele technologické části. Pro tento záměr byl vybrán ruský projekt reaktoru KS-150 (HWGCR $1 \times 150 \text{ MW}_e$). K zahájení provozu první jaderné elektrárny na území tehdejšího Československa ale ještě vedla dlouhá cesta. Jaslovské Bohunice byly do provozu uvedeny v roce 1972.

Od Škodovky k ČEZ

V letech 1956 až 1993 byl segment jaderné energetiky řazen pod různými názvy do organizační struktury stále stejného vlastníka – plzeň-

ské společnosti Škoda. Tento vztah pokračoval i po její privatizaci v roce 1993. V tomto období byla v roce 1964 zahájena výroba pro jadernou elektrárnu A1 v Jaslovských Bohunicích. V roce 1974 začala výroba komponent pro primární okruh jaderných elektráren typu VVER. V roce 1979 byla zahájena produkce v nové Reaktorové hale a o rok později byla dodána první nádoba reaktoru VVER-440/V213 do jaderné elektrárny Paks v Maďarsku. V letech 1984 až 1987 bylo do provozu uvedeno celkem šest bloků se stejným typem reaktoru v Bohunicích a Dukovanech. Počátkem 90. let byly dodány dva reaktory VVER-1000 pro elektrárnu v Temelíně. Stejný reaktor, původně určený pro bulharskou JE Belene, je dnes v provozu na ruské Kalininské JE/4.

Od roku 1999 firma podniká pod názvem ŠKODA JS a.s. Tehdejší mateřská společnost Škoda Holding v roce 2004 prodala ŠKODA JS ruské strojírenské skupině Power Machines B.V. V roce 2007 převzala firmu ŠKODA JS ruská strojírenská skupina OMZ.

Havárie v Černobylu a ve Fukušimě vedly ke zrušení výstavby nových jaderných bloků na tradičních trzích a k útlumu jaderné ener-



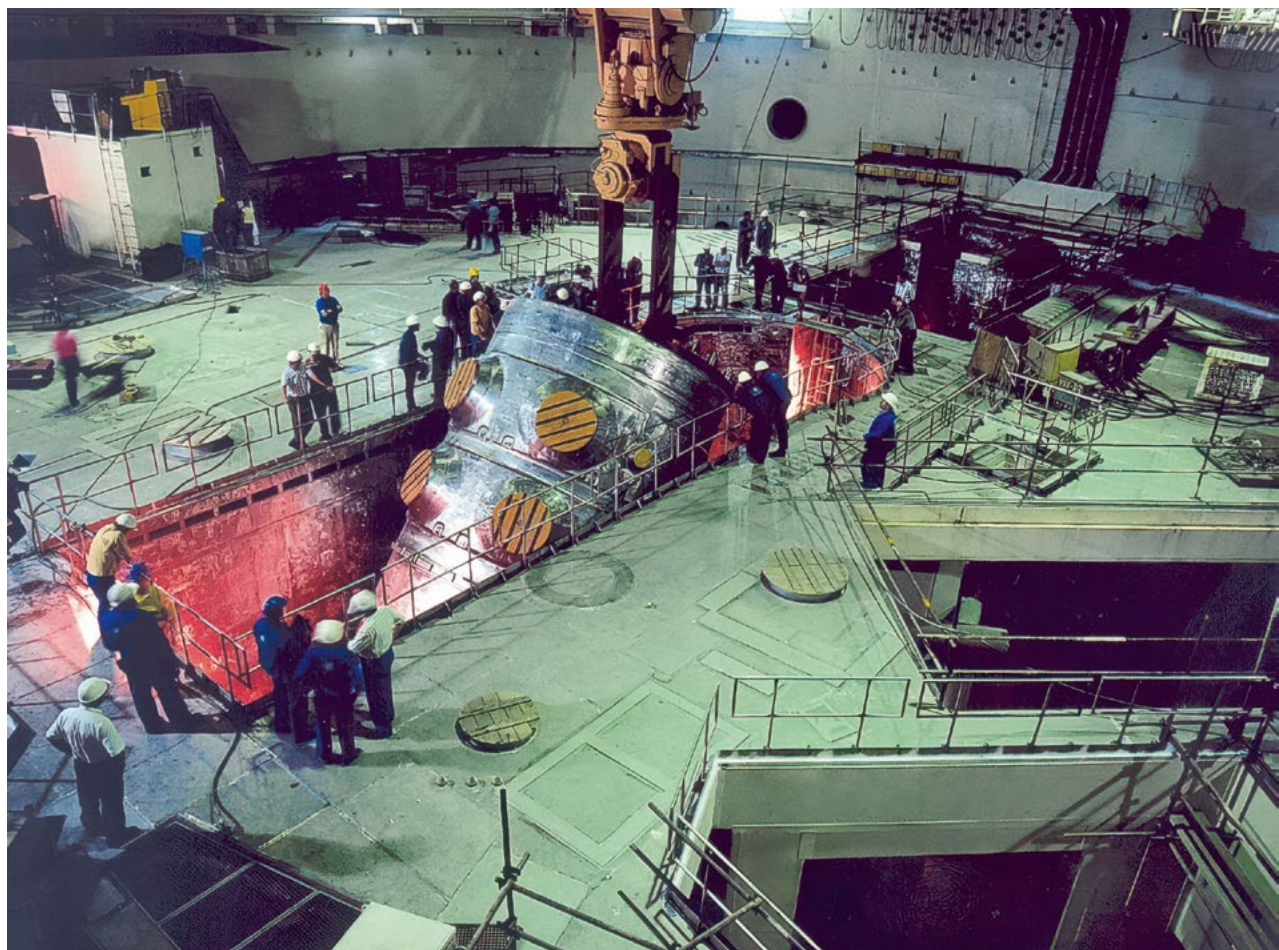
Obr. 6: Manipulace s tlakovou nádobou reaktoru VVER-440 pomocí speciální transportní traverzy během výroby. Československo vyrábělo reaktory tohoto typu nejen pro svoji potřebu, ale také pro maďarské, německé a polské projekty (1985)



Obr. 7: Přeprava první tlakové nádoby reaktoru VVER-1000 z Plzně probíhala postupně po železnici, dálnici a následně z Bratislavy lodí po Dunaji do bulharské lokality Belene (1989)



Obr. 8: Po přepravě transportním koridorem na podvalníku byla 320tunová tlaková nádoba reaktoru VVER-1000 ve vodorovné poloze vyzdvížena polárním jeřábem a uložena na montážní lože v bazénu revize na reaktorovém sále. Následně byla vztyčena do vertikální polohy a ustavena v betonové šachtě reaktoru (JE Temelín, 2. blok, 1995)



Obr. 9: Obnova systému kontroly a řízení čtyř bloků JE Dukovany. Veškeré činnosti byly prováděny během plánovaných odstávek (postupně 2001 až 2018)



Obr. 10: Modernizace zavážecích strojů českých a slovenských jaderných bloků VVER-440 a VVER-1000 byla zaměřena na výměnu systému I&C, elektro a modernizaci mechanických částí

