

Jaderná energie / Jadrová energia

2/2025, ročník 6 (71)



je⁷⁰

V tomto čísle vám představíme Ústav jaderné fyziky Akademie věd České republiky, který stejně jako náš časopis oslavil v letošním roce 70 let od svého založení. V medailonku významných osobností si připomeneme Ing. Jiřího Buriana, CSc., jenž je považován za otce neutronové záchytové terapie v ČR. Více informací o metodě BNCT se dozvíte v příspěvku Jána Milčáka, současného ředitele provozu řežských reaktorů. Velmi detailně vás seznámíme se školním reaktorem VR-1 nebo s technologií varných reaktorů BWR/BWRX-300 a jejich uplatněním v energetice a teplárenství. Na následujících stránkách mimo jiné najdete i další díl seriálu o vzniku a historii jaderného dozoru v Československu, druhou část vědecko-populárního článku Vladimíra Wagnera o Robertu Oppenheimerovi a pravidelné aktuality.

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.

2. číslo 2025, ročník 6 [71]

Vychází 31. 12. 2025

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

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 a milí čtenáři,

máme za sebou další úspěšný rok. Rok, ve kterém jsme oslavili 70. výročí založení našeho časopisu, rok, ve kterém jsme se museli smířit s jistými interními změnami, ale především rok bohatý na jaderná témata – a to je zásadní.

Jaderná energetika získává na významu nejen u nás, ale prakticky celosvětově. Tahounem jejího rozvoje přitom už není jen snaha o dekarbonizaci a energetickou soběstačnost, ale nově třeba i energeticky velmi náročné instalace související s rozvojem umělé inteligence. Evidentně se tedy máme na co těšit.

A na co se můžete těšit vy? V kalendářním roce 2026 plánujeme vydat dvě čísla s obecným obsahem a jedno speciální tematické číslo. V prvním čtvrtletí navíc spustíme nové webové stránky, na kterých budeme kromě elektronické verze ve formátu PDF příspěvky publikovat též jako HTML. To čtenářům umožní příspěvky nejen filtrovat, ale především snadno překládat do libovolných jazyků prostřednictvím překladače internetového prohlížeče.

V souvislosti s novou elektronickou publikací plánujeme vybrané příspěvky doplnit o perzistentní identifikátor DOI (Digital Object Identifier) a za personální podpory knihovny ÚJV Řež začneme též pracovat na slibovaném elektronickém archivu historických čísel našeho časopisu.

Dovolte mi, abych vám jménem redakce a obou vydavatelů poděkoval za vaši přízeň a popřál vám hodně zdraví, štěstí a osobních i pracovních úspěchů v roce 2026.

Michal Šafránek

šéfredaktor

Partneři časopisu:



Obsah

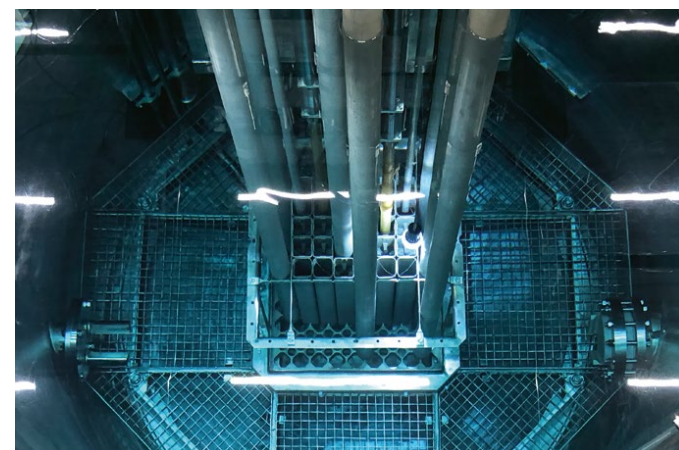
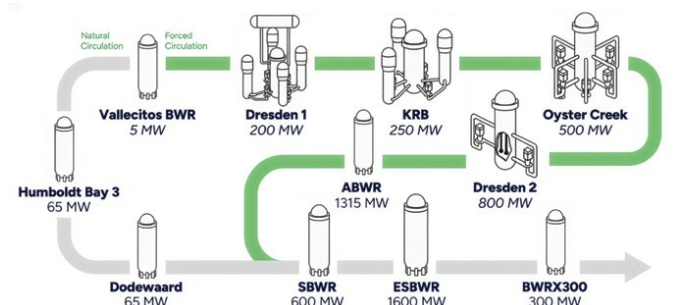
PŘEDSTAVUJEME Sedmdesát let existence Ústavu jaderné fyziky AV ČR RNDr. Vladimír Wagner, CSc.	4
MEDAILONKY OSOBNOSTÍ Ing. Jiří Burian, CSc. Duchovní otec neutronové záchytové terapie v České republice Miroslav Hrehor	15
VÝZKUM, VÝVOJ A NOVÉ TECHNOLOGIE Jaderné elektrárny BWR a příprava k výstavbě BWRX-300 Ing. Petr Neuman, CSc.	16
PROVOZ A VÝSTAVBA JADERNÝCH ZAŘÍZENÍ Před 35 lety dosáhl školní reaktor VR-1 „Vrabec“ poprvé kritického stavu Ing. Jan Rataj, Ph.D.	32
APLIKACE RADIOIZOTOPŮ A IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ Výročí 25 let záchytové terapie na reaktoru LVR-15 Ing. Ján Milčák	50

VZDĚLÁVÁNÍ A ROZVOJ KNOW-HOW Jaderné dny 2025 Ing. Jan Ullmann, Ing. David Mašata	54
OKNO DO HISTORIE Z knihy Vznik a historie státního dozoru nad jadernou bezpečností Ze vzpomínek Zdeňka Kříže, díl šestnáctý	58
ZAJÍMAVOSTI Z DOMOVA I ZE SVĚTA Robert Oppenheimer – může civilizace přežít s jadernou energií? – 2. část RNDr. Vladimír Wagner, CSc.	62
AKTUALITY • České jaderné elektrárny splňují mezinárodní normy ochrany životního prostředí • Plovoucí reaktor od Samsungu získal předběžné schválení • 40 let od prvního zavezení paliva do druhého reaktoru Jaderné elektrárny Dukovany • Three Mile Island dostane půjčku na restart prvního bloku	74



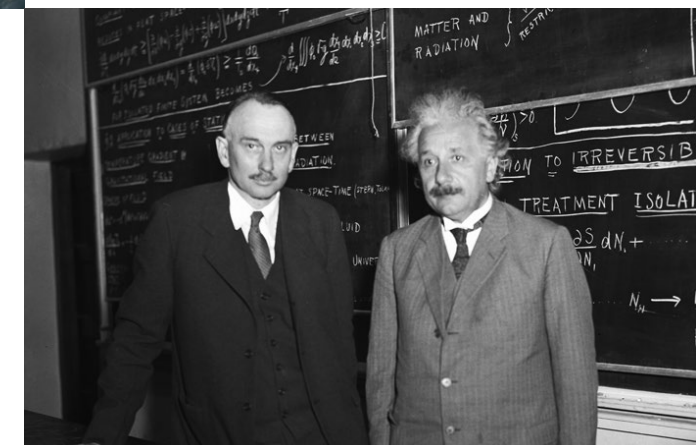
16 Jaderné elektrárny BWR a příprava k výstavbě BWRX-300

Ing. Petr Neuman, CSc.



62 Robert Oppenheimer – může civilizace přežít s jadernou energií? 2. část

RNDr. Vladimír Wagner, CSc.



4 Sedmdesát let existence Ústavu jaderné fyziky AV ČR

RNDr. Vladimír Wagner, CSc.

32 Před 35 lety dosáhl školní reaktor VR-1 „Vrabec“ poprvé kritického stavu

Ing. Jan Rataj, Ph.D.

Sedmdesát let existence Ústavu jaderné fyziky AV ČR



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

Článek připomíná 70 let Ústavu jaderné fyziky AV ČR, klíčového pracoviště pro základní i aplikovaný výzkum v oblasti jaderné fyziky. Popisuje jeho historii, modernizaci urychlovačové infrastruktury, zapojení do mezinárodních projektů a současné směry výzkumu – od studia jaderné hmoty a neutronových metod po vývoj radiofarmak a ochranu kulturního dědictví.

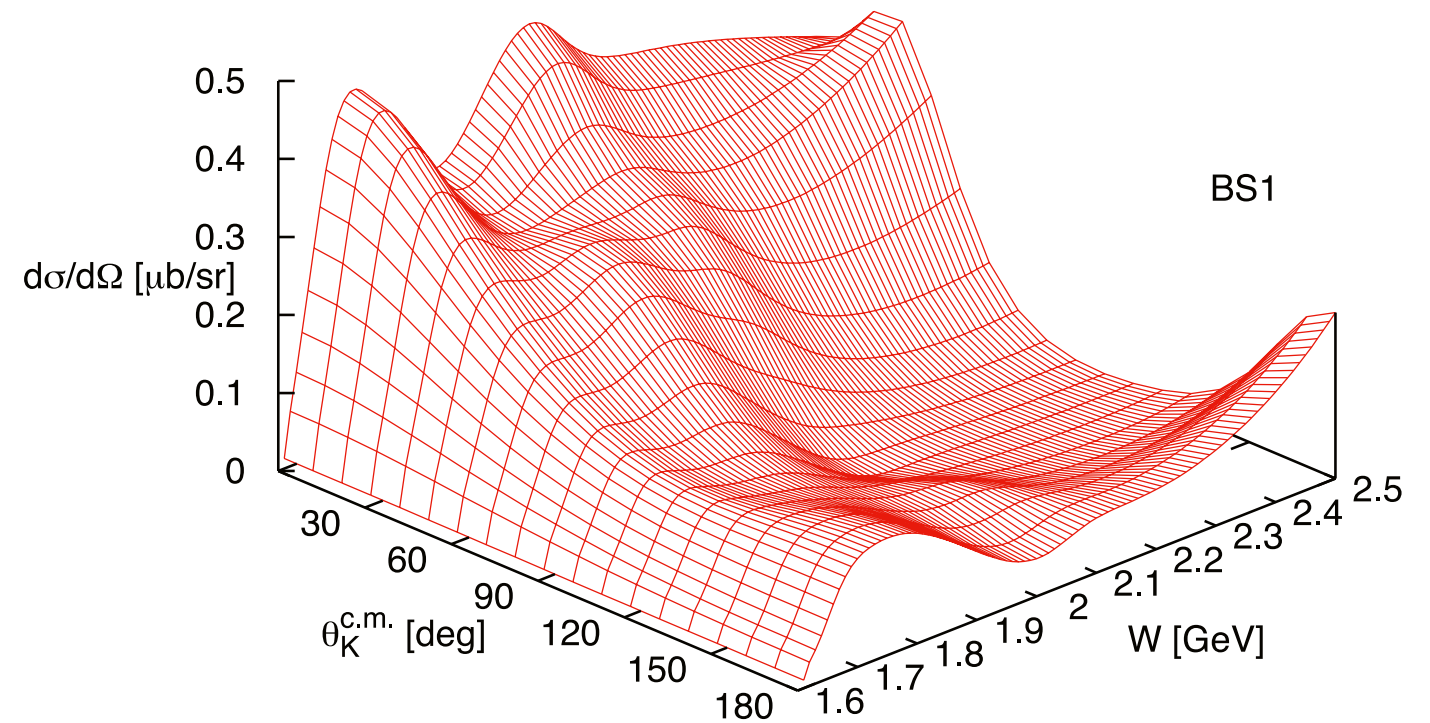
The article marks 70 years of the Nuclear Physics Institute of the Czech Academy of Sciences, a leading centre for fundamental and applied nuclear research. It outlines its history, accelerator infrastructure upgrades, involvement in international projects, and current research priorities – from nuclear matter studies and neutron methods to radiopharmaceutical development and cultural heritage protection.

Ústav jaderné fyziky AV ČR je hlavní institucí zabývající se základním i aplikovaným výzkumem v oblasti jaderné fyziky v České republice. S tím je spojeno i to, že je českou organizací s největším počtem urychlovačů. V tomto roce dovršil sedmdesát let své existence. V posledních pár desítkách let obnovil sestavu svých velkých infrastruktur, a i v dalších desetiletích je připraven plnit svou misi.

Ústav jaderné fyziky byl založen 10. června 1955, jako základní krok k intenzivnímu rozvoji bádání v oblasti jaderné fyziky a k cestě k využití jaderné energie. Letos tak slavíme 70. výročí jeho zrodu. Faktické kroky k budování areálu ústavu v Řeži však proběhly už dříve. V květnu 1955 začal geologický průzkum a zeměměřičské práce. V roce 1956 došlo k jeho začlenění do ČSAV. Kromě budovaného areálu v Řeži využíval ústav laboratoře v Praze, v Hostivaři byl první urychlovač a pracoviště na Bulovce bylo zaměřeno na radiologii a dozimetrii.

První experimentální zařízení, které bylo uvedeno do provozu, byl reaktor VVR-S s tepelným výkonem 2 MW_t. Reaktor byl intenzivní zdroj neutronů a byl využíván i pro produkci radionuklidů nezbytných pro výzkum v laboratořích, které se postupně uváděly do provozu. Pracoval až do roku 1987, kdy jej nahradil reaktor LVR-15.

Druhým zařízením pak byl urychlovač cyklotron U-120. Jednalo se o dodávku ze Sovětského svazu, ale na jeho instalaci a uvedení do provozu se podílela celá řada domácích podniků. První svazek částic byl na něm urychlen na začátku roku 1960. V roce 1978 byl nahrazen urychlovačem U-120M.

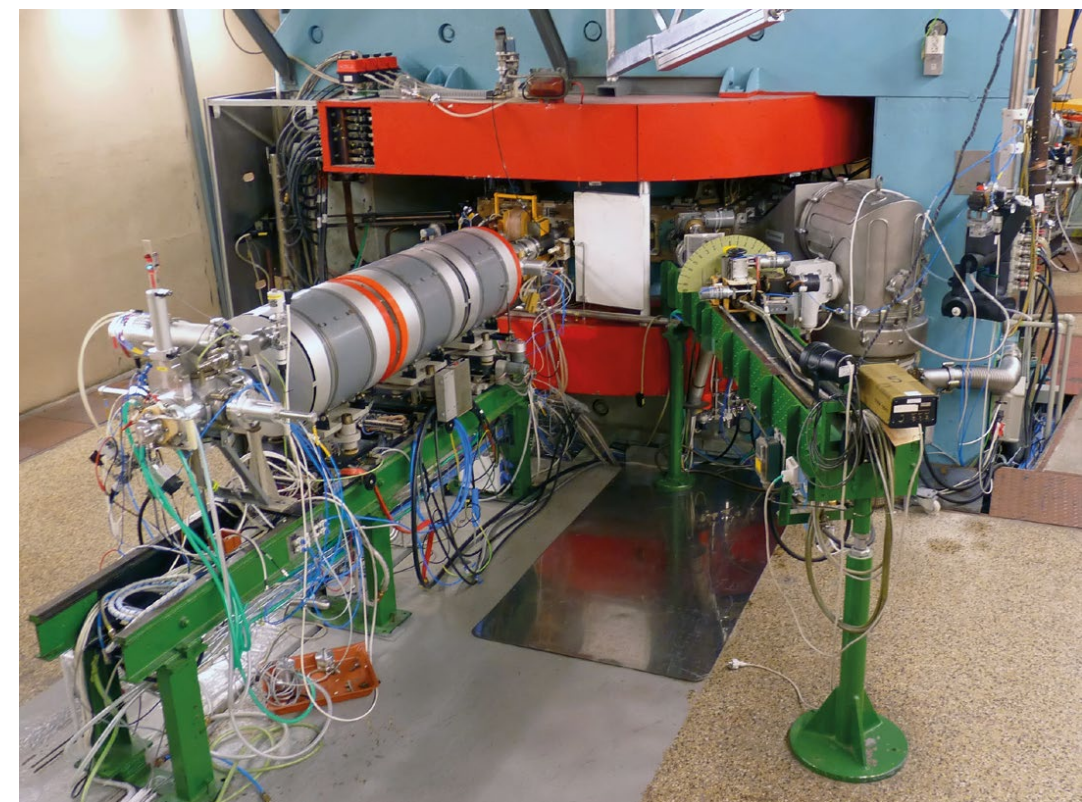


Ústav využíval i lineární elektrostatický urychlovač typu Cockcroft-Walton instalovaný od roku 1951 v Hostivaři. V roce 1962 byl v Hostivaři instalován malý Van de Graaffův urychlovač na energie 1 MeV. V roce 1964 byl v Řeži do zkušebního provozu uveden český Van de Graaffův urychlovač na energie až 4–5 MeV. Ten byl jediným urychlovačem iontů vyrobeným českými firmami a je nyní umístěn v Národním technickém muzeu v Praze. Dva roky probíhaly úpravy a spouštění urychlovače, který pak realizoval

urychlování protonů a deuteronů do energií 3,5 MeV při intenzitě svazku až 10 μA. Byl pak využíván až do roku 2013 hlavně pro materiálový výzkum pomocí svazků iontů.