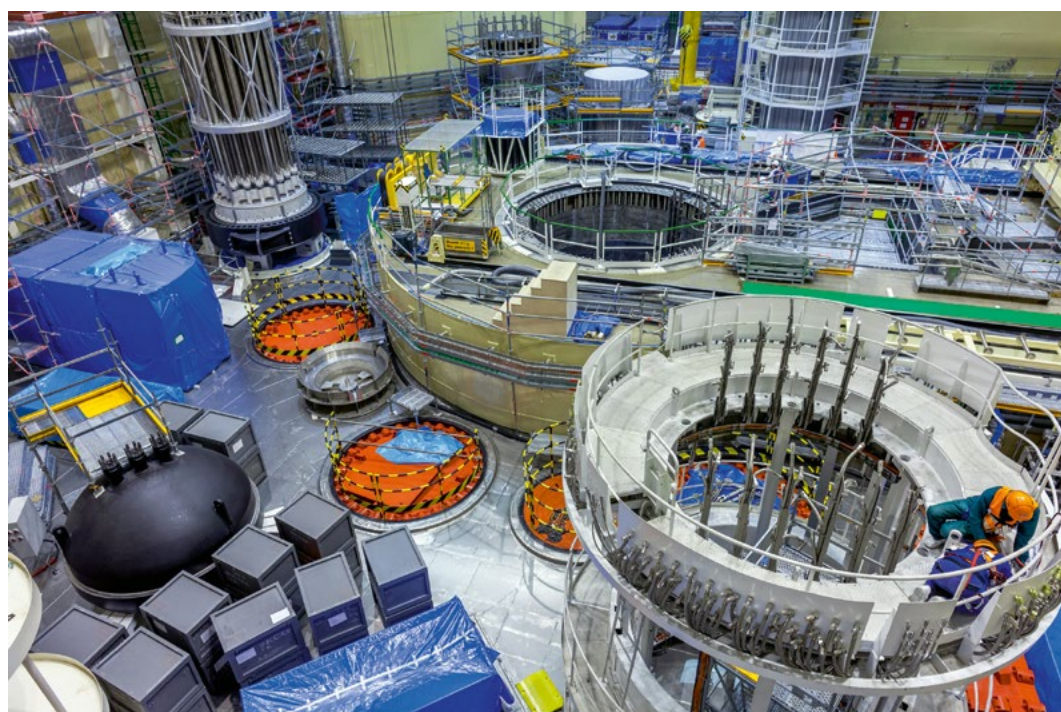
getiky. Na rozdíl od jiných dodavatelů, kteří se stáhli z trhu, dokázala ŠKODA JS překonat nelehké období a vykazovala dobré ekonomické výsledky. Do této etapy ale negativně zasáhla anexe Krymu. ŠKODA JS byla vzhledem k ruskému vlastníkovu zařazena na sankční seznamy, čímž byla znevýhodněna v rámci standardní obchodní soutěže. Situace se ještě více zkomplikovala po zahájení ruské války proti Ukrajině v roce 2022.

Bylo proto důležité, že se rychle podařilo uskutečnit složitou transakci změny vlastníka. Na podzim 2022 započala nová perspektivní etapa v rámci Skupiny ČEZ, která navázala na dlouholeté vztahy v práci pro českou jadernou energetiku. Pozice českého dodavatele

s českým vlastníkem umožnila zrušení sankcí. ŠKODA JS se během sedmi desetiletí své historie stala lídrem v oblasti dodávek českého jaderného průmyslu.

Klíčovým oborem je inženýring

Investiční inženýring ve ŠKODA JS staví na dlouholetých zkušenostech z velkých investičních jaderných projektů napříč Evropou. Divize Inženýring a SKŘ (Systémy kontroly a řízení) zajišťuje řízení projektu, projektování, výpočty a analýzy, plánování, zajištění subdodávek, řízení a koordinaci dodavatelů, řízení montáže, zkoušek, uvádění dodaných celků do provozu a podporu zákazníka během provozu elektrárny. Plný rozsah zmíněných činností je uplatněn



Obr. 11: Instalace zařízení na reaktorovém sále 3. bloku JE Mochovce. Vpředu obslužná plošina horního bloku, v pozadí horní blok a jednotlivé vnitřní části reaktoru (2022)



Obr. 12: Vnitřní šachta aktivní zóny reaktoru EPR (JE Hinkley Point C, 2023 – zveřejněno se souhlasem společnosti Framatome)



Obr. 13: Kontrolní montáž těžkého reflektoru reaktoru EPR (JE Hinkley Point C, 2023 – zveřejněno se souhlasem společnosti Framatome).



v projektech generálních dodávek nebo dodávek vyšších investičních celků. Sem patří především jaderné elektrárny typu VVER, jejichž technologie je ve firmě osvojena a rozvíjena v celém rozsahu životního cyklu projektu.

Od zahájení výstavby první československé jaderné elektrárny A1 v Jaslovských Bohuni-

cích počínaje rokem 1956 následovala dlouhá řada úspěšných velkých investičních projektů. ŠKODA JS dodala formou vyšších dodávek primární část a hospodářství jaderného paliva postupně pro slovenské jaderné elektrárny Bohunice V-2 (2× VVER-440) a Mochovce (2× VVER-440), pro Dukovany (4× VVER-440) a na



přelomu nového tisíciletí také pro JE Temelín (2× VVER-1000).

V roce 2009 se pro 3. a 4. blok JE Mochovce stala hlavním dodavatelem technologie nejdůležitějších částí elektrárny, tj. primárního okruhu, palivového hospodářství a dalších čtyř provozních souborů. Na dokončení obou bloků odvedli a nadále odvádí vynikající práci lidé z další divize ŠKODA JS – divize Slovensko, která vznikla v roce 2019. Sídli v Trnavě, slovenském centru jaderné energetiky, se shodnou vzdáleností do Mochovců i Jaslovských Bohunic, a s dojezdem na maďarskou JE Paks. V roce 2023 byl třetí blok JE Mochovce předán do komerčního provozu. Čtvrtý blok je těsně před dokončením – koncem srpna 2026 byly ukončeny zkoušky v rámci fyzikálního spouštění a začala etapa energetického spouštění.

Zkušenosti z výstavby českých a slovenských jaderných bloků v 80. letech vedly k získání významné zakázky Obnova systému kontroly a řízení (SKŘ) pro JE Dukovany v roce 1999 a následně i její druhé etapy. Výsledkem byla kompletní modernizace SKŘ na všech čtyřech

blocích JE Dukovany, dokončená v roce 2018. Díky tomu firma uspěla v obdobných zakázkách i v zahraničí – v Maďarsku (JE Paks) a Arménii (JE Metsamor).

V letech 1985 až 2018 ŠKODA JS též dodala pět kompletů zavážecích strojů určených pro manipulaci s palivovými soubory a dalším zařízením při výměně paliva pro JE Bohunice, Dukovany, Mochovce a dva komplety pro JE Temelín. Dále mj. rekonstruovala kolejové dráhy zavážecích strojů na všech čtyřech blocích JE Dukovany. Uvedené činnosti nabízí nejen pro bloky VVER, ale i pro reaktory typu PWR, resp. BWR.

Významnou referenci v oblasti inženýringu představovala též výměna separátorů páry na obou blocích elektrárny Temelín. Jednalo se o největší transport zařízení na lokalitu Temelín od doby výstavby jaderných bloků – čtyři pláště separátoru, každý o délce 30 m a výšce 4,5 m.

Výrazná stopa ŠKODA JS je patrná i v oblasti výzkumných reaktorů. Ty se využívají pro testování jaderného paliva, materiálové inženýrství či výrobu radioizotopů pro zdravotnictví. V mi-



Obr. 14: Nová verze pohonů regulačních orgánů PRO-M v uplynulých letech nahradila na všech českých, slovenských, ukrajinských a maďarských jaderných blocích VVER-440 původní pohony s vyčerpanou životností (2022).