Kromě vlastní infrastruktury využíval ústav v rámci intenzivně rozvíjené mezinárodní spolupráce zařízení v zahraničí. Ta byla z pochopitelných důvodů v té době hlavně se Sovětským svazem a vznikajícím Spojeným ústavem jaderných výzkumů v Dubně. Československo bylo zakládajícím členem této organizace.

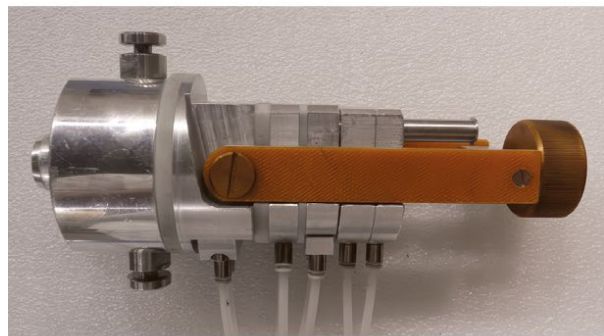
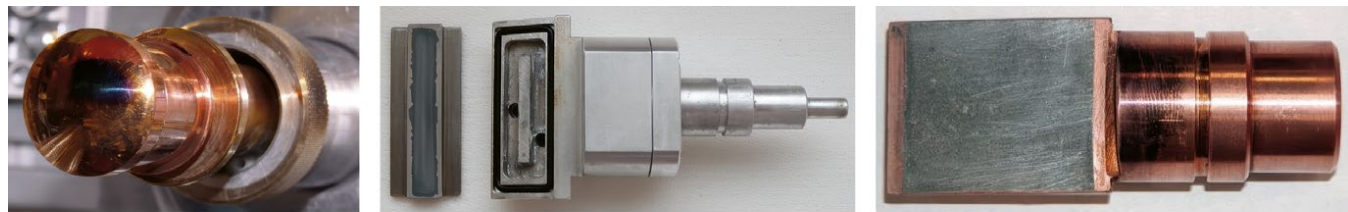
↗ **Obr. 2:** Z činnosti OTF: Diferenciální účinný průřez pro reakci $p(\gamma, K^+) \Lambda$ počítaný pomocí jednoho z isobar modelů. Foto: Phys. Rev. C97, 025202 (2018)



← **Obr. 03:** Cyklotron U-120M (foto: archiv CANAM)

↓ **Obr. 1:** Ředitelé ÚJF AV ČR za posledních 20 let – zleva: Petr Lukáš, Jan Dobeš a Ondřej Svoboda (foto: ÚJF – D. Šebek)





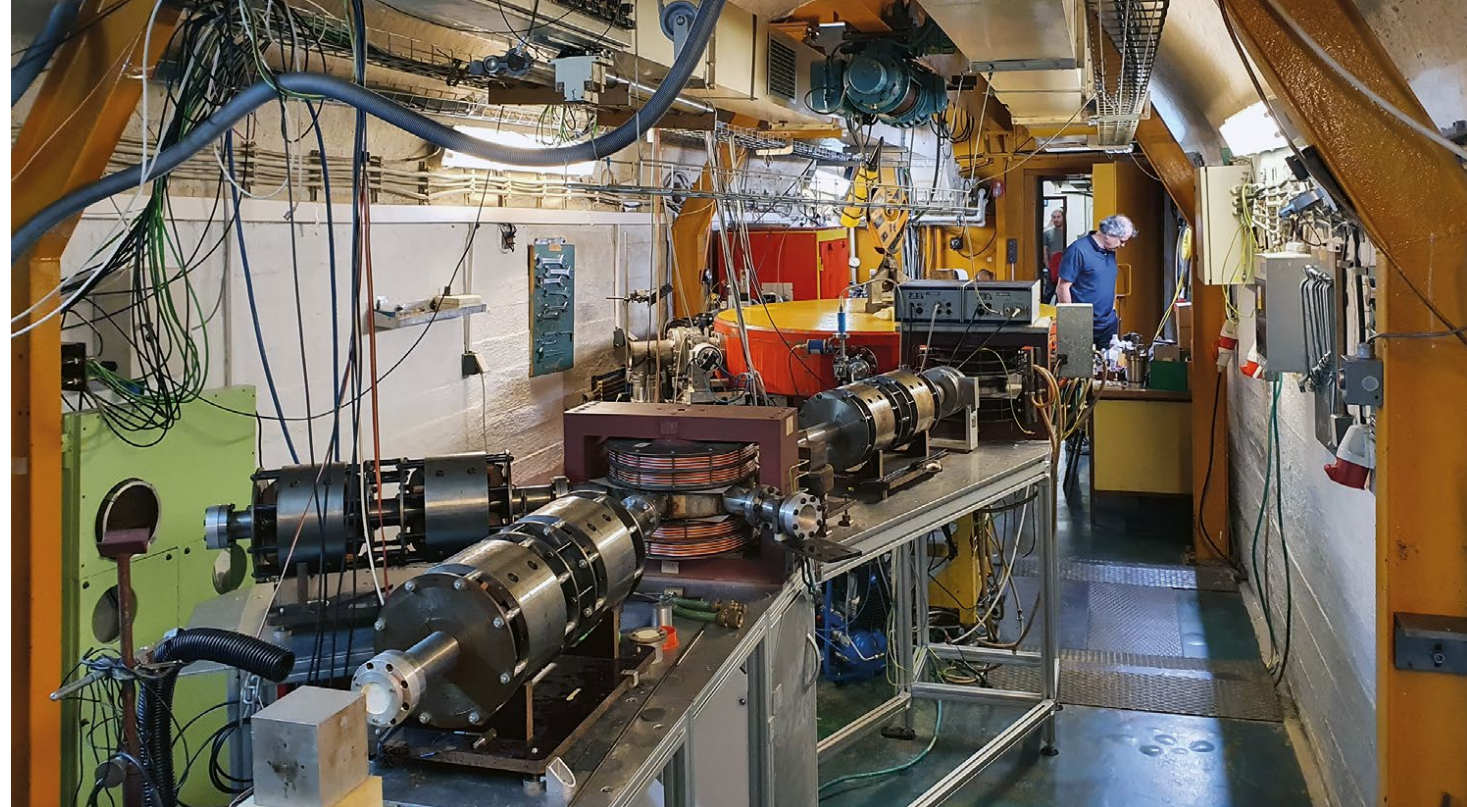
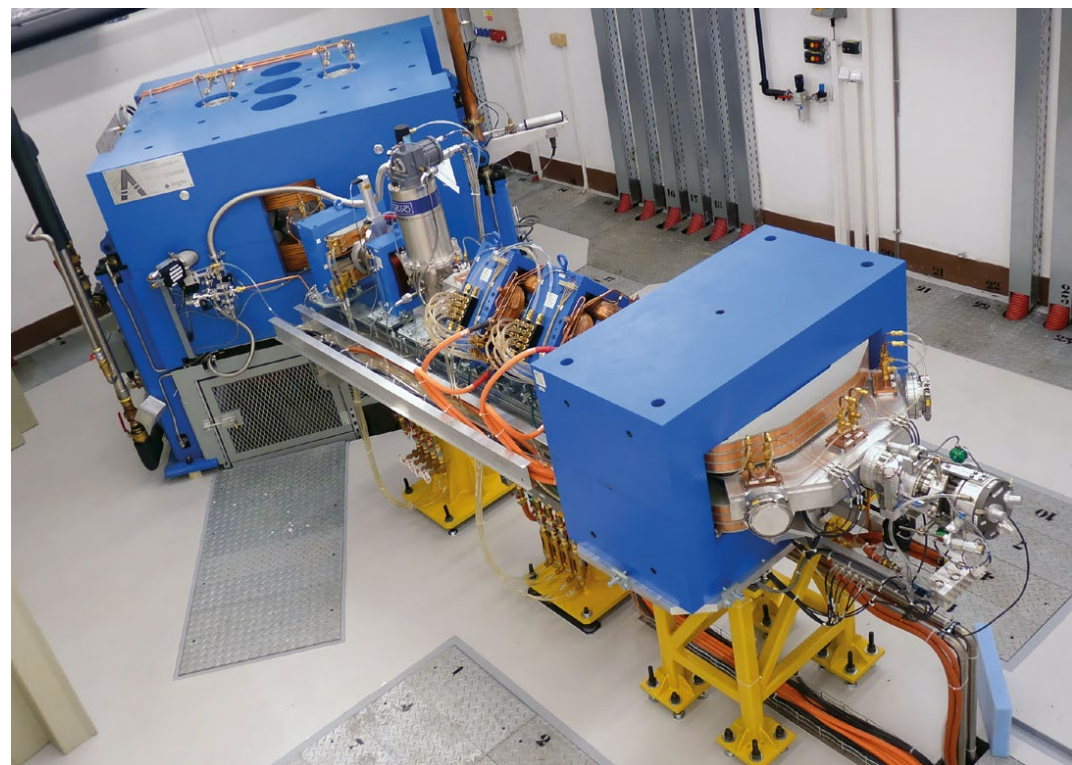
↑
Obr. 04: Terče pro
cyklotron U-120M
(foto: archiv CANAM)

V roce 1959 došlo k přejmenování na Ústav jaderného výzkumu ČSAV a v roce 1972 pak k rozdělení na dvě části v Řeži. První byl Ústav jaderné fyziky ČSAV a druhou pak Ústav jaderného výzkumu. První instituce byla menší a zaměřovala se na základní výzkum v oblasti jaderné fyziky a aplikace jaderných metod

v základním výzkumu. Druhá byla zázemím pro rozvoj jaderné energetiky a aplikace jaderných technologií. Zároveň se od ústavu oddělila radiologická a dozimetrická část, která sídlila v Praze na Bulovce.

Založení ústavu a jeho první desetiletí činnosti jsou podrobně popsána v autobiografic-

→
Obr. 5: Cyklotron TR-24 krátce po instalaci
(foto: archiv CANAM)



ké knize ^[1] prvního ředitele ústavu Čestmíra Šimáně a v brožuře k 50. výročí ústavu ^[2]. Zde je také vysvětlen průběh rozdělení ústavu. Ten byl silně ovlivněn intenzivním rozvojem jaderné energetiky v Československu, ale také politickými událostmi probíhající normalizace, jak je podrobně vysvětleno v již zmíněné brožuře.

Výzkumné směry po rozdělení

Po rozdělení měl ústav následující oddělení, která odpovídala základním směrům jeho rozvoje.

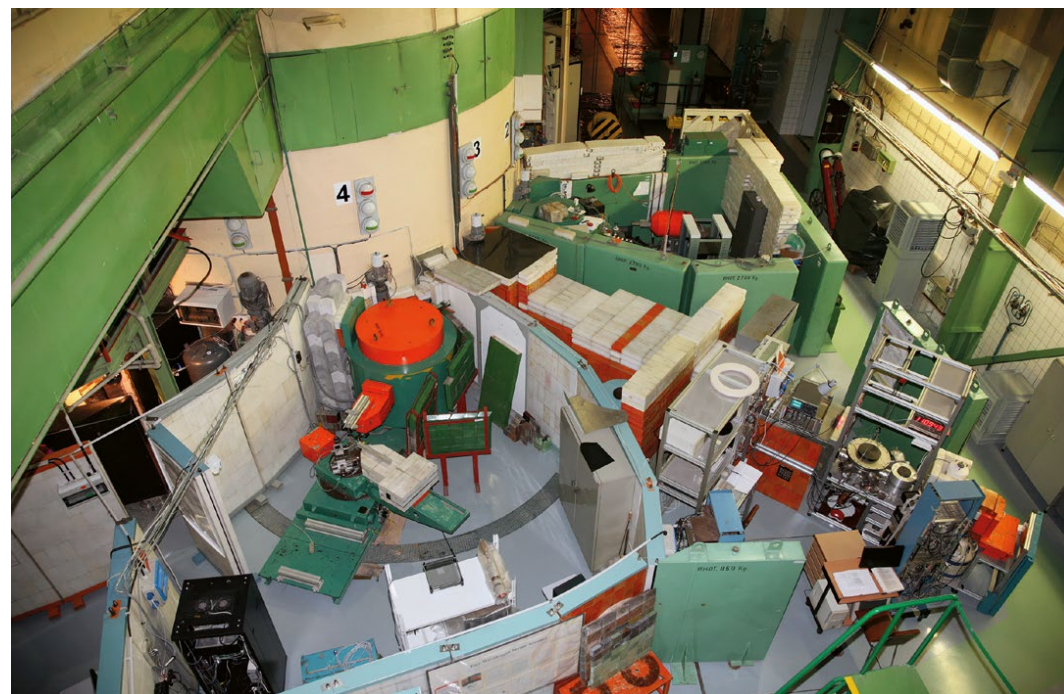
Oddělení teoretické jaderné fyziky se zaměřovalo na oblast popisu jaderné struktury, například modelu interagujících bosonů nebo popis lehkých jader pomocí realistických potenciálů. Později se intenzivně rozvinuly studie v oblasti mezonových reakcí i hyperjader a ře-

šení fundamentálních otázek hadronové fyziky. Vždy zde také byly skupiny zaměřené na matematickou fyziku.

Oddělení jaderné spektroskopie se zaměřovalo na studium struktury jader, jejich vybuze-
ných stavů i přechodů mezi nimi. Využívalo se k tomu gama i elektronové spektrometrie záření produkovaného během rozpadů beta radionuklidů. K tomu účelu sloužila řada spektrometrů gama, včetně anticomptonovského, i elektronových. Radionuklidy se získávaly dominantně na cyklotronu U-120M a reaktoru VVR-S. Řada spektrometrických prací byla realizovaná na svazku cyklotronu. Zde se určovaly i doby života vybuze-
ných stavů jader s využitím metody doplerovského posuvu.