→
Obr. 15: Příprava kontejneru ŠKODA 1000/19 pro zaplnění použitým palivem na reaktorovém sále JE Temelín (2019)



nulosti vyvinula a dodala celkem sedm reaktorů vlastní konstrukce. ŠKODA JS také dlouhodobě zajišťuje pro své zákazníky i výpočtové analýzy vyplývající z aktuálních bezpečnostních a servisních požadavků. Divize Inženýring a SKŘ nedávno uspěla ve veřejné soutěži na výměnu 172 nízkonapěťových rozvaděčů a více než 700 rozvaděčových polí v JE Temelín.

Výroba je srdcem společnosti

Divize Jaderné zařízení vyrábí zakázky v provozech Reaktorová hala a Bolevec. Výrobní čin-

nost se stala v roce 1956 základním kamenem dnešní společnosti ŠKODA JS. Druhé dva pilíře – inženýring a servis – se rozvíjely postupně. Reaktorová hala v bývalém hlavním areálu Škodovky byla postavena na konci sedmdesátých let 20. století pro výrobu reaktorů typu VVER. Nosný program v Reaktorové hale dnes tvoří zejména výroba kontejnerů na použité palivo pro JE Dukovany a JE Temelín a další komponenty pro jadernou energetiku včetně např. vnitřních částí reaktoru EPR pro jaderné elektrárny ve Velké Británii. V roce 2025 ŠKODA JS zakou-



←
Obr. 16: Pravidelná údržba sestavy uzlu pojistných ventilů kompenzátoru objemu podle plánu údržby (JE Temelín, 2025)

pila budovu bývalé škodovácké kalírny, která přímo sousedí s Reaktorovou halou. Vyrábět se tady, stejně jako v „Reaktorce“, budou komponenty pro velké jaderné bloky i pro malé modulární reaktory (SMR).

Provoz Bolevec má starší historii, neboť ve zdejším areálu bývala původně střelnice a muniční továrna. Nejstarší halou je Hala 1, kde je dnes dislokováno robotické pracoviště pro laserové svařování a další moderní technologie. Nejmodernějším provozem v areálu Bolevec je strojní hala, která disponuje mnoha CNC obráběcími stroji pro zvládání i těch nejobtížnějších operací na speciálních ocelích. Nosným programem je tady výroba pohonů regulačních orgánů reaktorů VVER.

Současná výroba jaderných zařízení navazuje na bohatou historii společnosti, během které bylo vyrobeno 21 kompletních reaktorů typu VVER-440/V-213 a tři reaktory typu VVER-1000/V-320 pro tuzemské i zahraniční jaderné elektrárny. Klíčovou roli v současném portfoliu stabilně dodávaných produktů si dlouhodobě drží pohony regulačních orgánů (celkem více než 2 600 kusů), které regulují bezpečný provoz nejrůznějších typů reaktorů. ŠKODA JS také nabízí zařízení, které zajišťuje povolení/utaže-

ní přírubových spojů na zmiňovaných typech reaktorů.

Více než třicet let působí ŠKODA JS také na trhu jaderných elektráren typu PWR a BWR. Firma se postupně vypracovala do role kvalifikovaného a respektovaného dodavatele komponent pro jaderné elektrárny v západní Evropě a na Dálném východě. Reaktor EPR představuje nový typ tlakovodního reaktoru. ŠKODA JS uzavřela s francouzským zákazníkem smlouvu na výrobu a dodávku dvou kompletů vnitřních částí reaktoru EPR pro výstavbu JE Hinkley Point C a následně i dvou kompletů pro JE Sizewell C ve Velké Británii. Navazují na předchozí dodávku vnitřních částí reaktoru do finské JE Olkiluoto/3 a čínské JE Taishan/1.

Kontejnery na použité palivo vyrábí společnost již od roku 1994 a zatím jich dodala více než 500. Z komerčního hlediska bylo před čtyřiceti lety správným strategickým rozhodnutím zaměřit se i na vývoj mříží pro skladování použitého jaderného paliva. Nejaderná výroba ve ŠKODA JS je doplňkovým programem společnosti, který většinou zahrnuje výrobu velkých komponent, s nimiž si jiné firmy nedokážou kvůli jejich velikosti nebo omezenému prostoru svých výrobních hal poradit. Týká



Obr. 17: Povolování
přírub nátrubků
vnitroreaktorového
měření teploty
a neutronového toku na
horním bloku reaktoru
(JE Temelín, 2025)



se to např. chemického průmyslu, kam společnost nedávno dodala nádobu reaktoru k výrobě čpavku o průměru 2 m, délce 22 m a váze 160 tun.

Servis prodlužuje provoz jaderných elektráren

Servis jaderných elektráren se ve ŠKODA JS rozvíjel postupně v souladu s požadavky zákazníků. Jedná se o práce v rámci plánovaných odstávek bloků jaderných elektráren, ale i o řadu unikátních oprav, jejichž předpokladem je dlouhodobé a jedinečné know-how údržby, špičková odbornost a zázemí celé společnosti.

Servis jaderných zařízení a péče o ně je velmi specifický a nesmírně komplexní obor jaderného strojírenství. Rozhodující roli zde hrají nové materiály a technologie, moderní pevnostní výpočty metodou konečných prvků a tzv. simulace technologických pochodů, které umožňují optimalizovat zásahy do zařízení a minimalizovat dobu odstávek. Za těmito aktivitami stojí kvalifikovaný tým odborníků včetně projektových inženýrů, montážních a inspekčních specialistů a podpůrných profesí. Dlouhodobé zkušenosti z provozu českých jaderných elektráren umožňují pružně reagovat na nové požadavky zákazníků i měnící se legislativní rámec.

Již v 80. letech se podařilo rozpracovat první technologie oprav dělicí roviny tlakové nádoby reaktoru, závitových hnízd, vnitřních antikorozních návarů a podnávarových oblastí. V roce 2008 byly mezi společnostmi ŠKODA JS a ČEZ podepsány první smlouvy na zajištění komplexní údržby zařízení primárního okruhu čes-

kých jaderných elektráren. Společnost se tak stala generálním dodavatelem v oblasti servisu a převzala pod své řízení také desítky subdodavatelských firem.

Při generální odstávce 1. a 2. bloku JE Mochovce se tým ŠKODA JS v poslední době podílel na projektu „Seismické z odolnění velkých komponent“. Firma nedávno uspěla i ve výběrovém řízení na zajištění servisních prací a dodávek náhradních dílů pro pohony regulačních orgánů jaderné elektrárny Paks v Maďarsku. Podílela se též na modernizaci jediné jaderné elektrárny na jižním Kavkaze – JE Metsamor v Arménii. Další podobné projekty zajišťuje taky ve Finsku nebo na Ukrajině.

V posledních letech byly vyvinuty unikátní postupy prací pro servis komponent primárního okruhu jaderných elektráren typu VVER-440 a VVER-1000. V mnoha případech to jsou jedinečné technologie, které dosud nebyly nikde ve světě použity. ŠKODA JS využívá v této oblasti i 3D tisku.

K 1. červenci 2026 došlo ve Skupině ČEZ (jejíž je ŠKODA JS součástí) k organizační změně. Zaměstnanci divize Servis ŠKODA JS, kteří téměř ze sta procent mají svoje trvalé pracoviště přímo v jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín, přešli do sesterské společnosti ČEZ Energosservis. ŠKODA JS si ale i nadále zachovala své kompetence související se servisem vlastní produkce. I nadále poskytuje technickou podporu všech svých dodávaných produktů, a to včetně jejich záručního a pozáručního servisu. Nezměnila se ani podpora dlouhodobého provozu střeoevropských jaderných elektráren, které jsou zdrojem jejich stabilních tržeb.

Plzeňská firma také usiluje pokrýt svými kompetencemi celý životní cyklus jaderné elektrárny od výroby důležitých součástí, výstavby, modernizace a prodlužování životnosti, dodávek náhradních dílů, údržby až po vyřazování z provozu (tzv. decommissioning).

Od Hauerovy skupiny po ASME a spolupráci s Rolls-Royce

Od května 1956, kdy byla pod vedením Ing. Josefa Hauera vytvořena pracovní skupina, z níž ŠKODA JS vznikla, až do roku 2026, kdy slaví 70 let poctivé práce několika generací lidí, kteří firmu tvořili, získala plzeňská společnost bezpočet cenných referencí. Výrobních, dodavatelských, servisních i vývojových.

Kromě Česka a Slovenska, kde má své kořeny, ŠKODA JS dodávala a dodává inženýring,

zařízení a servis pro jaderné elektrárny, výzkumné reaktory a sklady použitého jaderného paliva do dalších zemí střední a východní Evropy, Skandinávie, Francie, Německa, USA, Rakouska, Finska, Belgie, Velké Británie, Číny, Indie, Ruska či Arménie. Postupně se stala českým lídrem v oblasti výroby a dodávek pro jadernou energetiku.

ŠKODA JS se také nedávno stala strategickým dodavatelem Rolls-Royce SMR pro malé modulární reaktory (SMR) v oblasti stěžejních dodávek jaderného ostrova – tlakové nádoby reaktoru, jeho vnitřních částí a dalších komponent primárního okruhu. Velkou ambicí společnosti je uspět při výstavbě nových jaderných bloků v Dukovanech. Nedávno ŠKODA JS jako první firma ve střední a východní Evropě získala certifikaci dle ASME Code, sekce III. pro ja-



Obr. 18: Kontrolní montáž
horních vnitřních částí
reaktoru EPR (2023 –
zveřejněno se souhlasem
společnosti Framatome)



dernou energetiku, která patří k nejnáročnějším v oboru jaderného průmyslu.

Koncentrace kapacit ŠKODA JS na výrobu stěžejních komponent a zařízení pro jaderné elektrárny a inženýring je logický krok. Celosvětově dochází už nejen k plánování, ale i nastartování výstavby malých modulárních reaktorů i velkých bloků jaderných elektráren. V současnosti je firma v rámci plzeňského regionu jedním z nejatraktivnějších zaměstnavatelů. S ohledem na rozjezd zmiňovaných velkých projektů počítá s dalším personálním posilováním svého týmu o stovky dalších lidí.

Spojení značky ŠKODA JS se sídelním regionem znamená také významnou podporu charitativních, společenských i sportovních aktivit. Firma je dlouhá léta hlavním partnerem extrali-

gových hokejistů HC Škoda Plzeň a mládežnického týmu házené Talent ŠKODA JS Plzeň, líhni nadějí čerstvých mistrů republiky. Patří sem také filmový festival Finále, odborná konference Jaderné dny na ZČU nebo dlouhodobá charitativní spolupráce se zdejší Diakonií Západ či podpora dětí s postižením v Centru Hájek. To je jen malý výčet některých podporovaných projektů. Příběh ŠKODA JS začal skromnou pracovní skupinou. Po sedmi desetiletích se plzeňská firma stala respektovanou silou jaderného strojírenství.

Tento text vychází z knihy autora Josefa Říhy: „70 let silou jaderného strojírenství“, která letos vyšla v plzeňském vydavatelství Starý most.



Mgr. Karel Samec
karel.samec@skoda-js.cz

Po absolvování ZČU v Plzni nastoupil v roce 1994 do Českého rozhlasu Plzeň jako redaktor. V letech 1995–2005 pracoval jako tiskový mluvčí holdingu Škoda Plzeň, kam mj. patřila jako jedna z nejvýznamnějších firem i současná ŠKODA JS. Následně se 20 let věnoval PR komunikaci s médii (včetně projektů krizové komunikace) mj. i pro řadu průmyslových klientů např. Wikov Industry, ČKD Group nebo Motorpal v rámci aktivit agentury Svengali Communications, kde působí na pozici managing partnera. V roce 2024 se do jedné z firem někdejší plzeňské Škodovky vrátil jako tiskový mluvčí ŠKODA JS a následně se stal i mluvčím jejího současného majitele Skupiny ČEZ pro západní Čechy (Plzeňský a Karlovarský kraj). V době působení ve Škodě Plzeň jej novináři zvolili tiskovým mluvčím roku.



Ing. Josef Říha
josef.riha@skoda-js.cz

Po absolvování Fakulty strojní v oboru Jaderné energetické stroje a zařízení v Plzni (1972) nastoupil do jaderné divize společnosti Škoda Plzeň, dnes ŠKODA JS a.s. Působil v projekci, konstrukční přípravě montáží, strategii a marketingu. Podílel se na přípravě montáže zařízení primárního okruhu a hospodářství paliva českých a slovenských jaderných elektráren, později přispěl k etablování společnosti na trhu zařízení pro jaderné elektrárny s reaktory typu PWR a BWR. Po odchodu do důchodu nadále spolupracuje se společností v oblasti business developmentu.



Od projekčních prací po decommissioning

inženýring výroba servis



Jsme strategickým partnerem velkých investičních projektů v jaderné energetice.

Jsme silou jaderného strojírenství

f in www.skoda-js.cz



Příprava, přezkušování a vydávání licencí pro provozní personál

Ze vzpomínek Zdeňka Kříže, díl sedmnáctý

Význam lidského faktoru pro jadernou bezpečnost byl potvrzen a zdůrazněn vydáním zákona č. 28/1984 Sb., O státním dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení. Lidský faktor se objevuje nejen v definici jaderné bezpečnosti v zákoně, ale zejména v paragrafu 8, který je personálu věnován a který stanovil základní požadavky na přípravu a ověřování zvláštní odborné způsobilosti provozního personálu. Kontrolní role byla svěřena ČSKAE, což znamenalo novou kompetenci pro činnost dozoru.

Vzhledem k tomu, že první bloky jaderných elektráren byly uvedeny do provozu v 70. letech, bylo nutno tuto kontrolní činnost zahájit již dříve. Tohoto úkolu se ujal resort energetiky – FMPE, který zřídil Resortní zkušební komisi (RZK) a při VÚJE Resortní školicí a výcvikové středisko (RŠVS) pro přípravu provozního personálu JE. Dozor se sice těchto aktivit účastnil, ale protože v té době neměl pro tuto činnost kompetenci, pouze v roli pozorovatele nebo poradce. Zároveň sbíral potřebné zkušenosti pro budoucí období. V roce 1983, posledním roce své činnosti, se RZK sešla celkem sedmkrát a předstoupilo před ní cca 100 uchazečů nejen z jaderných elektráren v Jaslovských Bohunicích a Dukovanech, ale i ze školicího střediska VÚJE a Škody Plzeň, které připravovaly a realizovaly spouštění bloků. Úspěšnost uchazečů byla okolo 80 %, což ukazuje na její náročnost. Možno konstatovat, že celkově systém fungoval uspokojivě.