Aplikovaná jaderná spektrometrie se zaměřovala na využití neutronové i rentgen-fluores-

↑
Obr. 6: Urychlovač
Mikrotron MT25 v Praze
pod Vítkovem (foto:
ÚJF – D. Šebek)



←
Obr. 7: Zařízení
na horizontálních
kanálech reaktoru LVR-
15, provozovaného
Centrem výzkumu Řež
(foto: archiv CANAM)



↑
Obr. 8: Urychlovač Tandetron (foto: archiv CANAM)

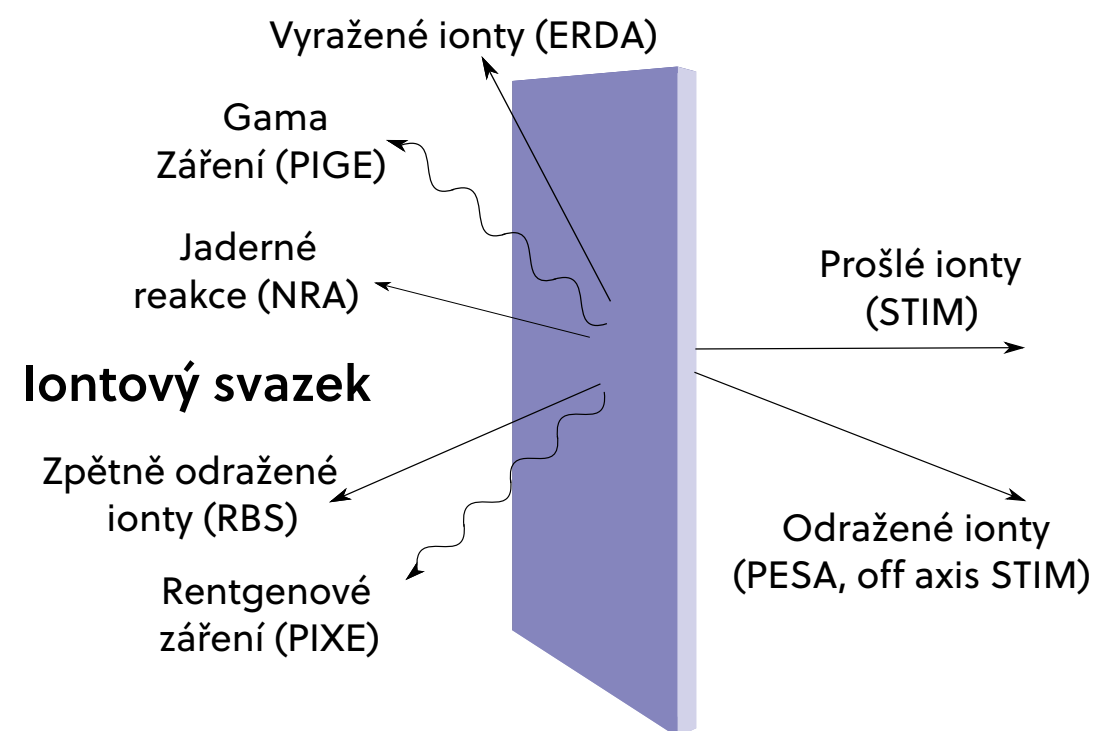
↘
Obr. 9: Procesy sledované při interakci energetických iontových svazků z Tandetronu s materiálem

cenční analýzy pro určování stopových obsahů prvků i různých izotopů. Velice důležitá byla dostupnost reaktoru VVR-S a později LVR-15 v areálu. Umožňovalo to řešení řady problémů v průmyslu, medicíně, ekologii, archeologii a celé řadě dalších oborů. Velmi zajímavé bylo například studium vzorků měsíčních hornin dopravených na Zemi výpravami Apollo 11 a 12, později pak i vzorků ze sovětských Lun a dalších výprav programu Apollo.

Oddělení jaderných reakcí se zaměřovalo na studium struktury jader pomocí jaderných reakcí s využitím cyklotronu U-120M s přílehlými iontooptickými trasami i Van de Graaffova urychlovače. Později se zájem stále více zaměřoval na reakce nukleonového přenosu, zvláště pak na ty astrofyzikální. V aplikační oblasti se začaly využívat svazky z Van de Graaffova urychlovače ke studiu struktury materiálů pomocí rozptylu iontů, jaderných reakcí a buzení charakteristického rentgenovského záření.

Oddělení neutronové fyziky využívalo jako zdroje neutronů již zmíněné reaktory. Zpočátku se zaměřovalo hlavně na studium reakcí zachytu neutronů na jádrech ve spojení s gama spektrometrií pro poznání struktury jader. Později stále větší část tvořil materiálový výzkum s využitím neutronové difrakce nebo maloúhlového rozptylu neutronů.

Jak bylo zmíněno, oddělily se laboratoře na Bulovce zaměřené na radiologickou a dozimetrickou fyziku do samostatného ústavu. V té době se ústav zaměřoval na studium radioaktivity v životním prostředí, zvláště z okolí jaderných elektráren. Studovala se dozimetrie směsných polí záření, zejména kosmického záření na povrchu Země a v jejím okolí, na palubách letadel i kosmických lodí. Ústav také zajišťoval



↑
Obr. 10: Charakterizace prvkového složení artefaktu svazky iontů z Tandetronu

služby standardizační dozimetrie a radiouhlíkového datování.

Velká část získaných výsledků byla realizována ve spolupráci s československými i zahraničními institucemi. U těch zahraničních dominovala spolupráce s SÚJV Dubna. Ústav intenzivně spolupracoval s vysokými školami. Těmi nejvýznamnějšími byly MFF UK a FJFI ČVUT. Pracovníci ústavu přednášeli na vysokých školách, vedli diplomové a disertační práce.

Zaměření ústavu v současné době

V devadesátých letech začal intenzivní přerod ústavu. Došlo postupně ke změně orientace v řadě rozvíjených oblastí realizovaného vědeckého výzkumu. Do ústavu se 1. ledna 1994 zpět začlenil Ústav dozimetrie záření AV ČR.

Udržení špičkové mezinárodní úrovně v oblasti jaderné fyziky vyžaduje pravidelnou obnovu a modernizaci klíčových zařízení. Ústav jaderné fyziky AV ČR proto v posledních letech prošel rozsáhlou rekonstrukcí své infrastruktury, která mu umožňuje držet krok s nejmodernějšími trendy a zároveň přitahovat nové vědecké spolupráce.

Cyklotron **U120M**, který byl v minulosti zasažen povodněmi, byl nejen opraven, ale i zásadně modernizován. Tento stroj dnes dokáže urychlovat protony H^+ na energie 10–36 MeV, deuterony D^+ na energie 10–20 MeV, ionty helia-3 ($^3He^{2+}$) na energie 17–54 MeV a ionty helia-4 ($^4He^{2+}$) na energie 20–40 MeV. Nově byl

doplněn o možnost urychlovat záporně nabité ionty a poskytuje svazky s řádově vyšší intenzitou, což zajistí jeho efektivní využití na další desetiletí.

Pro oblast výzkumu radiofarmak byl pořízen cyklotron **TR-24**, schopný urychlovat protony na energie 18–24 MeV. Je doplněn laboratořemi s horkými komorami, které umožňují bezpečnou manipulaci s radionuklidy a rozšiřují možnosti aplikací v medicíně.

Významnou modernizací prošla i oblast jaderně analytických metod. **Van de Graaffův** urychlovač byl nahrazen lineárním tandemovým urychlovačem **Tandetron TN 4130 MC** s terminálovým napětím 3 MV. Tento přístroj dokáže urychlovat ionty všech hmotností a dramaticky rozšířil možnosti výzkumu pomocí iontových svazků.

Do portfolia přístrojů patří také elektronový urychlovač **Mikrotron MT25**, umístěný v Praze pod Vítkovem. Ten poskytuje svazky elektronů s energií až 25 MeV a zároveň brzdné gama fotony. Zařízení tak umožňuje studium radiačního poškození materiálů i nové aplikace v oblasti jaderně analytických metod.

V České republice dlouho chyběl hmotnostní spektrometr schopný identifikovat stopová množství nuklidů a provádět přesné radionuklidové datování. Tento deficit byl odstraněn pořízením **urychlovačového hmotnostního spektrometru AMS systému MILEA**, který byl uveden do provozu v roce 2022 a otevřel zce-



↑
Obr. 11: Kompaktní urychlovačový hmotnostní spektrometr AMS MILEA (foto: AV ČR – Jana Plavec)

la nové možnosti v oblasti datování a analýzy radionuklidů.

Velká část těchto zařízení byla integrována do národní velké výzkumné infrastruktury **CANAM (Center of Accelerators and Nuclear Analytical Methods)**, která vznikla v roce 2011 a byla podporována do roku 2019. CANAM se stal unikátním centrem díky tomu, že soustředil pět různých urychlovačů pod jednu střechu. Tato jedinečnost výrazně zvýšila viditelnost české infrastruktury v mezinárodním prostoru, přitáhla nová vědecká témata a otevřela cestu k řadě spoluprací.

CANAM tak nejen poskytoval služby externím uživatelům, ale především posílil vlastní výzkumný potenciál ÚJF. Díky CANAM se ústav stal respektovaným partnerem v evropských projektech a jeho infrastruktura byla využívána pro široké spektrum experimentů – od základního výzkumu hmoty až po aplikace v medicíně, ekologii či v průzkumech kulturního dědictví. Modernizace urychlovačů a rozvoj instrumentace dnes řadí Ústav jaderné fyziky AV ČR mezi špičková pracoviště v oblasti částicové fyziky, jaderné fyziky, urychlovačových technologií a materiálového výzkumu.

Podívejme se na současný rozvoj hlavních výzkumných směrů Ústavu jaderné fyziky AV ČR, kde se důraz klade na vlastní výsledky a unikátní zapojení do mezinárodních infrastruktur. Proměna výzkumných priorit vedla i k úpravě organizační struktury jednotlivých oddělení. **Oddělení teoretické fyziky** se nyní soustředí na studium jaderných a subjaderných systé-

mů, zahrnující hadronovou, leptonovou, kvarkovou i matematickou fyziku. Rozvíjí formalismus kvantové mechaniky a kvantovou teorii pole včetně netradičních zobecnění, čímž přispívá k hlubšímu porozumění základním stavebním prvkům hmoty.

Experimentální výzkum jaderné struktury se v ÚJF AV ČR postupně přesunul k vyšším energiím a dnes se soustředí na základní výzkum hmoty v extrémních podmínkách – konkrétně na studium velmi horké a husté jaderné hmoty prostřednictvím srážek relativistických a ultrarelativistických těžkých iontů. V této oblasti se naše skupiny významně podílejí na mezinárodních experimentech realizovaných na velkých infrastrukturách, jako jsou GSI Darmstadt, CERN a BNL Brookhaven. Tyto experimenty představují světovou špičku v oblasti výzkumu jaderné hmoty.

ÚJF zde přispívá nejen k samotným experimentům, ale také k vývoji a implementaci detekčních systémů, které umožňují sledovat vlastnosti hmoty v podmínkách blízkých těm, jež panovaly krátce po vzniku vesmíru. Podíl našich pracovníků na těchto projektech je klíčový pro získávání nových poznatků o stavebních kamelech hmoty a jejich interakcích.

Domácí infrastruktura ústavu slouží jako nezbytné zázemí pro přípravu detekčních sestav, jejich testování a ověřování radiační odolnosti, což je podmínkou pro jejich nasazení v náročných experimentech na zahraničních urychlovačích. Tuto oblast systematicky rozvíjí **Oddělení fyziky těžkých iontů**, které tak propojuje

vlastní výzkum s aktivní účastí na nejvýznamnějších světových experimentech a posiluje mezinárodní postavení ÚJF v základním výzkumu v oboru relativistických a ultrarelativistických srážek těžkých iontů.

Významnou součástí aktivit je také účast na infrastruktuře **SPIRAL2** v GANIL v Caen, kde se podílíme na experimentech v oblasti jaderné fyziky – například při studiu exotických jader, reakcí s radioaktivními svazky nebo při výzkumu procesů relevantních pro astrofyziku. Tyto experimenty rozšiřují naše znalosti o struktuře jader a jejich chování v extrémních podmínkách.

Oddělení jaderných reakcí se soustředilo na studium astrofyzikálních reakcí, kde může využít řady výhod našeho cyklotronu U120M, například relativně vzácné svazky helia-3. Zároveň začalo intenzivně rozvíjet spolupráci v této oblasti právě s laboratoří GANIL.

Renesance jaderné energetiky a rozvoj výzkumů v oblasti pokročilých štěpných technologií i fúze vede k požadavku studia neutronových reakcí v širokém rozsahu energií. V ústavu se proto realizovalo několik zdrojů rychlých neutronů na bázi cyklotronů U120M i TR24. Různé terče – lithium, beryllium nebo těžká voda – umožňují získat spojitě i kvazimonoenergetické

spektrum neutronů. Studovala se tak řada reakcí neutronů důležitých pro pokročilé jaderné technologie i pro výzkum radiačního poškození materiálů. Rozvoj těchto zdrojů je soustředěn v **Oddělení urychlovačů**.

Silná základna ve spektroskopii konverzních elektronů umožnila zapojení našeho ústavu do měření hmotnosti neutrina pomocí elektronového spektrometru KATRIN v Karlsruhe. V ústavu byla vypracována metodika kalibrace jeho napětí pomocí konverzních linek plynného ^{83}mKr . Rubidiový generátor $^{83}\text{Rb}/^{83\text{m}}\text{Kr}$ tohoto radionuklidu se připravuje na cyklotronech U-120M a TR24. Dodávky těchto radionuklidů zajišťuje, jako všechny ozařovací služby a podporu prací na urychlovačích, zmíněné Oddělení urychlovačů.

Ústav má k dispozici širokou škálu svazků – ionty, neutrony i fotony – které lze využít nejen pro studium, ale i pro **modifikaci materiálů iontovými svazky**, například změnu elektrických a optických vlastností polovodičů, tvorbu nanostruktur, zlepšení mechanické odolnosti povrchů nebo simulaci radiačního poškození materiálů určených pro kosmické technologie. S využitím **jaderně analytických metod** lze studovat stopové obsahy prvků pro potře-

↓
Obr. 12: Otevření laboratoře pro přípravu Ac-225 v červnu 2024

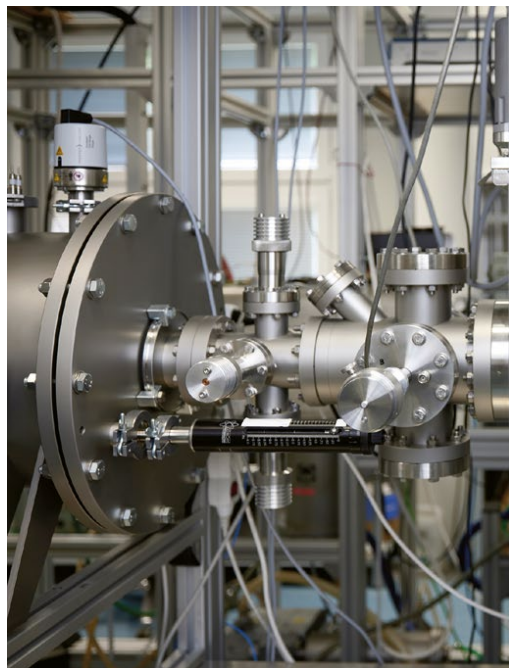




↑
Obr. 13: Záběr
z radiochemické
laboratoře

by ekologie, archeologie, muzejnictví i realizo-
vat forenzní analýzy.

**Oddělení neutronových a iontových me-
tod** se soustředí na vlastní základní výzkum
hmoty prostřednictvím interakcí neutronů
a iontů s materiály. Klíčovou oblastí je využí-
tí neutronů pro neutronovou difrakci, která
umožňuje detailní studium struktury materiálů,
jejich fázových přeměn a chování pod mecha-
nickým zatížením či při působení extrémních
podmínek. Tento přístup poskytuje jedinečné
informace o uspořádání atomů a dynamice kry-
stalových mříží, které nelze získat jinými me-
todami. Zásadní význam má účast našich **ne-
utronových fyziků** na budování **Evropského
spalačního zdroje neutronů ESS ve švédském
Lundu**. Pracovníci ÚJF zde společně s německý-
mi kolegy navrhli a instalují difraktometr **BEER**,
který bude sloužit k detailnímu studiu mecha-
nických vlastností materiálů pod zatížením.
Tento přístroj představuje unikátní nástroj pro
základní materiálový výzkum a posiluje meziná-
rodní postavení ÚJF v oblasti neutronové fyziky.



→
Obr. 14: Detail
z laboratoře
nanomateriálů

Oddělení dozimetrie záření navázalo na
předchozí témata. Špičková úroveň dozimet-
rie kosmického záření umožnila zapojení do
monitorování na mezinárodní vesmírné stani-
ci ISS a letu k Měsíci na lodi Artemis I. Rozvoj
zaznamenalo také studium biologických účinků
záření; zde probíhá spolupráce s Protonovým
centrem na Bulovce. Dramatický posun probě-
hl v radiouhlíkovém datování díky hmotnost-
nímu spektrometru MILEA. Ten umožňuje sle-
dovat i další radionuklidy. Velice zajímavá jsou
studia zaměřená na datování kamenných arte-
faktů prvních hominidů, kteří žili před milióny
let v paleolitické lokalitě Korolevo v Zakarpatské
Ukrajíně. Pro tato studia se využívají kosmogen-
ní radionuklidy beryllium-10 a hliník-26.

Ústav se velmi intenzivně zapojil do výzku-
mu a vývoje diagnostických i terapeutických ra-
diofarmak. Významně přispěl k produkci i zavá-
dění využití radiofarmak v Česku – zvláště pak
radiofarmak pro pozitronovou emisní tomo-
grafii. Proto v ústavu vzniklo **Oddělení radio-
farmak**, které intenzivně využívá oba naše cy-
klotrony a také špičkové laboratoře s horkými
komorami. V současné době se ve spoluprá-
ci s německou firmou Eckert & Ziegler Radio-
pharma GmbH hledají nové možnosti produk-
ce velmi slibného teranostického radionuklidu
aktinia-225.