V rámci příprav na převzetí kompetence v oblasti personálu uskutečnil dozor ČSKAE řadu jednání s RŠVS v Trnavě s cílem navázat na tuto činnost a dále ji rozvíjet a zkvalitnit. V zájmu zlepšení podmínek pro doškolení provozního personálu a provádění protiporuchových cvičení na JE V-1 dozor ČSKAE v té době

plně podpořil zavedení páté provozní směny na našich jaderných elektrárnách. To zajistilo předpoklady pro to, aby cvičení personálu byla pravidelná a dobře zajištěná a provozní personál měl na přípravu dost času.

Dozor akceptoval již existující definici kategorie vybraných pracovníků jaderných zařízení. Tato kategorie byla definována jako „pracovníci jaderných zařízení, kteří mají bezprostřední (přímý) vliv na jadernou bezpečnost“. Jedná se o pracovníky blokové dozory, tj. vedoucí směny, vedoucí reaktorového bloku, operátor primárního okruhu a operátor sekundárního okruhu. Na základě zkušeností ze spouštění byla tato kategorie rozšířena o funkci kontrolního fyzika, která je důležitá při spouštění bloku a nestandardních nebo rizikových manipulacích v aktivní zóně reaktoru. V případě výzkumných reaktorů se jedná o funkce vedoucího směny, operátora reaktoru a kontrolního fyzika.

Po vydání zákona č. 28 Resortní komise FMPE ukončila svoji činnost na konci roku 1984. K 1. 1. 1985 byla na základě usnesení vlády č. 188 z října 1984 jmenována předsedou ČSKAE Státní zkušební komise (státní komise) pro přípravu o ověřování zvláštní odborné způsobilosti a znalostí vybraných pracovníků jaderných zařízení. Byl připraven statut státní komise a ob-

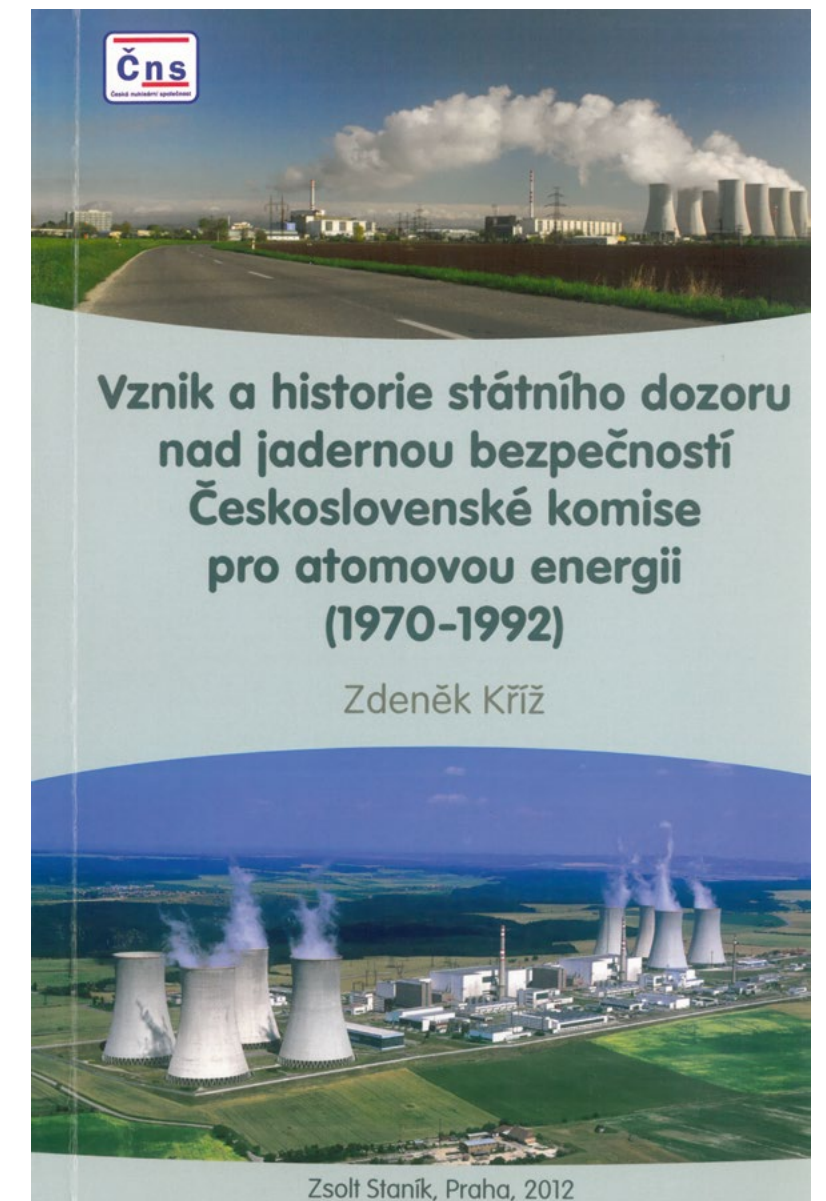
sah a statut státní zkoušky. Státní zkouška měla tři části: písemnou, ústní a praktickou. Pro písemnou a ústní část zkoušky bylo třeba rozšířit banku zkušebních otázek. S cílem dosažení vysoké kvality a dostatečného počtu zkušebních otázek uzavřela ČSKAE asi sto smluv o provedení práce pro jejich zpracování s odbornými pracovníky jaderných elektráren, školicího střediska v Trnavě i dalších organizací. Důležité bylo, že pro smlouvy na zpracování zkušebních otázek zajistil úsek hlavního inspektora ČSKAE dostatečné finanční prostředky. Praktická část zkoušky probíhala cca čtyři týdny, kdy uchazeč o oprávnění prováděl manipulace pod dohledem zkušeného instruktora. Instruktor pak vyhodnotil písemně jeho počínání, což bylo rovněž součástí výsledku státní zkoušky.

Předsedou státní komise byl jmenován Václav Marek, vedoucí odboru provozu FMPE, a sekretářem Pavel Kovář, inspektor ČSKAE, který se na tuto činnost v ČSKAE plně zaměřil a dlouhodobě jí úspěšně vykonával. Členy SZK byli jmenováni nejzkušenější pracovníci jaderných elektráren V-1, později V-2 a Dukovany, VÚJE, RŠVS Trnava a výzkumných jaderných zařízení. Celkem bylo do čtyř zkušebních subkomisí (V-1, V-2, EDU, výzkumné reaktory) jmenováno 48 zkušebních komisařů.

První plenární zasedání SZK, které se konalo 26. 2. 1985, projednalo a schválilo:

- Směrnici ČSKAE č. 1/1985, která stanovuje způsob, lhůty a podmínky ověřování zvláštní odborné způsobilosti vybraných pracovníků jaderných zařízení včetně vydávání a odnímání oprávnění k jejich činnosti (licence)
- Statut státní zkušební komise a státní zkoušky
- Formuláře přihlášky ke státní zkoušce a Oprávnění k činnosti.

Tím byly vytvořeny základní předpoklady k zahájení činnosti SZK a řízení celého procesu pro vydávání, obnovování a odnímání oprávnění (licencí) pro vybrané pracovníky. Na zmíněném zasedání Školicí středisko v Trnavě předložilo návrh dokumentu Požadavky na státní



zkoušku pracovníků a testy pro ověření jejich vědomostí. To byl základ pro další tvorbu zkušebních otázek a testů pro jednotlivá jaderná zařízení. Školicí středisko v Trnavě sehrálo v této fázi klíčovou roli.

Další zasedání státní komise měla převážně zkušební charakter, i když na počátku byla také věnována praktickým a koncepčním otázkám činnosti komise. Na počátku činnosti státní komise se ukázalo, že byla poněkud podceněna otázka vlastní náplně státní zkoušky. Bylo to způsobeno tím, že státní komise pozměnila dřívější způsob a obsah státní zkoušky s cílem zvýšit její náročnost a objektivnost. Formulář při-

↑
Obr. 1: Kniha Zdeňka Kříže, Vznik a historie státního dozoru nad jadernou bezpečností Československé komise pro atomovou energii (1970–1992)

hlášky pro státní zkoušku obsahoval požadavek na vzdělání uchazeče, hodnocení výsledků jeho školení ve školicím středisku a rovněž potvrzení o zdravotním stavu a výsledky psychologického vyšetření. Na rozdíl od západních zemí byla stanovena pro vybrané pracovníky podmínka vysokoškolského vzdělání technického směru. Díky tomu má náš provozní personál lepší předpoklady pro řešení nestandardních situací, neboť jeho technické znalosti jsou hlubší. Kromě dobrého zdravotního stavu byl zaveden požadavek psychologického vyšetření uchazečů. To mělo vyloučit možnost psychického selhání a zajistit vyšší odolnost vybraných pracovníků na psychickou zátěž. Do doby, než byly zavedeny objektivní standardy pro psychologická vyšetření, docházelo v této oblasti k problémům s úspěšností uchazečů.

Dále bylo třeba taxativně a přesněji stanovit význam termínu zvláštní odborná způsobilost uchazeče. Po konzultaci s provozovateli bylo nakonec stanoveno, že se to týká, kromě technických znalostí kandidáta získaných při výuce, komplexní znalosti asi dvaceti nejdůležitějších provozních předpisů, které byly rovněž náplní obsahu zkušebních otázek.

Vydané oprávnění (licenci) bylo nutné obnovit po dvou letech práce v dané funkci, případně mohl provozovatel navrhnout uchazeče na základě výběrných pracovních výsledků na vyšší pracovní funkci. Později, na základě získaných zkušeností, bylo možné požadovat platnost oprávnění na delší dobu, maximálně 6 let.

V tomto případě musel uchazeč splnit následující podmínky:

- výborné pracovní výsledky v předchozím období,
- výborné výsledky státní zkoušky.

Žádost o delší platnost oprávnění, než dva roky musela být uvedena v přihlášce před státní zkouškou. To umožnilo diferencovat mezi vybranými pracovníky, a navíc to částečně snižovalo narůstající pracovní zatížení státní zkušební komise.

Dalším úkolem dozoru, který vyplýval ze zákona č. 28, bylo udělování a odnímání oprávnění organizacím pro přípravu vybraných pra-

covníků tzv. akreditace školicích pracovišť. Tomu předcházelo posouzení kvalifikace školicích lektorů, obsahu přednášek výukových předmětů a technického vybavení školicího pracoviště. Na základě toho vydal dozor ČSKAE na počátku roku 1985 rozhodnutí, kterým akreditoval Resortní školicí a výcvikové středisko v Trnavě, ÚJV Řež a Škoda Plzeň k výcviku vybraných pracovníků.

V počátečním období probíhala veškerá školení a příprava vybraných pracovníků JE v resortním školicím středisku v Trnavě a na školicí elektrárně v Jaslovských Bohunicích, což bylo organizačně a ekonomicky náročné. V červnu 1985 byla státní komise informována o připravenosti JE Dukovany plnit funkci školicí elektrárny a o zřízení a vybavení Resortního školicího a výcvikového střediska v Brně. Na základě posouzení žádostí a přiložené dokumentace a kontroly na místě bylo žádosti v polovině roku 1985 vyhověno. Tato skutečnost příznivě ovlivnila další vývoj v oblasti přípravy personálu a rovnoměrně zatížila obě školicí střediska v Trnavě a v Brně.

První rok činnosti státní zkušební komise – 1985 – byl náročný. Díky pracovnímu nasazení všech zúčastněných se podařilo všechny úkoly splnit. Od té doby pracovala státní komise ve standardním režimu a měla ročně v různých subkomisích 10–15 zasedání ročně. Trvale pokračovaly práce na doplňování a zkvalitňování banky zkušebních otázek (zejména fyzika reaktoru, jaderná bezpečnost). V počátečním období státní komise musela provádět tzv. rekvalifikaci vybraných pracovníků z bloků V-230 na novější V-213, kteří přecházeli na tyto bloky. Od roku 1986 se začaly objevovat žádosti o povolení výjimky ze Směrnice ČSKAE č. 1/1985, týkající se zachování posloupnosti funkcí. Dodržování stanovené posloupnosti funkcí: operátor sekundáru – operátor primáru – vedoucí reaktorového bloku – směnový inženýr, po dvou letech jejich úspěšného vykonávání, provozovatele poněkud omezovala. Tuto posloupnost pochopitelně není možné zajistit pouze na začátku spouštění prvního bloku na lokalitě, kdy kandidáti s nejlepšími výsledky nastupovali na nejvyšší pozice. Státní komise doporučila ten-

to návrh podrobně posoudit a případně změnit ustanovení Směrnice ČSKAE. Upozornila, že však v žádném případě by tato změna neměla negativně ovlivnit jadernou bezpečnost. Na druhé straně by to mohlo provozovateli umožnit určitou flexibilitu v přípravě a využití vybraných pracovníků. Počet uchazečů přihlášených ke zkouškám (poprvé nebo opakovaně) postupně rostl tak, jak narůstal počet provozovaných bloků v Jaslovských Bohunicích a Dukovanech. V období 1985–1989 přezkoušela státní komise celkem 714 kandidátů, což ukazuje její velké pracovní vytížení.

Na začátku každého roku měla SZK tzv. plenární zasedání, na kterém byla zhodnocena její činnost v uplynulém roce. Trvalými aktivitami SZK bylo doplňování zkušebních otázek, změny v jejím složení a analýza příčin neúspěšnosti kandidátů, která se dlouhodobě pohybova-

la okolo 15 %. Ve zcela výjimečných případech se dokonce stalo, že uchazeč byl natolik nepřipraven nebo indisponován, že nejen svoje oprávnění neobhájil, ale v důsledku závažných neznalostí mu bylo odejmuto. S pokračující výstavbou JE v Mochovicích byla v roce 1987 jmenována zkušební sekce státní komise pro tuto lokalitu. V témže roce byla zahájena příprava novelizace směrnice ČSKAE č. 1/1985. Do nové vyhlášky ČSKAE č. 191/1989 Sb. /34/, která nahradila původní Směrnici ČSKAE z roku 1985, byly zapracovány zkušenosti z pětiletého působení státní komise.

S ohledem na nárůst činnosti dozoru ČSKAE v oblasti personálu a schválení jeho personálního posílení v usnesení PV č. 56/1987 byla tato oblast v úseku hlavního inspektora ČSKAE posílena o jednoho pracovníka.



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 Řež), 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.

Dukovany míří k 80 letům provozu

Zdroj: ČEZ, a. s., foto Michal Šafránek

Ministerstvo průmyslu a obchodu aktualizuje dlouhodobou energetickou strategii. Kvůli očekávanému růstu spotřeby, digitalizaci, rozvoji umělé inteligence a elektrifikaci průmyslu bude Česko potřebovat více stabilních nízkoemisních zdrojů. Vedle výstavby nových bezemisních kapacit proto počítá i s prodloužením provozu Jaderné elektrárny Dukovany až na 80 let.