Od devadesátých let minulého století pro-
bíhalo velmi intenzivně posilování naší integra-
ce do mezinárodního výzkumu. Řada spolupa-
cí už byla zmíněna, a to je jen malá část. Až do



roku 2022, kdy Rusko napadlo Ukrajinu, pokračovala i spolupráce s SÚJV Dubna. Poté ústav
spolupráci ukončil a Česká republika z SÚJV vy-
stoupila.

Podrobně jsou poslední rozvoj a současný
stav popsány ve speciální publikaci k 70. výro-
čí Ústavu jaderné fyziky AV ČR ^[3] a každoroč-
ních výročních zprávách; zde je také řada příkla-
dů špičkových výzkumů a publikovaných prací
z posledních let.

Od jaderné fúze k ochraně kulturního dědictví

V současné době má Ústav jaderné fyziky AV ČR
okolo 250 zaměstnanců, z nich zhruba 150 jsou
vědečtí pracovníci, a ročně publikuje v impak-
tovaných mezinárodních časopisech přes 200
článků. Velmi intenzivně spolupracuje s vysoký-

mi školami a podílí se na výuce i vedení bakalář-
ských, diplomových a Ph.D. prací. I tím se sna-
ží o získání mladých kvalitních pracovníků, kteří
zajistí úspěšnou budoucnost ústavu.

Díky své unikátní kombinaci urychlovačo-
vé infrastruktury, neutronových svazků a po-
kročilých analytických metod se Ústav jader-
né fyziky AV ČR stal respektovaným partnerem
v evropském výzkumu. Jeho aktivity pokrýva-
jí široké spektrum – od základního výzkumu
hmoty přes aplikace v energetice a materiálo-
vých vědách až po kosmický výzkum a ochra-
nu kulturního dědictví. Ústav tak posiluje nejen
mezinárodní postavení české vědy, ale přispívá
také k řešení globálních výzev současnosti. Klí-
čové české pracoviště pro základní i aplikova-
ný výzkum v jaderné fyzice je tak plně připrave-
no plnit svou misi i v následujících desetiletích.

Reference

- [1] Čestmír Šimáně, Život mezi atomy aneb jak to vše u nás i jinde začalo, ÚJV Řež, 2005, ISBN: 978-80-87734-14-8
- [2] Vlastislav Brabec, Jaroslav Dittrich, Emilie Těšínská, Ústav jaderné fyziky AV ČR – 50 let – Řež 1955 – 2005, 2005, ISBN: 80-239-5526-8
- [3] Jan Dobeš a kolektiv autorů, 70. výročí Ústavu jaderné fyziky AV ČR, 2025, ISBN: 978-80-11-07022-9



RNDr. Vladimír Wagner, CSc.

wagner@ujf.cas.cz

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

Ing. Jiří Burian, CSc. Duchovní otec neutronové záchytové terapie v České republice

Ing. Jiří Burian, CSc. se narodil 3. srpna 1939 ve Skočicích (dnes součást města Přeštice) v Plzeňském kraji. Po maturitě na gymnáziu v Sedlčanech absolvoval Fakultu technické a jaderné fyziky na Univerzitě Karlově v Praze (v roce 1959 byla fakulta převedena pod ČVUT). Po ukončení vysokoškolského studia v roce 1961 nastoupil do Ústavu jaderné fyziky a v Řeži zůstal až do konce svých profesních aktivit v roce 2012. Zemřel 18. února 2014.

Jiří Burian zasvětil celý svůj profesní život problematice ionizujícího záření. K vrcholům jeho pracovních úspěchů patřila první klinická aplikace neutronové záchytové terapie (NZT) – Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) na reaktoru LVR-15 v Řeži (více informací k tomuto tématu naleznete v příspěvku na straně 50). Česká republika se tak v roce 2000 stala pá-



→ **Obr. 1:** Pracoviště NZT na reaktoru LVR-15, vlevo betonová ozařovací místnost, vpravo lehká ovládací buňka



↑ **Obr. 2:** Ing. Jiří Burian (vlevo) a Ing. Milan Marek

tou zemí světa (po USA, Japonsku, Holandsku a Finsku), ve které vývoj této metody léčení mozkových nádorů pokročil do stadia, jež umožnilo takové testy realizovat.

Příprava na klinickou fázi projektu započala už na počátku devadesátých let. Odborná skupina Stínění jaderných reaktorů vedená Jiřím Burianem, vybudovala na výzkumném reaktoru LVR-15 unikátní ozařovací pracoviště podporované aplikací moderních výpočetních a experimentálních metod, které našly své uplatnění nejen v provozu jaderných elektráren, ale i v lékařské aplikaci metody BNCT. Sám Jiří Burian se významně podílel na návrhu, modelování (kódy DORT, MCNP) a experimentální validaci epithermálního neutronového svazku.

Na projektu tehdy spolupracovali, vedle nejblížešších kolegů – členů jeho vědeckého od-

dělení (Ing. Milan Marek, CSc., RNDr. Ladislav Viererbl, CSc., Ing. Jiří Rejchrt a další) i specialisté z onkologické kliniky Všeobecné fakultní nemocnice 1. LF UK, Neurochirurgického oddělení nemocnice Na Homolce, Farmakologického ústavu AV ČR, Fyziologického ústavu AV ČR, Ústavu jaderné fyziky AV ČR a společnosti Katchem s.r.o.

Ačkoliv se neutronová záchytová terapie stala spíše mezikrokem vývoje léčebných onkologických metod, případně možným prostředkem paliativní léčby, práce, kterou na její vývoj a aplikaci odvedli členové skupiny vedené Jiřím Burianem byla na světové úrovni a v historii vědy nebude zapomenuta. Čest jeho památce.

Miroslav Hrehor

Jaderné elektrárny BWR a příprava k výstavbě BWRX-300

Ing. Petr Neuman, CSc.
člen spolku Jaderní veteráni

Druhý příspěvek o technologii varných reaktorů BWR/BWRX-300 (první příspěvek byl zveřejněný v čísle 1/2025) pojednává o možnostech jejich provozního uplatnění v elektroenergetice a teplárenství, v České republice a ve střední, severní a východní Evropě.

The second article on BWR/BWRX-300 boiling water reactor technology (the first article was published in issue 1/2025) discusses the possibilities of their operational application in electricity generation and district heating in the Czech Republic and in Central, Northern and Eastern Europe.

Úvod

Článek reprezentuje názor jaderných veteránů na dlouhodobější výhled budování českého energetického mixu, kde nemůže chybět procentuálně významná jaderná část, ani po roce 2050. Názor implicitně zahrnuje i minulost české jaderné energetiky realizované v koncernu Škoda Plzeň a ve společnosti ŠKODA PRAHA a.s., jejichž projekční a inženýrské kapacity průběžně analyzovaly stav jaderné energetiky ve světě a řešily strategický rozvoj jaderných zdrojů, včetně pokročilých jaderných bloků velkého a středního výkonu ^[10] (bloky General Electric – ABWR 1300, ESBWR 1200, blok Hitachi – HSBWR 600) – viz Obr. 3.3. Tehdy uvažované bloky středního výkonu zasahovaly do rozsahu současných SMR (ve smyslu Small and Medium Reactors).

Elektrárny BWR

Počet reaktorů, které překonaly 50 let provozu, přibývá a ukazuje se, že jejich koeficient ročního využití ani spolehlivost se nezhoršují. Mezi nimi jsou významně zastoupeny varné reaktory (boiling water reactor – BWR). Příkladem může být finská společnost Fortum.

Společnost Fortum a BWR ve Finsku a Švédsku

Společnost Fortum je u nás známá především a téměř výhradně tím, že provozuje jadernou elektrárnu Loviisa, která disponuje dvěma tlakovodními reaktory VVER-440. Kromě toho však Fortum vlastní podíly ve finské jaderné elektrárně Olkiluoto (bloky 1 a 2, dva varné reaktory BWR-2500 o výkonu 890 MW_{netto}, resp. 920 MW_{brutto}). Dále vlastní podíly ve švédských jaderných elektrárnách Oskarshamn (3. blok), s varným reaktorem ABB-III/BWR-3000 – Tab. 1.1. Dodavatelem v roce 1984 byla společnost AB Asea-Atom. Fortum rovněž vlastní podíl ve švédské elektrárně Forsmark (1. až 3. blok, tři varné reaktory) – viz Tab. 1.2.

Jaderná elektrárna Forsmark

Blok F1 s reaktorem ABB Atom BWR 69 s tepelným výkonem 2 928 MW a síťovým elektrickým výkonem 1 010 MW_e byl poprvé připojen k síti 5. června 1980 a komerční provoz zahájil 10. prosince 1980. Má dva turboalternátory, každý s výkonem 505 MW_e.

Blok F2 s reaktorem ABB Atom BWR 69 s tepelným výkonem 3 253 MW a síťovým elektrickým výkonem 1 120 MW_e byl poprvé připojen

Reaktor číslo	Tepelný výkon reaktoru [MW _t]	Elektrický výkon reaktoru [MW _e]	Rok uvedení	Typ reaktoru číslo do provozu	Generální dodavatelé
F1		1 010	1980	ABB Atom, BWR-69	Westinghouse Electric Sweden
F2		1 120	1981	ABB Atom, BWR-69	Westinghouse Electric Sweden
F3	3 320	1 190	1985	ABB-III, BWR-75/3000	Stal-Laval Turbin, Westinghouse Electric Sweden

Reaktor	Typ	Výkon [MW]			Zahájení stavby	Uvedení provoz	Připojení k síti	Komerční provoz	Uzavření
		Tepelný	Instalovaný	Čistý					
Oskarshamn 1	BWR/ABB-I	1 375	492	473	1.8.1966	12.12.1970	19.8.1971	6.2.1972	19.6.2017
Oskarshamn 2	BWR/ABB-II	1 800	661	638	1.9.1969	6.3.1977	2.10.1974	1.1.1975	22.12.2016
Oskarshamn 3	BWR/ABB-II	3 900	3 000	1 400	1.5.1980	29.12.1984	2.3.1985	15.8.1985	

k síti 15. prosince 1980 a komerční provoz zahájil 7. července 1981. Je to dvojče prvního bloku.

Blok F3 s tepelným elektrárnou ABB Atom BWR 75 s tepelným výkonem 3 300 MW a síťovým elektrickým výkonem 1 190 MW_e byl poprvé připojen k síti 3. března 1985 a komerční provoz zahájil 21. srpna 1985. Jedná se o novější konstrukci s jedním turboalternátorem.

Pozn. 1: Švédská společnost AB Asea-Atom, která dodala jadernou elektrárnu Oskarshamn 3 s varným reaktorem typu BWR, byla později koupena společností Westinghouse Electric Company (WEC), která však nadále vyráběla a dodávala jaderné elektrárny tlakovodního typu PWR.

Generálním dodavatelem Forsmark (bloky 1 až 3) byla společnost Westinghouse Electric Sweden. Generálním projektantem byla společnost Stal-Laval Turbin.

- Společnost Westinghouse Electric Sweden sehrála také významnou roli jako hlavní dodavatel prováděcího projektu (detail design).
- Elektrárnu vlastní ze 66 % společnost Vattenfall (kde drží 20,1 % finská Fortum), 9 % vlastní německá skupina UNIPER, a zbylých 25 % společnost Mellansvensk Kraftgrupp (MKG).
- Elektrárnu provozuje společnost Forsmarks Kraftgrupp AB.

Pozn. 2: Stal-Laval Turbin byla švédská společnost, která vznikla v roce 1962 spojením společností STAL

a „de Laval Steam Turbine“. V roce 1988 se stala součástí společnosti ABB, která později pod různými názvy spolupracovala s firmami jako Alstom a Siemens. Dnešní obchodní činnost v oboru turbín je rozdělena mezi Alstom (Alstom Power Sweden AB) a Siemens (Siemens Industrial Turbomachinery AB).

Pozn. 3: Reaktory Oskarshamn 3 a Forsmark 3, jsou stejného typu „ABB-III, BWR-3000“, avšak s trochu odlišnými výkony. Poměr (tepelný výkon / elektrický výkon) je u Oskarshamn 3 roven hodnotě 2,68 a u Forsmark 3 hodnotě 2,78.

Pozn. 4: Faktor využití jaderných elektráren, tedy poměr skutečně vyrobené elektrické energie k maximální možné, není primárně odlišný mezi tlakovodními (PWR) a varnými (BWR) reaktory na základě samotného typu reaktoru, ale spíše závisí na konkrétním designu elektrárny, její údržbě a provozních podmínkách. Neexistují obecná data, která by jednoznačně ukazovala na systematicky vyšší či nižší faktor využití u jednoho typu oproti druhému.

Pozn. 5: Elektrárna Forsmark má tři varné reaktory, které mají roční výrobu cca 25 TWh elektrické energie, což je zhruba šestina celkové spotřeby elektřiny ve Švédsku.

Společnost Vattenfall vlastní 66 % společnosti Forsmarks Kraftgrupp. Mellansvensk Kraftgrupp vlastní 25,5 %, přičemž Fortum je

←
Tab. 1.1: Oskarshamn – parametry jednotlivých bloků (zdroj: wikipedia)

↩
Tab. 1.2: Jaderná elektrárna Forsmark – parametry jednotlivých bloků

VÝZKUM, VÝVOJ A NOVÉ TECHNOLOGIE

největším akcionářem, a Uniper (Sydkraft Nuclear Power) vlastní 8,5 %. Bloky začaly dodávat energii v letech 1980 až 1985 a jejich stabilní a dlouhodobá výroba je pro blok 3. doložena na následujícím grafu.

Provoz a výroba elektrické energie je stabilní, z grafů na obrázcích Obr. 1.1.a; 1.1.b; 1.1.c se dá identifikovat větší oprava, rekonstrukce nebo odstavení z jiných důvodů. Lze tedy konstatovat, že blok 3 měl v roce 2009 větší „výpadek“.

Vlastnické struktury jaderné energetiky severní části Evropy

Vlastnické struktury v jaderné energetice ve Finsku a Švédsku jsou ukázány na následujících obrázcích Obr. 1.2; 1.3.

V současnosti by Švédsko chtělo svých pět nejmodernějších reaktorů v elektrárnách Ringhals (3 a 4) a Forsmark (bloky 1 až 3) provozovat až 80 let.

Pro elektrárnu Forsmark, kde byly bloky 1 až 3 postupně uváděny do provozu v letech 1980, 1981, 1985, to znamená provoz až do roku 2065.

Ze zpráv v médiích z července 2025, lze citovat: „po dvouletém důkladném posuzování technologií SMR dospěla společnost Fortum k závěru, že BWRX-300 je vhodným výběrem pro možné nasazení ve Finsku a Švédsku“.