„Provoz Dukovan až na 80 let není náhradou za nové bloky, ale jejich logickým doplněním v rámci české energetické strategie. Česká republika má v jaderné energetice mimořádné know-how a naše elektrárny umíme provozovat bezpečně, efektivně a s vysokou mírou spolehlivosti. Současně to ale nic nemění na nutnosti pokračovat ve výstavbě nových jaderných zdrojů a v přípravě malých modulárních reaktorů,“ říká ministr průmyslu a obchodu Karel Havlíček.

Modernizace, do níž jaderné elektrárny ročně investují kolem 7 miliard korun, má významné technologické přínosy i dlouhodobé zakázky pro český průmysl. Díky tomu si udržuje a rozví-

se přesvědčujeme, že jsou ve výborné kondici. Aktuální ekonomické a bezpečnostní analýzy nám potvrzují, že bude možné Dukovany provozovat déle. Osmdesátiletý provoz začíná být trendem i ve světě a řada bloků už má licenci na 80 let provozu. Vidíme to jako reálné i u nás, samozřejmě za předpokladu pravidelného vyhodnocování stavu zařízení a bezpečnosti provozu,“ uvedl generální ředitel Daniel Beneš.

Podle předsedy Státního úřadu pro jadernou bezpečnost Štěpána Kochánka není životnost elektráren dána počtem let, ale technickým stavem zařízení. „Prodloužení provozu je možné jen tehdy, pokud provozovatel prokáže, že zařízení splňuje všechny bezpečnostní požadavky, má zvládnuté řízení stárnutí zařízení a technický stav odpovídá současným standardům, a současně má potřebné personální zdroje na zajištění dalšího provozu. My budeme vždy velmi přísně a detailně posuzovat každý krok a každé předložené hodnocení,“ doplňuje předseda SÚJB.



jí špičkové know-how konkurenceschopné také na mezinárodních trzích.

„Naše jaderné elektrárny jsme dosud plánovali provozovat přibližně 60 let a každý den

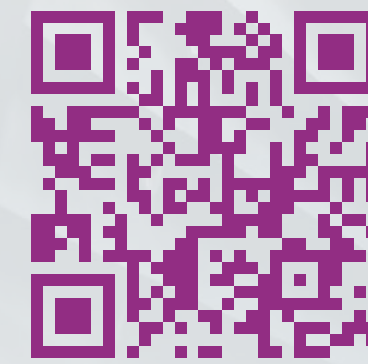
Dukovanské bloky byly spuštěny v letech 1985 až 1987. Jejich výkon se díky modernizacím zvýšil z původních 440 MW na 512 MW.

KONFERENCE SRNÍ Životnost komponent energetických zařízení

13.–15. 10. 2026

15+ tematických oblastí, odborníci z praxe
a neformální networking

Více informací a registrace:



www.konferencesrni.cz



Partnerství Rolls-Royce SMR se rozšiřuje na další lokality v České republice

Zdroj: Rolls-Royce SMR a Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky

Společnosti Rolls-Royce SMR, ČEZ a Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky podepsaly v Londýně memorandum o porozumění, které umožní zahájit přípravné práce na dvou dalších lokalitách pro výstavbu malých modulárních reaktorů.

Rolls-Royce SMR a ČEZ již spolupracují na přípravě prvního SMR v lokalitě Temelín. Nově podepsaná dohoda umožňuje zahájit přípravné práce také v lokalitách Tušimice v Ústeckém kraji a Dětmárovice v Moravskoslezském kraji.

„Jsme nadšeni, že můžeme pracovat již na třech lokalitách, což nám otevírá cestu k výstavbě nejméně šesti reaktorů Rolls-Royce SMR a zároveň vytváří základ pro výrobu 3 GW

čisté a bezpečné elektřiny v České republice. Tato dohoda navazuje na silnou dynamiku našeho partnerství se společností ČEZ a přibližuje nás k nasazení celé flotily reaktorů na jednom z nejvýznamnějších evropských trhů pro SMR,“ uvedl generální ředitel Rolls-Royce SMR Chris Cholerton.

ČEZ uzavřel strategické partnerství se společností Rolls-Royce SMR v roce 2024. Díky němu se přímo podílí na vývoji a přípravě technologie malých modulárních reaktorů. Současně získal přibližně dvacetiprocentní podíl v britské společnosti a je tak strategickým investorem s významnými právy.



all•for power₂₀₂₆

conference & exhibition

energetické investiční a technologické celky:

jaderné elektrárny, klasické elektrárny, teplárny, průmyslová energetika
vývoj česko-slovenské energetiky v celosvětovém kontextu
export investičních celků, zahraniční příležitosti

1. - 2. 12. 2026

Clarion Congress Hotel Prague, Freyova 33, Praha



www.afpc2026.com

Organizátor:

AFPoweragency

SÚJB schválilo nové palivo pro Temelín

Zdroj: SÚJB, ČEZ, Westinghouse

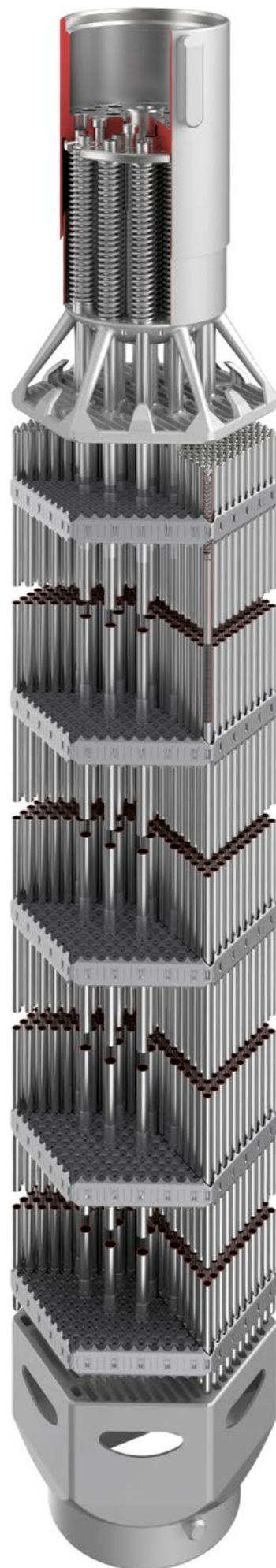
Státní úřad pro jadernou bezpečnost vydal dne 31. 8. 2026 kladné rozhodnutí č. j. SÚJB/ORFBA/15952/2026, kterým povolil společnosti ČEZ použití paliva RWFA-T od společnosti Westinghouse Electric Sweden AB v Jaderné elektrárně Temelín.

Povolení přichází po několikaletém procesu příprav, testování a bezpečnostních analýz. „Jde o další důležitý krok v posilování energetické bezpečnosti České republiky a diverzifikaci dodavatelů jaderného paliva. Navíc platí, že držíme v obou našich jaderných elektrárnách i jeho strategické zásoby,“ říká předseda představenstva a generální ředitel Skupiny ČEZ Daniel Beneš.

ČEZ dlouhodobě rozšiřuje portfolio dodavatelů jaderného paliva. Vedle společnosti Westinghouse, která již dodala první soubory pro Dukovany, má pro Temelín smlouvu také s francouzskou společností Framatome. Tím posiluje nezávislost na jediném dodavateli a odolnost české energetiky.

Nové palivo není pro temelínské energetiky neznámé. Elektrárna v minulosti úspěšně otestovala několik zkušebních palivových souborů Westinghouse přímo v reaktoru a navázala tak na zkušenosti z obdobných zahraničních elektráren. Součástí schvalovacího procesu bylo detailní bezpečnostní hodnocení. Odborníci téměř dva roky posuzovali chování paliva při provozu, jeho kompatibilitu s reaktorem i způsob manipulace a skladování.

Palivové soubory Westinghouse jsou již v areálu elektrárny a po převzetí prošly kontrolami potvrzujícími jejich technický stav a splnění bezpečnostních požadavků. „První zavezení nového paliva plánujeme ještě letos při plánované odstávce prvního temelínského bloku. A zároveň navážeme přípravou licencování i pro dukovanské palivové soubory,“ dodává člen představenstva a ředitel divize jaderná energetika Bohdan Zronek.



CORE | 2026

12th November 2026

ÚJV Řež Conference Centre

The third annual international conference dedicated to advanced research, development, and innovation in the energy sector and beyond. This year's conference will focus on the importance of zero-power research reactors for obtaining nuclear data and refining computational codes for reactor physics, nuclear medicine and other related fields for which nuclear data are crucial. The conference also aims to showcase potential applications of the CICRR (Czech International Centre of Research Reactors) infrastructure across academic and industrial fields. The CORE 2026 conference is a continuation of the successful SUSEN conference, which has been organized by the Research Centre Řež since 2018.



www.coreconference.cz



CICRR

Czech International Centre
of Research Reactors



CVŘ

Centrum
výzkumu Řež



NUCLEAR
RESEARCH
INSTITUTE



Czech Nuclear
Society

Opustil nás Ing. Zdeněk Kříž

Autor: Miroslav Hrehor

31. srpna 2026 zemřel ve věku 85 let dlouholetý pracovník ÚJV Řež a Centra výzkumu Řež Ing. Zdeněk Kříž.

Ing. Z. Kříž byl absolventem Fakulty technické a jaderné fyziky ČVUT (pozdější Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské, FJFI), kterou ukončil v roce 1964. V letech 1964–1970 pracoval v Ústavu jaderného výzkumu v Řeži, kde se zapojil do řešení problémů reaktorové fyziky Jaderné elektrárny A-1 v Jaslovských Bohunicích.

V ÚJV působil do roku 1970, kdy přešel do nově vznikajícího kolektivu státního dozoru nad jadernou bezpečností v Odboru jaderné bezpečnosti a záruk Československé komise pro atomovou energii (ČSKAE). Zde zahájil společně s Ing. Jiřím Beránkem, v návaznosti na dokončování Jaderné elektrárny A-1 a zahájení výstavby Jaderné elektrárny V-1, formování prvních základů státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení. Byl spolutvůrcem prvních obecně závazných právních předpisů v oblasti jaderné bezpečnosti v bývalém Československu, včetně zákona č. 28/1984 Sb., o státním dozoru nad jadernou bezpečností. V ČSKAE postupně zastával řadu funkcí a v roce 1989 byl jmenován náměstkem předsedy Československé komise pro atomovou energii a hlavním inspektorem jaderné bezpečnosti.

V letech 1993–2000 pracoval v Mezinárodní agentuře pro atomovou energii ve Vídni v divizi jaderné bezpečnosti. Po návratu vykonával funkci vedoucího vědeckého sekretariátu ÚJV Řež. V letech 2001–2010 byl předsedou poradního orgánu pro jadernou bezpečnost předsedkyně SÚJB Ing. Dany Drábové. Profesionální dráhu ukončil v roce 2020 odchodem do důchodu.



Své celoživotní zkušenosti, vzpomínky a fakta o budování jaderného dozoru v letech 1970–1992 detailně shrnul v jedinečné knize *Vznik a historie státního dozoru nad jadernou bezpečností Československé komise pro atomovou energii*.

S odchodem Ing. Zdeňka Kříže ztrácí česká nukleární komunita nejen mimořádného odborníka, ale také inspirativního mentora, který svou celoživotní práci zasvětil jaderné bezpečnosti. Jeho odchod znamená ztrátu jedné z významných osobností, které formovaly moderní standardy jaderné bezpečnosti v naší zemi. Na jejich základech dodnes stojí vysoké mezinárodní renomé i bezpečnost českých jaderných zařízení.

Čest jeho památce.



Jaderné muzeum

Přístroje pro měření ionizujícího záření, vývoj a výroba radiofarmak i zpracování radioaktivních odpadů. To vše jen pár kilometrů od Prahy, v autentickém jaderném areálu, který je veřejnosti běžně nepřístupný.

70

let historie

250+

exponátů

±30

minut z Prahy

Tři části expozice

Materiálový výzkum a výroba radiofarmak

Materiálový výzkum patří k dlouhodobým klíčovým aktivitám ÚJV Řež. Zaměřuje se na vývoj, testování a hodnocení materiálů pro jadernou energetiku, průmyslové aplikace i výzkum nových technologií. Ve sbírce muzea proto najdete světelné mikroskopy, zařízení pro mechanické zkoušky, přístroje pro ultrazvukové a rentgenové kontroly, ukázky metalografických rozborů i řadu dalších exponátů. ÚJV Řež je největší český výrobce radiofarmak a svými přípravky zásobuje všechna pracoviště nukleární medicíny v zemi. Výroba radiofarmak je náročný a přísně kontrolovaný proces, který probíhá ve speciálně projektovaných laboratořích. V expozici se dozvíte, jak se u nás obor nukleární medicíny vyvíjel, jak dnes taková výroba probíhá a k čemu se radiofarmaka používají.



Zpracování radioaktivních odpadů

ÚJV Řež ročně zpracuje přes 90 % tzv. institucionálních radioaktivních odpadů v České republice. Jde hlavně o odpady, které vznikají při běžné činnosti nemocnic, výzkumných ústavů, univerzit nebo průmyslových podniků. Mohou to být například použité ochranné rukavice, laboratorní pomůcky, filtry, stříkačky nebo součástky, které přišly do kontaktu s radioaktivními látkami, nejedná se tedy o vyhořelé jaderné palivo z elektráren. V muzeu se seznámíte s technologiemi a procesy, kterými tyto odpady procházejí před likvidací nebo bezpečným uložením v přípořechovém úložišti české Správy úložišť radioaktivních odpadů.



Přístroje pro měření ionizujícího záření

Ionizující záření nevidíte, neslyšíte ani necítíte – jeho přítomnost dokážou spolehlivě odhalit pouze speciální měřicí přístroje. Právě proto má dozimetrická a detekční technika zásadní význam v jaderné energetice, medicíně, výzkumu, průmyslu i při radiační ochraně veřejnosti. Muzejní sbírka představuje vývoj těchto přístrojů napříč několika desetiletími: od vybavení používaného v laboratořích a provozech přes armádní a civilní měřicí techniku až po osobní dozimetry, které se uplatnily například v období po havárii jaderné elektrárny v Černobylu. Expozice zároveň ukazuje, že radioaktivita se nemusí týkat jen laboratoří či elektráren – upozorňuje i na méně obvyklé předměty, například nádobí s uranovou glazurou, které je dodnes měřitelné.

www.jadernemuzeum.cz



vstup po registraci zdarma



www.jadernaenergie.online