Celosvětová výstavba BWR

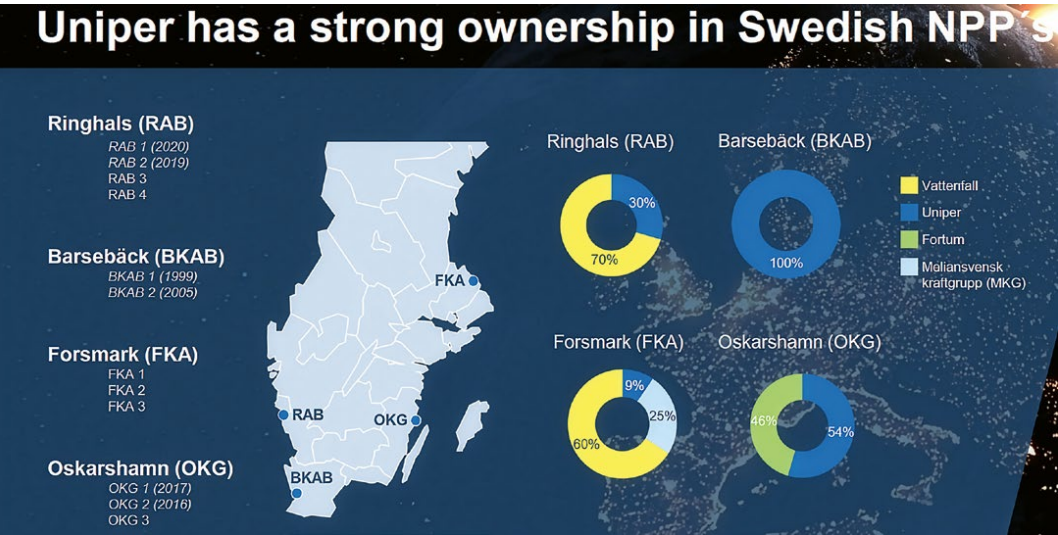
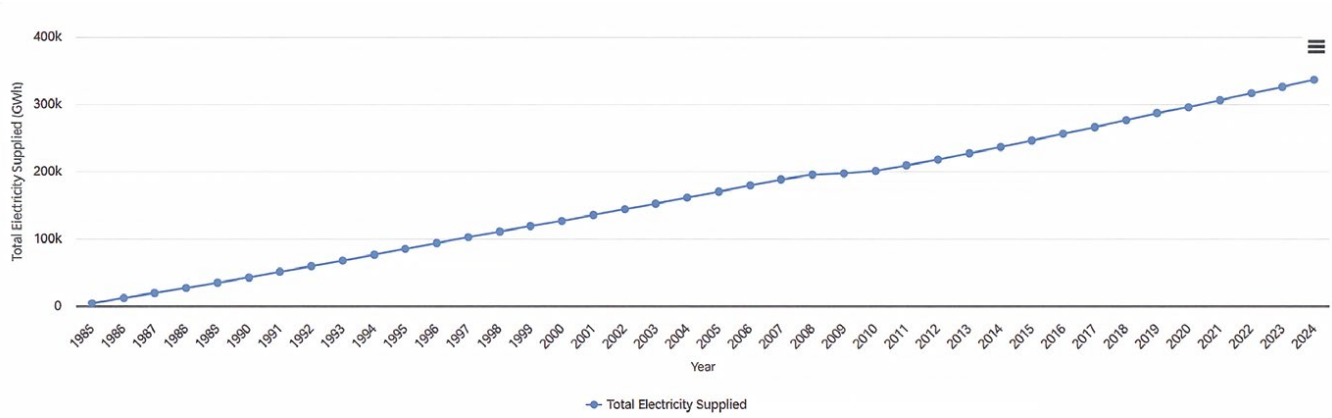
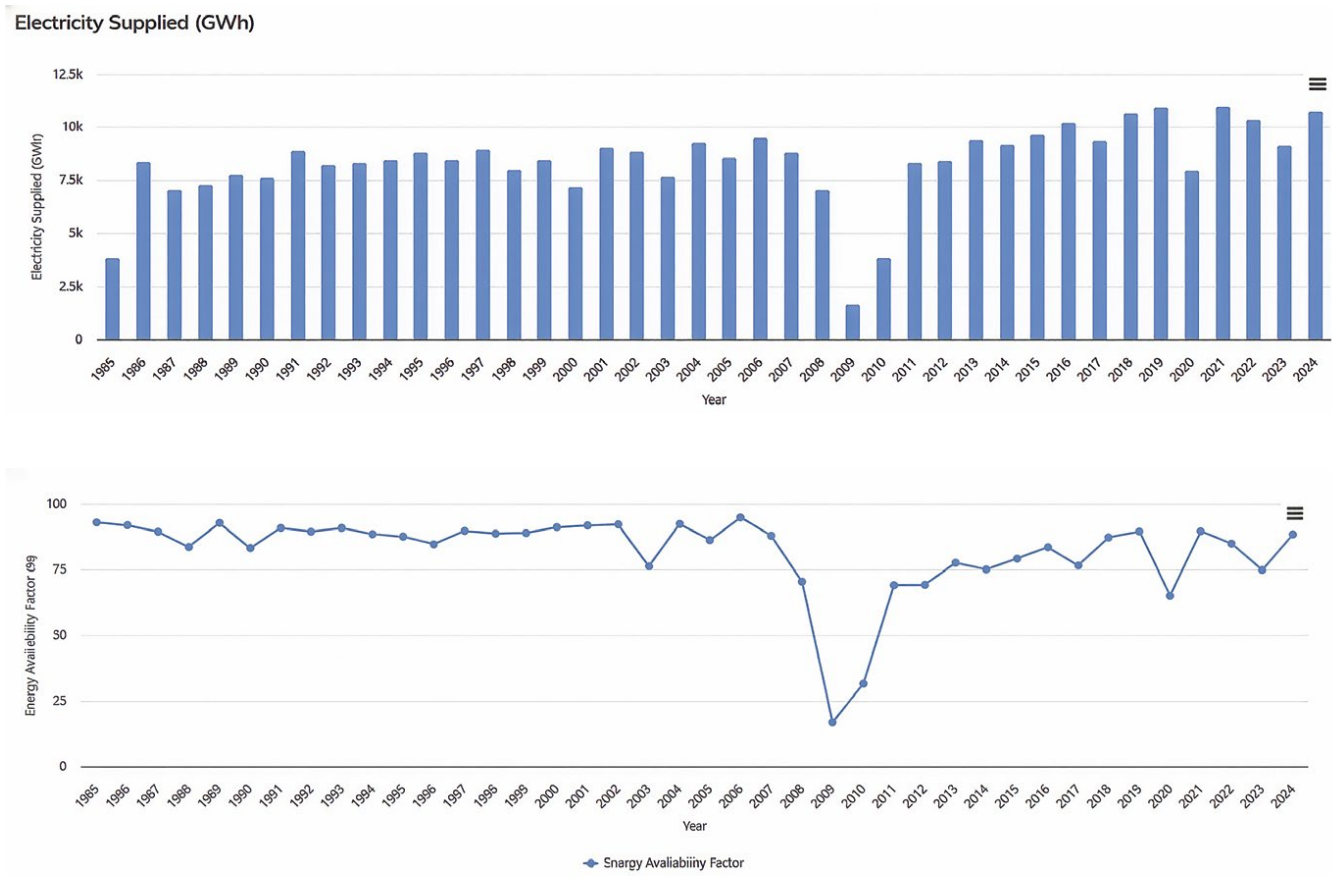
Pokud se týká výstavby bloků BWR ve světě, literatura [4] uvádí v Tab. 1.3, že je plánována výstavba šesti bloků ABWR (všechny v Japonsku) a 16 bloků PWR (v Asii, Africe, Evropě), v poměru ABWR/PWR = 1 : 2,6 (tedy lepším ve prospěch BWR, než je současný poměr provozovaných jaderných elektráren).

BWRX-300

V našem evropském regionu je zájem o varné reaktory BWR, a zejména o malé modulární BWRX-300, např. v Polsku a Estonsku, a rovněž v některých skandinávských zemích. Zde bych zmínil, že v ČR byly a jsou varné reaktory BWR na okraji zájmu z důvodu orientace na PWR/VVER, a také kvůli jejich nesprávnému spojení s RBMK. V poslední publikované zprávě

↓
Obr. 1.1.a: Provozní historie jaderné elektrárny Oskarshamn 3, blok 3 – dodávka elektřiny (GWh)

↓ ↓
Obr. 1.1.b: Provozní historie jaderné elektrárny Oskarshamn 3, blok 3 – faktor dostupnosti elektrické energie (%)

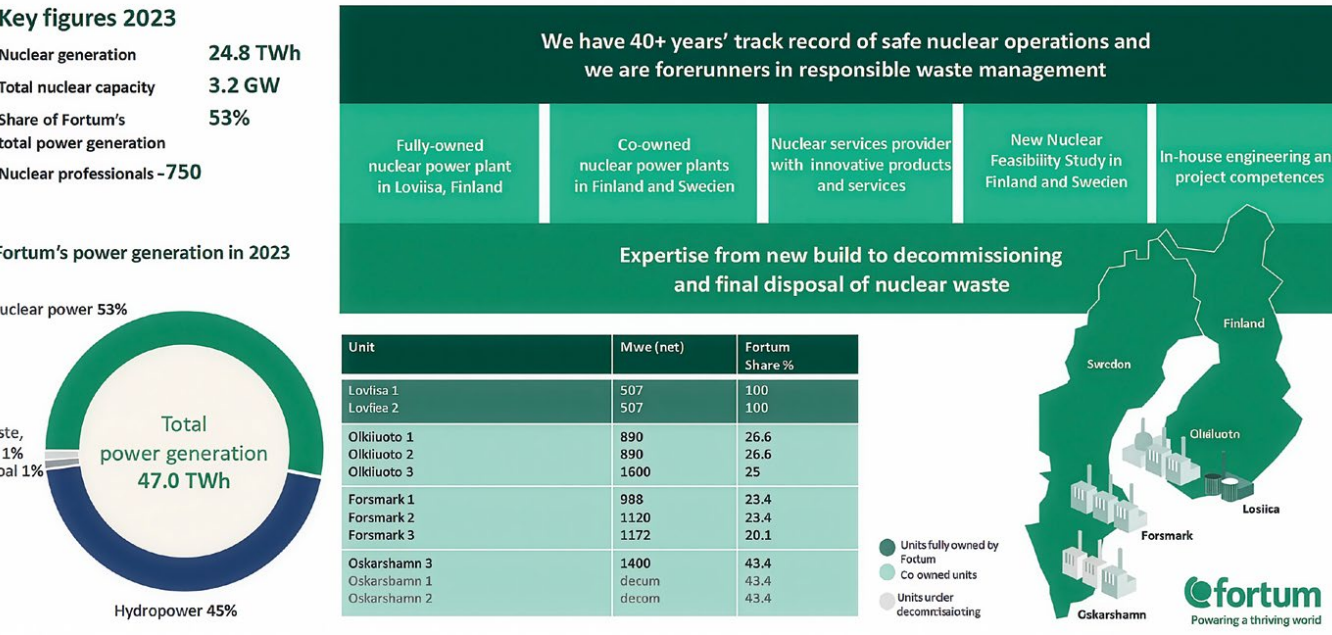


↑
Obr. 1.1.c: Provozní historie jaderné elektrárny Oskarshamn 3, blok 3 – celková dodaná elektřina (GWh)

←
Obr. 1.2: Vlastnictví společnosti UNIPER ve švédských elektrárnách [7]

↙
Obr. 1.3: Společnost FORTUM jako významný provozovatel v severní části Evropy

Fortum - We are a strong Nordic nuclear operator



Country	Code	Reactor Name	Type	Model	Capacity [MW]			Operator	NSSS Supplier	Expected Construction Start
					Thermal	Gross	Net			
CHINA	CN-904	FANGCHENGANG-5	PWR			1000				
CHINA	CN-905	FANGCHENGANG-6	PWR			1000				
CHINA	CN-90	LIANJIANG-2	PWR	CAP1000	3400	1224	1224	ZINPC	CFHI	2024-4
CHINA	CN-916	LUFENG-1	PWR	CPR-1000			1000	LFNPC		
CHINA	CN-917	LUFENG-2	PWR	CPR-1000			1000	LFNPC		
CHINA	CN-59	SN-1	PWR	CAP1400			1834	SNPOP	SNERDI	
CHINA	CN-60	SN-2	PWR	CAP1400			1834	SNPOP	SNERDI	
CHINA	CN-931	XUDABU-2	PWR	CPR-1000	2905	1290	1000	LNPC	OEC	
CHINA	CN-902	ZHANGZHOU-3	PWR	HPR1000	3180	1214	1129	ZGZEC	CFHI	2024-2
CHINA	CN-933	ZHANGZHOU-4	PWR	HPR1000	3180	1214	1129	ZGZEC	CFHI	
EGYPT	EG-4	ELDABAA-4	PWR	VVER-1200	3200	1200	1100	NPPA	JSC ASE	2024-1
FINLAND	FI-6	HANHIKIVI-1	PWR	VVER V-522	3200			FV	AEM	
HUNGARY	HU-5	PAKS-5	PWR	VVER V-527	3200	1265	1185	PAKS II	AEM	
HUNGARY	HU-6	PAKS-6	PWR	VVER V-527	3200	1265	1185	PAKS II	AEM	
INDIA	IN-33	GORAKHPUR-1	PHWR	PHWR-700		700	630	NPCL		
INDIA	IN-34	GORAKHPUR-2	PHWR	PHWR-700		700	630	NPCL		
INDIA	IN-17	KAIGA-5	PHWR		2166	700	630	NPCL	NPCIL	
INDIA	IN-18	KAIGA-6	PHWR		2166	700	630	NPCL	NPCIL	
IRAN, ISL. REP	IR-5	BUSHEHR-3	PWR	VVER V-529	3000	1000	915	NPPCCO	JSC ASE	
IRAN, ISL. REP	IR-9	DARKHOVIN	PWR	IR-360	1113	360	330	NPPCCO		
JAPAN	JP-78	HAMAOKA-6	BWR	ABWR	3920	1400	1350	CHUSU		
JAPAN	JP-69	HIGASHI CORI-1 (TEPCO)	BWR	ABWR	3926	1385	1343	TEPCO	HHG	
JAPAN	JP-74	HIGASHI CORI-2 (TEPCO)	BWR	ABWR	3926	1385	1343	TEPCO		
JAPAN	JP-72	HIGASHI CORI-2 (TOHOKU)	BWR	ABWR			1067	TOHOKU		
JAPAN	JP-62	KAMINOSEKI-1	BWR	ABWR	3926	1373	1325	CHUGOKU		
JAPAN	JP-63	KAMINOSEKI-2	BWR	ABWR	3920	1373	1225	CHUGOKU		

↑
Tab. 1.3: Reaktory plánované k výstavbě ve stavu k 31. prosinci 2023 ^[4]

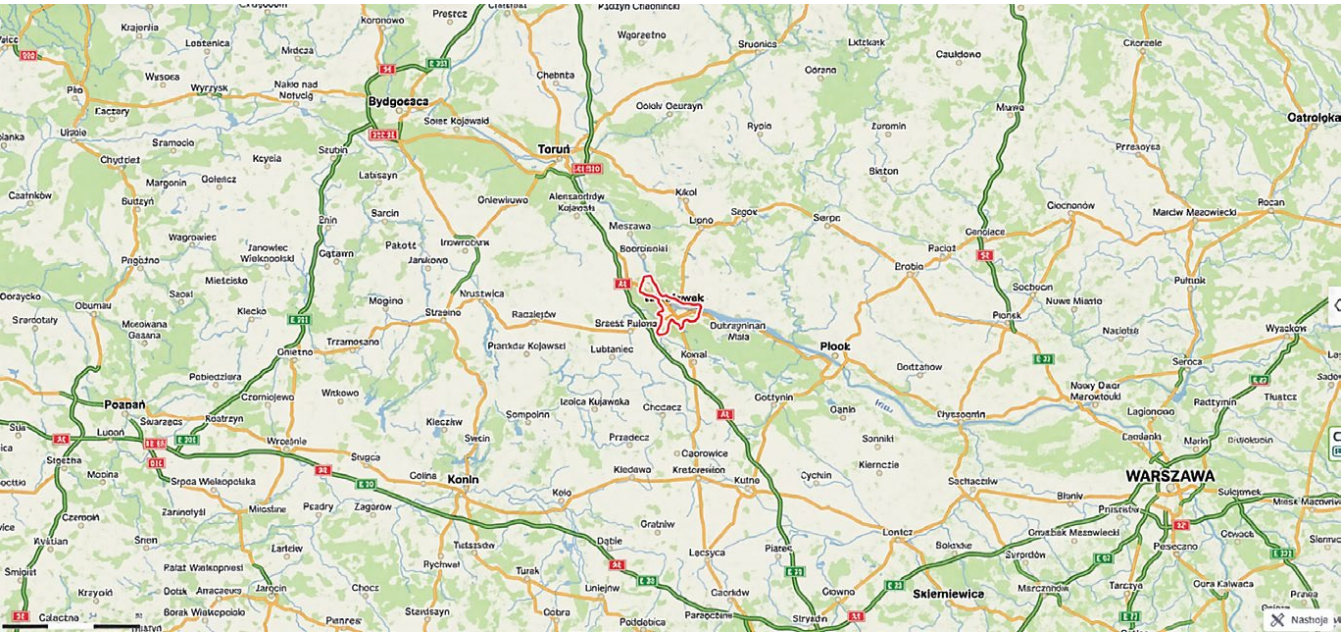
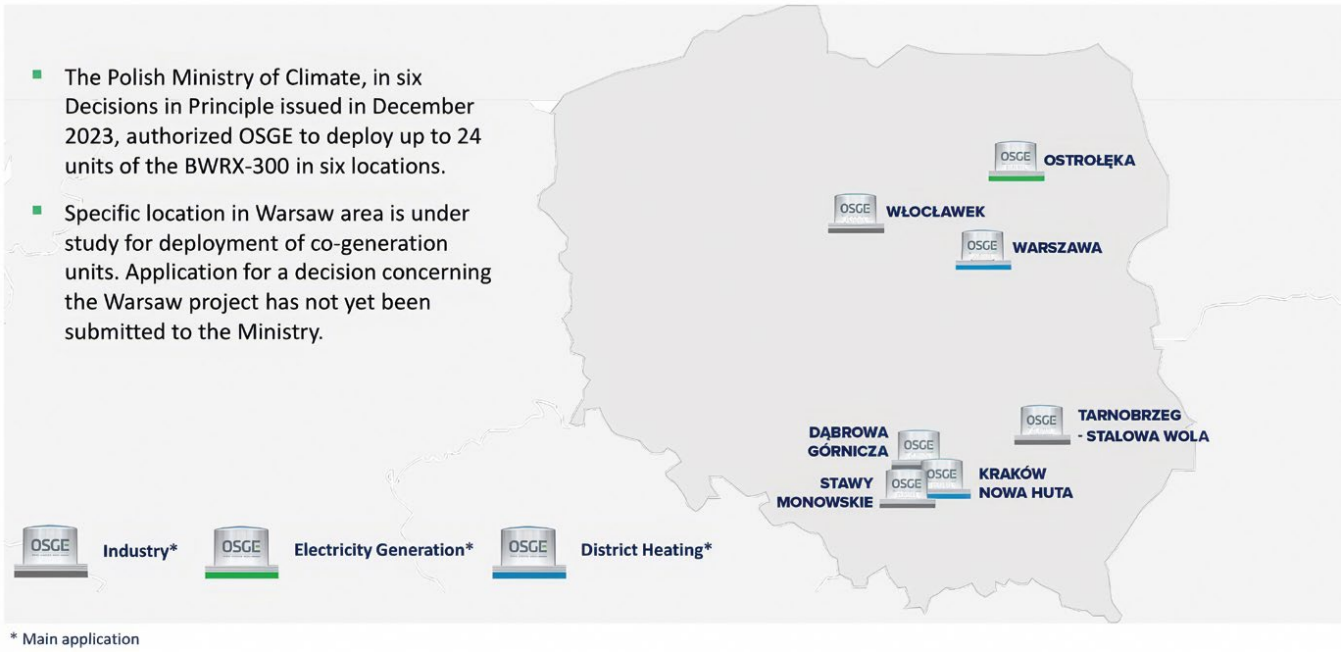
o jaderné energetice roku 2025 ^[5] je v části Za-vedení malých modulárních reaktorů, uvede-na informace o plánu výstavby dvojice BWRX-300 v Estonsku a o tom, že o využití tohoto SMR (MMR) uvažují i severské státy – Finsko a Švéd-sko. O realistických a již řešených projektech BWRX-300 v Polsku tam není ani zmínka, a pro-to je zařazena následující podrobná část.

Společnost ORLEN v Polsku a Česku

V Česku má o BWRX-300 zájem ORLEN Unipe-trol, také proto, že polská holdingová společ-nost OSGE ORLEN (Orlen Syntos Green Ener-gy) připravuje v Polsku výstavbu až 24 bloků v šesti, resp. sedmi lokalitách – viz ^[6]:

Dne 17. dubna 2023 bylo zveřejněno 7 lokalit elektráren se 2–4 SMR, které jsou určeny pro:

- energeticky náročný průmysl: (1) Włocławek (Anwil Włocławek ze skupiny Orlen, 2–4 reaktory), (2) Stawy Monowskie (Synthos, 2–4 reaktory), (3) Dąbrowa Górnicza (ArcelorMittal, 4 reaktory), (4) Tarnobrzeg–Stalowa Wola (Agentura pro průmyslový rozvoj, každý po 2 reaktorech);
- energetický průmysl: (5) Ostrołęka (Energia ze skupiny Orlen, 4 reaktory);
- dálkové vytápění: (6) Krakov Nowa Huta (ArcelorMittal, 2–4 reaktory), (7) Varšava (PGNiG Termika ze skupiny Or-len, 2–4 reaktory, cca 25 km od hlavního města, lokalita je analyzována pro výstavbu kogene-rační jednotky, v roce 2024 nebyla ještě schvá-



lena polským Ministerstvem klimatu a životní-ho prostředí).

Włocławek je jedním z nejstarších měst v Polsku (první písemná zmínka roku 1148), le-žícím na Visle (Włocławské jezero) v Kujav-sko-pomořském vojvodství. Historicky spjaté s Kujavami a włocławským biskupstvím, je dů-ležitým administrativním a hospodářským cen-trem regionu.

Město nabízí dobrou infrastrukturu a jeho centrální poloha zajišťuje dobrou dopravní do-

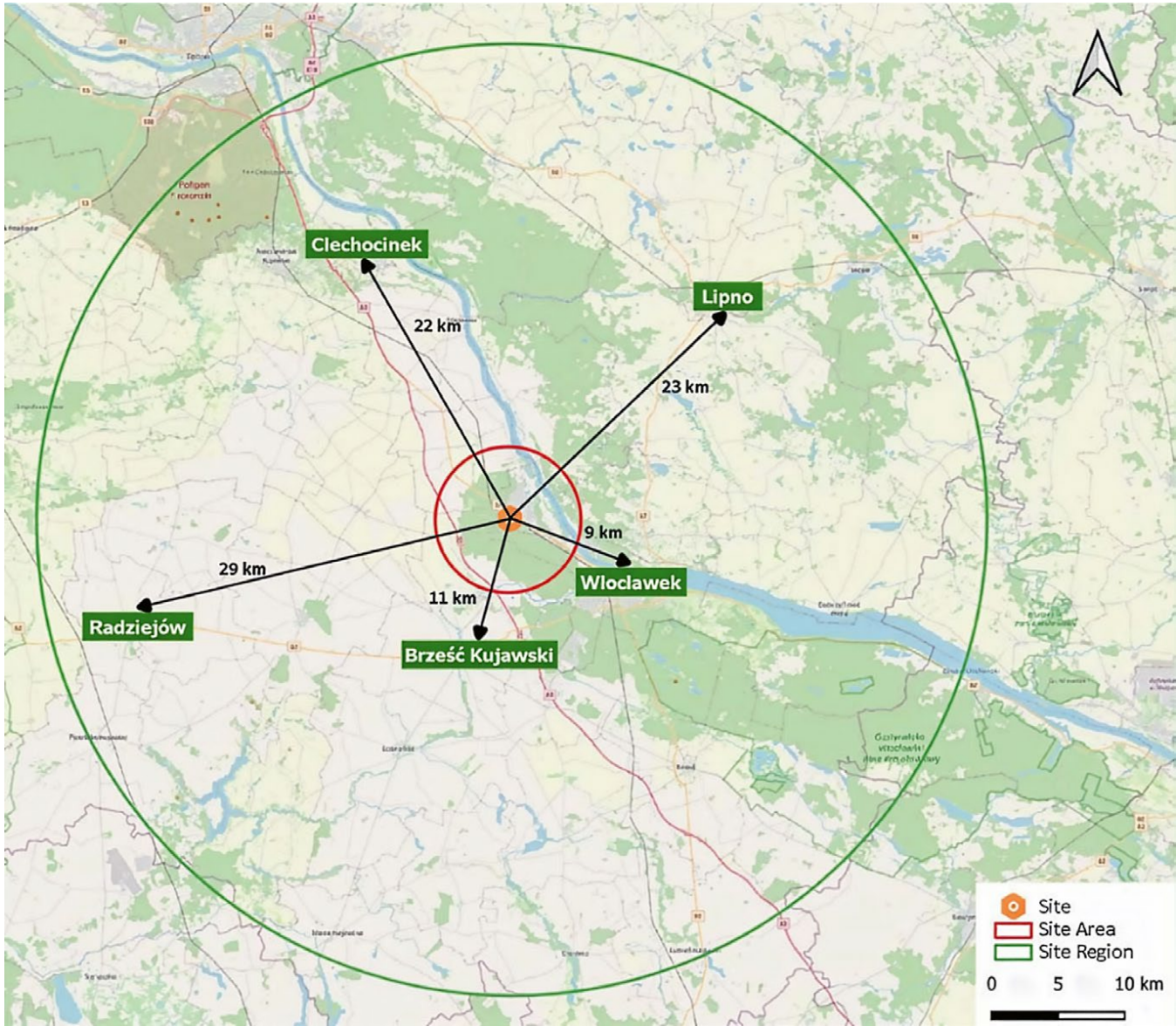
stupnost díky státní silnici č. 91, železniční tra-ti č. 18 a blízkosti dálnice A1. Jeho rozloha je 84,3 km², a v současné době zde žije přes 100 tisíc obyvatel.

Lokalita Włocławek se nachází na západní hranici města Włocławek, (počet obyvatel v ti-sících):

- cca 22 km severozápadně od lokality se nachází centrum města Ciechocinek, (10),
- cca 23 km severovýchodně od lokality se nachází centrum města Lipno, (15),

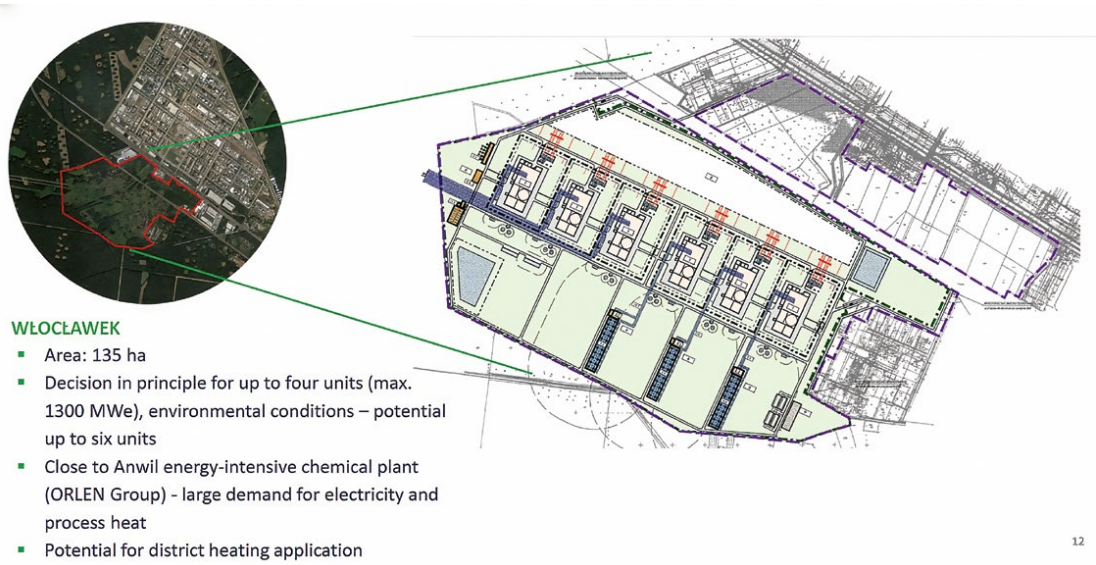
↑ ↑
Obr. 2.1: Vybrané lokality na mapě Polska, barevně odlišena využitelnost SMR: pro průmysl (černý proužek), pro výrobu elektřiny (zelený proužek), pro dálkové vytápění (modrý proužek)

↑
Obr. 2.2: Město / lokalita Włocławek na mapě Polska



↑
Obr. 2.3: Vzdálenost lokality Włocławek od nejbližších městských center

↘
Obr. 2.4: Dispozice nejpokročilejšího projektu v lokalitě Włocławek (4 bloky, potenciálně až 6) [8]



- cca 9 km jihovýchodně od lokality se nachází centrum města Włocławek, (100),
 - cca 11 km jižně od lokality se nachází centrum města Brześć Kujawski, (5),
 - cca 29 km západně od lokality se nachází město Radziejów, (40).
- Celkový počet obyvatel ve větších sídlech v okruhu 30 km od elektrárny je 170 tisíc.
- Pro ilustraci jsou zde uvedeny dva mapové obrázky umístění lokality Włocławek, protože geograficky podobné lokality se nacházejí rovněž v Česku.

Mezinárodní Evropská pracovní skupina zaměřené na technologii BWRX-300

Holding OSGE byl vybrán do programu Projekt PHOENIX, který zahájilo Ministerstvo zahraničí USA. Program PHOENIX je zaměřen na podporu procesu energetické transformace ve střední Evropě, konkrétně na výstavbu malých modulárních reaktorů jako náhrady za uhelné elektrárny.

Návrh společnosti OSGE na zřízení pracovní skupiny PWG zaměřené na technologii BWRX-300 byl schválen Evropskou komisí. OSGE vede tuto PWG, která zahrnuje 17 dalších subjektů z deseti členských států EU a Norska, přičemž v současné době se o ni hlásí i další organizace.

Projekt Phoenix v České a Slovenské republice

Výběrového řízení o 75 % dotaci na studii proveditelnosti a technické poradenství v ceně do 2 milionů amerických dolarů se zúčastnilo téměř 30 společností z 8 zemí střední a východní Evropy. Mezi třemi úspěšnými kandidáty byli Orlen Synthos Green Energy (OSGE) z Polska, Slovenské elektrárne, a.s. a společnost Sokolovská uhelná, právní nástupce, a.s. (SUAS).

Z veřejných médií je známo, že projekt Phoenix v SUAS Group v současnosti probíhá, ale autor článku se dohodl s představiteli akciové společnosti, že vzhledem k rané fázi řešení projektu nedává nyní smysl o něm psát v odborném časopise.

Vybraným typem SMR v Polsku je BWRX-300 a naskýtá se možnost synergických efektů s projektem SUAS – Sokolovská uhelná, proto-

 OSGE (Poland)	 GE-Hitachi Nuclear Energy International branch in Poland (Poland)
 AIC S.A. (Poland)	 Blue Bird Energy (Bulgaria)
 Bouygues Travaux Publics (France)	 CNPSA** (Romania)
 Fermi Energia (Estonia)	 Equipos Nucleares S.A. (ENSA) (Spain)
 HELEN (Finland),	 GENUSA* (Spain)
 Kärnfull Next (Sweden)	 Hitachi Europe branch in Poland (Poland)
 Orange Hills Energy* (The Netherlands)	 Norsk Kjekraft (Norway)
 Synthos Green Energy (Poland)	 ORLEN (Poland)
 Vattenfall AB (Sweden)	 ÚJV Řež (Czech Republic)

že průmyslový závod Sokolovská uhelná – Vřesová, má podobnou strukturu jako závod Anwil ze skupiny ORLEN.

Pro ilustraci projekt ORLEN Synthos zahrnuje výstavbu a provoz jaderné elektrárny v rozsahu:

- až šest energetických bloků, kde každý blok obsahuje modulární jaderný reaktor BWRX-300, budovu velínu, turbínovou halu (turbína, generátor), s celkovým výkonem do 2 000 MW_e, tedy v případě výběru BWRX-300 s celkovým výkonem 1 800 MW_e;
- pomocné budovy (včetně skladu vyhořelého paliva, meziskladu radioaktivního odpadu, kancelářských budov, dílen);
- nezbytnou technickou infrastrukturu včetně přívodu vody, čerpací stanice, potrubí chladicí vody, infrastruktury chladicích systémů (chladicí věže s mechanickým/přirozeným tahem), elektrické rozvodny, přímého elektrického vedení do průmyslových závodů Anwil.

Další české lokality

Návrh změny Politiky územního rozvoje České republiky, který 27. srpna 2025 projednala vláda ČR, zmiňuje pět nových lokalit pro umístění jaderných reaktorů. Celkem už jich je v návrhu uvedeno třináct.

Dokument „Návrh Změny č. 8 Politiky územního rozvoje České republiky“ vedle rozšíření jaderných elektráren Dukovany a Temelín otevírá cestu k budoucí stavbě jaderných bloků v areálu uhelných elektráren Ledvice, Po-

↑
Obr. 2.5: Seznam členů pracovní skupiny projektu BWRX-300

čerady, Prunéřov, Tušimice, Dětmárovice a Mělník. Jedná se o tradiční lokality společnosti ČEZ.

Je zaznamenáníhodné, že v německém městě Olbernhau v saském Krušnohoří (cca 10 tisíc obyvatel) vzdáleném 40 km od Tušimic jsou již nyní organizovány protesty a petice proti výstavbě až 6 bloků SMR (v případě Rolls-Royce to znamená 6 × 470 = 2 820 MW).

Nově k nim však přibýly lokality, o něž mají zájem jiní investoři:

- Jedním z nich je již zmíněný SUAS Group – Sokolovská uhelná, a.s.
- Další společností, která uvažuje o jaderné energii, je Orlen Unipetrol. Podnik s polským vlastníkem zvažuje rovnou dvě lokality – rafinerii Litvínov a areál chemičky ve středočeských Neratovicích. Průmyslový podnik Neratovice (dříve Spolana) patří do Anwil ze skupiny ORLEN, což je polská chemička Zakłady Azotowe ANWIL Spółka Akcyjna.
- O investici do jaderného bloku v druhé rafinerii v Kralupech nad Vltavou uvažuje polský Synthos. Koncerny Orlen a Synthos na domácím polském trhu vytvořily společný podnik OSGE ORLEN, který chce ve velkém stavět varné reaktory BWRX-300 od konsorcia GE Vernova/Hitachi.

Slovenská účast v projektu Phoenix

Pozornost na možnosti využití BWRX-300 je zaměřena i na Slovensko. Ve fázi vypracování je Studie proveditelnosti nasazení SMR v rámci amerického projektu Phoenix.

Již dříve v kapitole 2.2 uvedený projekt Phoenix spadá pod program amerického Ministerstva zahraničí Foundational Infrastructure for the Responsible Use of Small Modular Reactor ve spolupráci s programem veřejného a soukromého sektoru pro malé modulární reaktory amerického Ministerstva obchodu, a jeho cílem je podpora transatlantické spolupráce při zavádění SMR v Evropě a Eurasii.

Vzhledem k tomu, že projekt je spolufinancován americkou vládou (letos po nástupu Donalda Trumpa do úřadu amerického prezidenta, byl projekt Phoenix na 90 dní pozastaven, ale

poté znovu spuštěn), je pochopitelné, že zájem se soustředí na SMR vyvíjené v USA.

Vývojově nejdál je právě BWRX-300, a Studie proveditelnosti uvažuje pro nasazení BWRX-300 (nebo případně AP300, NuScale, Holtec-300) na lokalitu Elektrárny Vojany (vlastněnou SE, a.s.), a/nebo do regionu Košice (US Steel Košice, MHTH – Tepláreň Košice).

Články ^[1], ^[2] navazují na přehledovou sérii článků ^[3], rozdíl je v tom, že série byla zaměřena prakticky pouze na sekundární okruh (parogenerátor, parní turbína a elektrický generátor) primárním okruhem (jaderný reaktor) se prakticky nezabývala.

Tento článek je zaměřen zejména na primární okruh – jaderný reaktor, kde v oblasti lehkovodních reaktorů (LWR) jsou projektově k dispozici dva základní typy:

1. tlakovodní reaktor PWR (Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor), resp. ruský typ VVER (Vodjanoj Energetičeskij Reaktor),
 2. varný reaktor BWR (Boiling Water Reactor).
- Tlakovodní reaktory VVER jsou v Česku a na Slovensku velmi dobře známy, a tak článek se věnuje varným reaktorům BWR, pochopitelně také s odběrem tepla pro soustavy SZT, jako ^[3].

Teoreticky (podle Carnotova cyklu) mohou mít reaktory BWR vyšší účinnost (cca 40 %) než reaktory PWR (cca 34 %), a mají aplikovány ve větší míře pasivní bezpečnostní systémy. Prakticky to má však řadu podmínek a výhod/nevýhod – viz podkapitola 3.3.

Zvyšování účinnosti je u BWR dáno menším počtem zařízení v tepelném cyklu (chybí parogenerátor), na druhou stranu je zase snižována nižšími tepelnými parametry reaktoru.

Provozní zkušenosti BWR a projektové řešení BWRX-300

Formulace textu vychází z faktu probíhající renesance bloků s varnými reaktory BWR v Evropě. Stávající portfolio potenciálních dodavatelů nových jaderných bloků do Evropy je všeobecně popisováno takto:

- KHNP (typ PWR), korejský státní podnik má jediný projekt – 2 + 2 kusy u nás v EDU a ETE;

Reaktor	Typ reaktoru	Výkon [MWe]		Zahájení výstavby	Připojení k síti	Uvedení do provozu	Doba výstavby do připojení / provozu [měsíc]
		Čistý	Hrubý				
Kašiwazaki-Kariwa-1	BWR-5, 251-764	1 067	1 100	5. 6. 1980	13. 2. 1985	18. 9. 1985	57/64
Kašiwazaki-Kariwa-2	BWR-5, 251-764	1 067	1 100	18. 11. 1985	8. 2. 1990	28. 9. 1990	52/59
Kašiwazaki-Kariwa-3	BWR-5, 251-764	1 067	1 100	7. 3. 1989	8. 12. 1992	11. 8. 1993	44/53
Kašiwazaki-Kariwa-4	BWR-5, 251-764	1 067	1 100	5. 3. 1990	21. 12. 1993	11. 8. 1994	33/41
Kašiwazaki-Kariwa-5	BWR-5, 251-764	1 067	1 100	20. 6. 1985	12. 9. 1989	10. 4. 1990	51/58
Kašiwazaki-Kariwa-6	ABWR	1 315	1 356	3. 11. 1992	29. 1. 1996	7. 11. 1996	39/44
Kašiwazaki-Kariwa-7	ABWR	1 315	1 356	1. 7. 1993	17. 12. 1996	2. 7. 1997	42/48

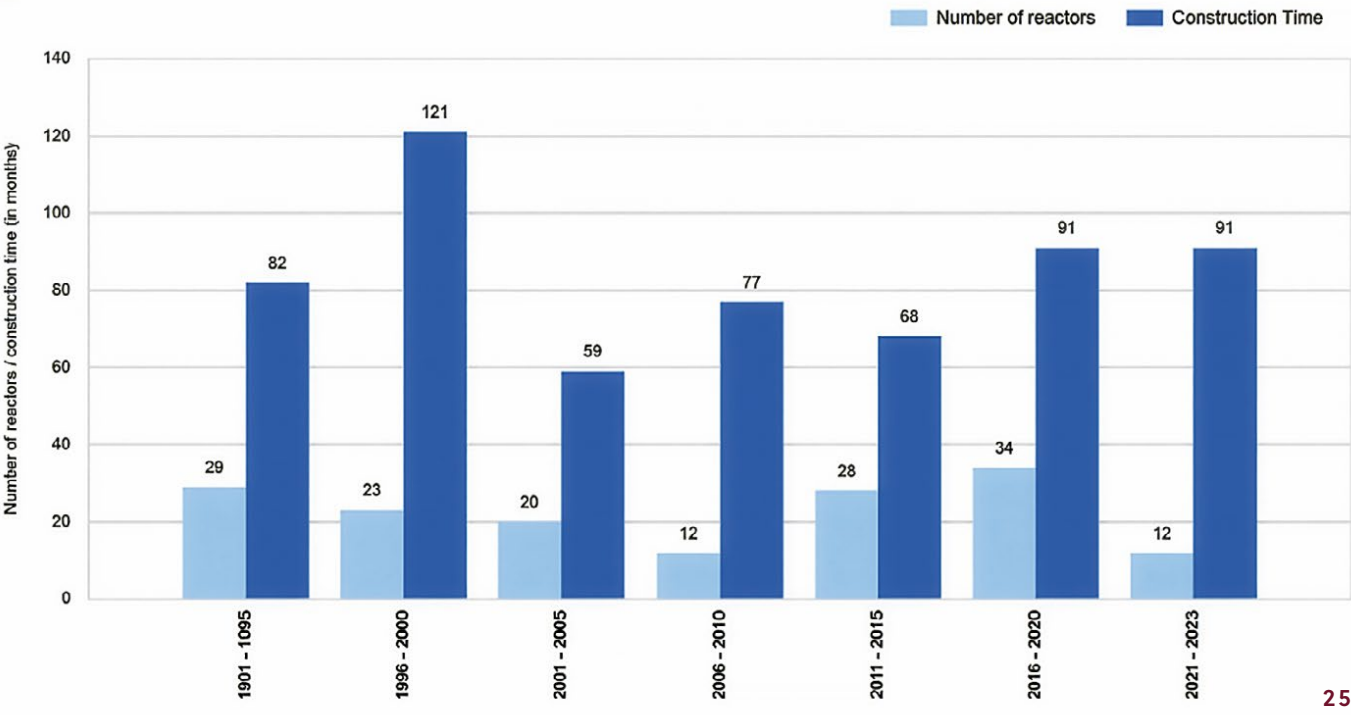
Doba do připojení k síti, resp. do plného komerčního provozu se trendově neustále zkracovala /s výjimkou bloku 5, kde nastaly neočekávané okolnosti/, až do dosažení „světového rekordu“ u posledních dvou bloků (rychleji než 3,5 roku).

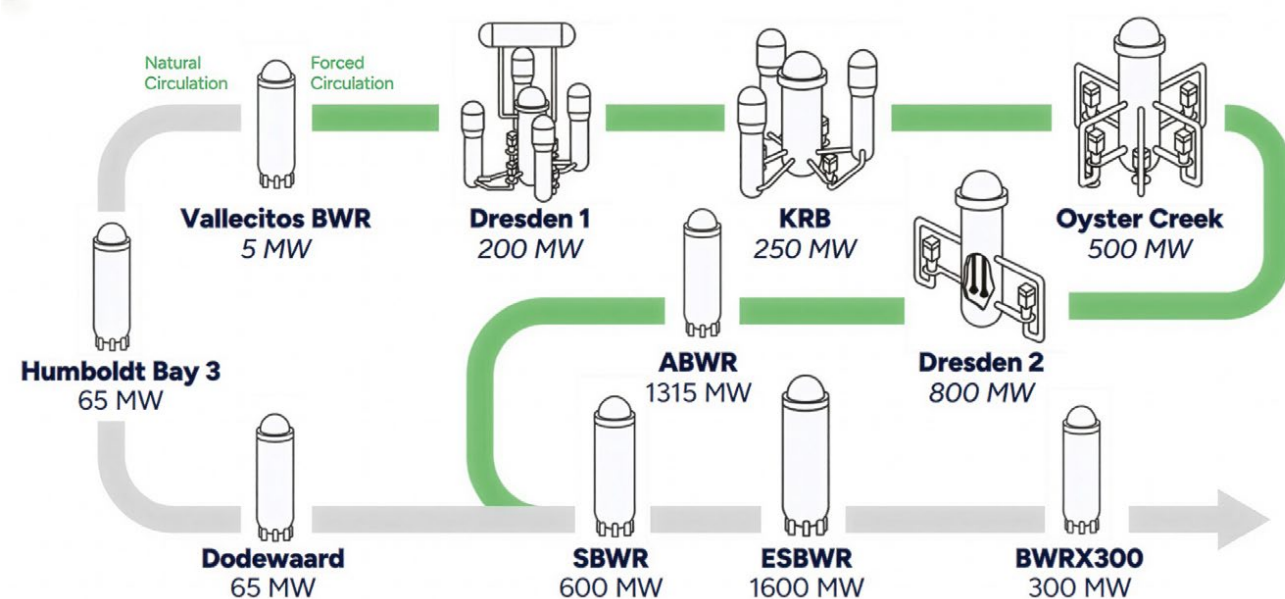
- Westinghouse (typ PWR) má 3 bloky v přípravě v Polsku, ale smluvní závazek je výrazně měkčí než v projektu EDU a ETE. Deklarace o výstavbě 1 bloku na Slovensku v Jaslovských Bohunicích je na ještě nižší úrovni;
- EDF (také typ PWR), francouzský státní podnik dodržuje pokyn stavět doma a neexponovat se jinde.

- Čínské firmy a ruský Rosatom jsou v Evropě nyní bez šance na dodávku. Přitom predikce IEA, WNA, IAEA a ostatně i EK, mluví o zdvojnásobení poptávky po elektřině do roku 2050, což bez cca 30–50 velkých bloků nelze naplnit. Vzhledem k uvedeným skutečnostem byly napsány dva odborné články ^[1] a ^[2], které z pohledu portfolia dodavatelů nových jaderných

← Tab.3.1: Tabulka s dobou výstavby jednotlivých bloků

↓ Obr. 3.2: Celosvětový průměrný čas výstavby v měsících (k 31. prosinci 2023)





↑
Obr. 3.3: Graf 60 let
evolučního vývoje
technologie varných
reaktorů [8]

bloků chtějí upozornit na možnosti rozšíření portfolia pro Evropu o dodavatele z Japonska, i o jiné dodavatele z USA než jen Westinghouse.

Jsou tím myšleny bloky s varnými reaktory BWR od General Electric (USA) a Hitachi (Japonsko), jak v oblasti malých SMR (BWRX-300), tak i velkých bloků (SBWR, ESBWR).

Literatura [2] se soustřeďuje na bloky BWR již dlouhodobě provozované, tzn. jen velké, v rámci typové vývojové řady reaktorů GE-Hitachi: BWR-5, ABWR, a nové dosud neprovozované typy SBWR, ESBWR.

BWR

Příkladem již dlouho provozované jaderná elektrárny může být japonská Kašiwazaki Kariwa, v roce 2025 nejvýkonnější na světě s instalovaným hrubým výkonem 8 212 MW (5 bloků typu BWR-5, tj. $5 \times 1\,100\text{ MW}$ + 2 bloky typu ABWR, tj. $2 \times 1\,356\text{ MW}$) – viz Tab. 3.1.

Je známo, že po havárii FUKUSHIMA byly odstaveny všechny japonské bloky. Je méně známo, že v polovině ledna 2026 dojde k restartu "šestky" jaderné elektrárny Kašiwazaki-Kariwa-6. Velký zájem o restart prvního obřího bloku (ABWR, 1356 MWe) je evidentní z faktu, že guvernér regionu Niigata povolil restart až letos v listopadu 2025, a už v lednu 2026 bude blok spuštěn.

Důležitý je také fakt, že bloky 6 a 7 elektrárny Kašiwazaki-Kariwa, byly vystavěny a při-

pojeny k síti v době kratší než 3,5 roku, což je světový rekord v rychlosti výstavby. Zároveň japonské konsorcium GE-Hitachi by mohlo být novým dodavatelem do Evropy, a rychlá výstavba nových jaderných bloků by Evropě hodně pomohla.

V současnosti GE-Hitachi projektuje a nabízí blok ESBWR s výkonem 1 600 MWe, s dobou výstavby cca 30 měsíců. Tato skutečnost však ještě není uvedena v literatuře [4], která zachycuje skutečnosti známé do konce roku 2023. Obecně je doba výstavby bloků uvedena rovněž v literatuře [4], přičemž cca 2/3 bloků je typu PWR.

Historický vývoj průběžných konstrukčních zjednodušení BWR byl ukázán v [1]. Poslední typ z řady BWR s nucenou cirkulací – ABWR; a poslední typ z řady BWR s přirozenou cirkulací – BWR-5 (Dodeeward); byly integrovány do zjednodušeného designu SBWR s přirozenou cirkulací SBWR. Na Obr. 3.3 jsou u jednotlivých typů reaktorů doplněny jejich nominální elektrické výkony.

SBWR je pokročilý koncept lehkovodního varného reaktoru, který využívá přirozenou cirkulaci k zajištění proudění do aktivní zóny reaktoru. V případě nouze se používá systém chlazení aktivní zóny poháněný gravitací. Reaktor je odtlakován a voda z vyvýšeného hasicího bazénu proudí gravitačně do reaktorové nádoby, aby byla aktivní zóna reaktoru zakryta.

Koncept také zahrnuje pasivní systém chlazení kontejmentu, ve kterém voda proudí gravitačně a chladí stěnu hasicího bazénu. Po dobu nejméně tří dnů není vyžadován žádný zásah obsluhy. Použití těchto a dalších pasivních systémů umožňuje eliminaci nouzových diesellových generátorů, čerpadel na chlazení aktivní zóny a čerpadel na odvod tepla, což zjednodušuje konstrukci elektrárny, snižuje náklady a zjednodušuje licencování. Koncept byl vyvinut společnostmi General Electric (GE), Bechtel a Massachusetts Institute of Technology (MIT), s podporou Electric Power Research Institute (EPRI) a Ministerstva energetiky Spojených států (DOE).

Zjednodušený varný reaktor SBWR byl předložen ke schválení a licencování Komisi pro jaderný dohled Spojených států, nicméně žádost byla stažena ještě před schválením; koncept však zůstal pro konstruktéry společnosti General Electric zajímavý a sloužil jako základ pro budoucí vývoj Economic simplified boiling water reactor (ESBWR).

Návrh ESBWR byl předložen ke schválení americké Komisi pro jaderný dohled v dubnu 2005 a certifikace návrhu byla udělena komisí NRC v září 2014.

BWRX-300 ve Švédsku

V současnosti šest švédských jaderných reaktorů produkuje asi 40 % švédské elektřiny. Změna politiky umožňující nové jaderné kapacity následovala po nástupu středopravé koaliční vlády v roce 2022, kterou vede premiér Ulf Kristersson, předseda politické strany Moderaterna (Umírnění). V srpnu 2025 oznámila společnost Vattenfall, že si vybere mezi BWRX-300 a Rolls-Royce SMR

Švédská společnost Vattenfall oznámila, že se rozhodla vybrat malé modulární reaktory pro novou jadernou kapacitu, přičemž do užšího výběru byly dva: BWRX-300 společnosti GE Vernova Hitachi a SMR společnosti Rolls-Royce.

Cílem je uvést do provozu novou jadernou kapacitu na poloostrově Värö, kde se nachází jaderná elektrárna Ringhals, a to do počátku 30. let 21. století. Vattenfall říká, že projekt bude

mít kapacitu 1,5 GW – tedy buď pět BWRX-300, nebo tři s 500 MW Rolls-Royce SMR.

V uplynulém roce 2024 byly posouzeny malé modulární reaktory obou společností, stejně jako alternativní varianta větších jaderných bloků buď – podle zpráv z června 2024 – Westinghouse, EDF nebo Korea Hydro & Nuclear Power (která údajně odstoupila v prosinci 2024, po dohodě s firmou Westinghouse).

Společnost uvedla, že oba SMR v užším výběru mají „osvědčenou technologii a zjednodušené návrhy, které integrují poznatky z předchozích jaderných projektů po celém světě“. A obě země používají palivo, pro které Vattenfall vytvořil dodavatelské řetězce.

Zpráva společnosti Vattenfall výběr zdůvodňuje také tím, že vývoj obou vybraných technologií postupuje v projektech jinde, přičemž společnost Ontario Power Generation přijala konečné investiční rozhodnutí o výstavbě první z flotily reaktorů BWRX-300 a Česká republika i Velká Británie si pro své projekty SMR vybraly Rolls-Royce SMR.

Výhody a nevýhody BWR vůči PWR [9]

Přechod z velkých bloků ABWR, SBWR, ESBWR na malé SMR (BWRX-300) popisoval článek [1]. Malý reaktor BWRX-300 byl popisován jen z hlediska vývojové návaznosti, projektování, a konstrukce, protože ještě žádný pilotní blok není v provozu.

Pokud se v tomto článku chceme věnovat provozním zkušenostem, je nutné se zaměřit na velké bloky BWR, které jsou ovšem vývojově starší. Zde jsou uvedeny obecné výhody a nevýhody.

Výhody BWR

- Reaktorová nádoba a související komponenty pracují při podstatně nižším tlaku, přibližně 70–75 barů (1 020–1 090 psi) ve srovnání s přibližně 155 bary (2 250 psi) v reaktoru PWR.
- Tlaková nádoba je ve srovnání s reaktorem PWR vystavena výrazně menšímu ozáření, a proto s věkem tak nekřehne.
- Provozují se při nižší teplotě jaderného paliva.

- Méně komponent díky absenci parogenerátorů, kompenzátorů objemu a příslušnému potrubí (starší reaktory BWR mají externí recirkulační smyčky, ale i toto potrubí je u moderních reaktorů BWR, jako je ABWR, eliminováno). Díky tomu jsou reaktory BWR provozovány snadněji.
- Nižší riziko (pravděpodobnost) prasknutí způsobujícího únik chladiva ve srovnání s reaktorem PWR a nižší riziko poškození aktivní zóny, pokud by k takovému prasknutí došlo. To je dáno menším počtem potrubí obecně, menším počtem potrubí velkého průměru, menším počtem svarů a absencí potrubí parogenerátorů. Hodnocení limitních potenciálů poruchy dle NRC ukazuje, že pokud by k takové poruše došlo, průměrný reaktor BWR by s menší pravděpodobností utrpěl poškození aktivní zóny než průměrný reaktor PWR, díky robustnosti a redundanci systému nouzového chlazení aktivní zóny (ECCS).
- Měření hladiny vody v tlakové nádobě je stejné pro normální i nouzový provoz, což vede ke snadnějšímu a intuitivnímu posouzení nouzových podmínek.
- Může pracovat při nižších úrovních hustoty výkonu aktivní zóny s využitím přirozené cirkulace bez nuceného proudění. To znamená, že BWR může být navržen tak, aby fungoval pouze s využitím přirozené cirkulace, takže recirkulační čerpadla jsou zcela eliminována, (např. nový design ESBWR využívá 100% přirozenou cirkulaci).
- BWR nepoužívají kyselinu boritou k regulaci štěpného spalování, aby se zabránilo tvorbě tritia (kontaminace turbín), což vede k menší pravděpodobnosti koroze uvnitř reaktorové nádoby a potrubí.

Poznámka: Koroze způsobená kyselinou boritou musí být v reaktorech PWR pečlivě monitorována; bylo prokázáno, že ke korozi víka reaktorové nádoby může dojít, pokud není víko reaktorové nádoby řádně udržováno. Protože reaktory BWR

nepoužívají kyselinu boritou, jsou tyto eventuality a rizika eliminovány.

- Řízení výkonu snížením hustoty moderátoru (bublinky páry ve vodě) namísto přidáním absorbérů neutronů (kyselina boritá v PWR) vede k množení U-238 rychlými neutrony, což vede k produkci štěpného Pu-239.
- BWR mají obecně redundanci N-2 ve svých hlavních bezpečnostních systémech, které se obvykle skládají ze čtyř „řad“ komponent. To obecně znamená, že až dvě ze čtyř komponent bezpečnostního systému mohou selhat a systém bude i nadále fungovat.
- Vzhledem k jedinému hlavnímu dodavateli (GE/Hitachi) má současná flotila reaktorů až do typu ABWR předvídatelné, jednotné konstrukce, které sice nejsou zcela standardizované, ale obecně jsou si velmi podobné. Novější konstrukce SBWR/ESBWR jsou zcela standardizované.

Poznámka: Nedostatek standardizace zůstává problémem u tlakovodních reaktorů (PWR), protože například ve Spojených státech jsou v současné flotile PWR zastoupeny tři konstrukční řady (Combustion Engineering, Westinghouse a Babcock & Wilcox). V rámci těchto řad existují poměrně odlišné konstrukce.

V Euroasijském geoprostoru jsou konstrukce jaderných bloků rovněž velmi rozmanité. Některé země by však mohly dosáhnout vysoké úrovně standardizace s PWR, například Francie. Zavádějí se další řady PWR. Například APWR od Mitsubishi, US-EPR od Arevy a AP1000/AP600 od Westinghouse přidají rozmanitost a složitost k již tak rozmanité skupině a pravděpodobně přimějí zákazníky hledající stabilitu a předvídatelnost k hledání jiných konstrukcí, jako je například BWR.

Švédsko je standardizováno hlavně v oblasti BWR. Japonsko experimentovalo s PWR i BWR, ale většina stavěných elektráren v poslední době byla s reaktory BWR, konkrétně s ABWR.

Velká Británie na začátku 60. let v otevřené soutěži CEGB o standardní návrh britských

energetických reaktorů 2. generace se PWR nedostal ani do finálového kola, které bylo souborem mezi BWR (preferovaným pro svou snadno srozumitelnou konstrukci a také pro to, že byl předvídatelný a „nudný“) a AGR, což byl jedinečně britský návrh; domácí návrh zvítězil, pravděpodobně na základě technických výhod, možná kvůli blízkosti všeobecných voleb. Přesto v 80. letech 20. století ovšem CEGB postavil elektrárnu Sizewell B s bloky PWR.

• BWR jsou nadměrně zastoupeny v dovozu, pokud dovážející země nemá jaderné námořnictvo.

Poznámka: Typy PWR jsou upřednostňovány státy s jaderným námořnictvem kvůli jejich kompaktní konstrukci s vysokým výkonem; používané na plavidlech s jaderným pohonem. Protože námořní reaktory se obecně neexportují, vede to k rozvoji národních dovedností v oblasti návrhu, konstrukce a provozu PWR (např. Rusko, Francie).

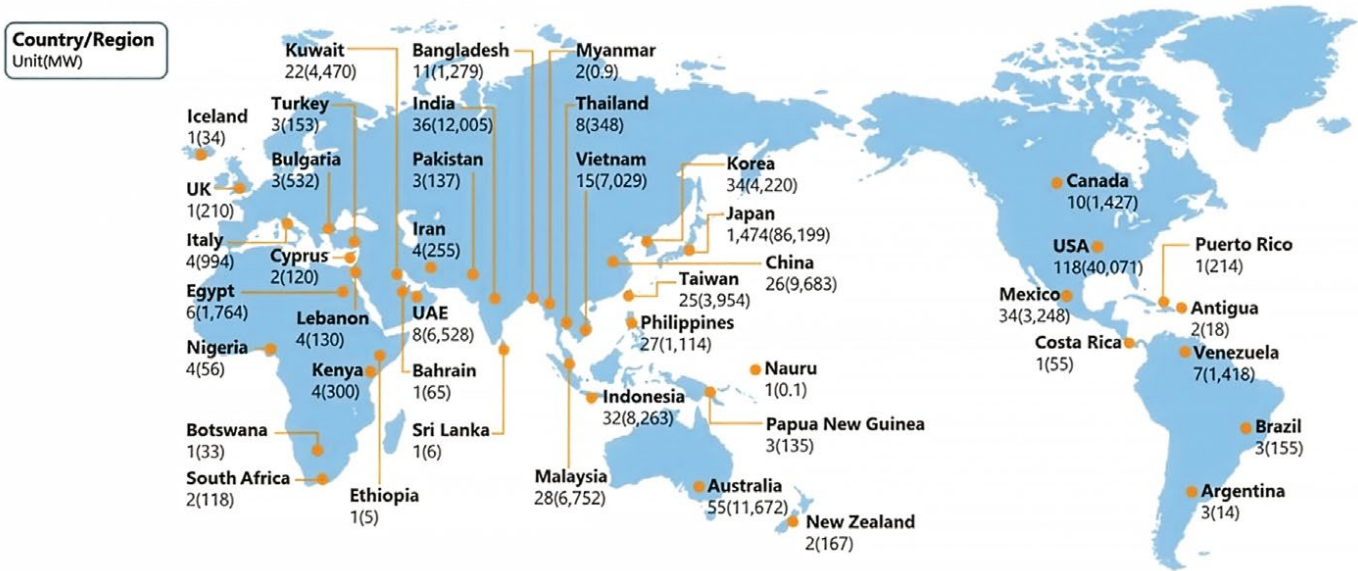
Přechod mezi výhodami a nevýhodami BWR
BWR jsou výhodné pro mírové využití (nevojenské), jako je výroba energie (nejrozsáhlejší využití), procesní/průmyslové/dálkové vytápění a odsolování, a to díky nízkým nákladům, jednoduchosti a zaměření na bezpečnost, což je na úkor větší velikosti a mírně nižší tepelné účinnosti. Tímto odstavcem plynule přecházíme k nevýhodám, jejich popis byl použit ze zdroje vypracovaného před rokem 2020, tedy ještě před projektem BWRX-300.

Nevýhody BWR

- BWR vyžadují složitější výpočty pro řízení spotřeby jaderného paliva během provozu kvůli „dvoufázovému proudění kapaliny (voda a pára)“ v horní části aktivní zóny. To také vyžaduje více přístrojů v aktivní zóně reaktoru.
- Větší tlaková nádoba než u PWR s podobným výkonem, s odpovídajícím způsobem vyššími náklady, zejména u starších modelů, které stále používají hlavní parogenerátor a související potrubí.
- Kontaminace turbíny krátkodobými aktivačními produkty. To znamená, že během běžného provozu je nutné

stínění a kontrola přístupu kolem parní turbíny kvůli úrovním radiace vznikajícím z páry vstupující přímo z aktivní zóny reaktoru. Jedná se o technicky poměrně malý problém, který na posledních typech GE-Hitachi BWR již byl vyřešený – viz ^[1], protože většina radiačního toku je způsobena dusíkem-16 (aktivace kyslíku ve vodě), který má poločas rozpadu 7 sekund, což umožňuje vstup do komory turbíny během několika minut po vypnutí.

- Uvádí se, že současná flotila varných reaktorů BWR má menší pravděpodobnost poškození aktivní zóny v důsledku limitní poruchy „1 : 100 000 reaktorových let“ než současná flotila tlakovodních reaktorů PWR (díky zvýšené robustnosti a redundanci ECCS). Přesto se objevily obavy ohledně schopnosti nemodifikovaného kontejnmentu Mark I udržet tlak – a to, že by mohl být kontejnment nedostatečný k zadržení tlaků generovaných limitní poruchou v kombinaci s úplným selháním ECCS, které by vedlo k extrémně vážnému poškození aktivní zóny. V tomto scénáři dvojité poruchy, který byl před jadernými haváriemi ve Fukušimě I považován za extrémně nepravděpodobný, může nemodifikovaný kontejnment Mark I umožnit určitý stupeň radioaktivního úniku. To se má zmírnit modifikací kontejnmentu Mark I, konkrétně přidáním systému odplynovacího komína, který by v případě, že tlak v kontejnmentu překročí kritické hodnoty, měl umožnit řádné vypouštění tlakových plynů poté, co plyny projdou filtry s aktivním uhlím určenými k zachycení radionuklidů.
- Řídící tyče se u konstrukcí BWR zasouvají zespodu. Pro reaktor BWR jsou k dispozici dva hydraulické zdroje energie, které mohou v nouzových podmínkách pohánět regulační tyče do aktivní zóny. Pro každou regulační tyč je k dispozici zaprvé specializovaný vysokotlaký hydraulický akumulátor a za druhé tlak uvnitř tlakové nádoby reaktoru. Tedy, buď specializovaný



↑
Obr. 3.4: Mapa států a regionů, kam od roku 1927 dodala společnost Toshiba celkem 2 035 jednotek / 216 132 MW

akumulátor (jeden na každou regulační tyč), nebo tlak v reaktoru, jsou schopny každou regulační tyč plně zasunout.

Poznámka: Většina ostatních typů reaktorů (tedy i PWR) používá regulační tyče s horním vstupem, které jsou drženy ve vytažené poloze elektromagnetem, což způsobuje jejich pád do reaktoru vlivem gravitace, pokud dojde k výpadku napájení.

TOSHIBA – potenciální dodavatel jaderných elektráren pro Evropu

V Česku není příliš známé, že společnost Toshiba obstarává globální instalace jaderných turbín, ale také jaderné reaktory, generátory, údržbu jaderných zařízení, ze svých elektráren poskytuje podpůrné síťové služby, jakož i restart jaderných bloků, jejich vyřazování z provozu a demontáž jaderných elektráren. Jaderné instalace společnosti TOSHIBA jsou vyznačené na Obr. 3.4.

Závěr

V rámci jaderné renesance, která je dnes již nezpochybnitelná, bude v Evropě i ve světě budováno relativně velké množství nových jaderných bloků. Přitom však v posledních letech se ukazuje, že reálně jsou pro evropské nové jaderné elektrárny pouze tři potenciální dodavatelé: KHNP, Westinghouse, a EDF. Jejich projekční, výrobní a dodavatelská kapacita je přitom obsazena na několik let dopředu.

Ve světě jsou však, kromě politicky „nepřijatelných“ dodavatelů (Rosatom a Čína), ještě další potenciální dodavatelé, např. jiné americké firmy než Westinghouse, a/nebo americko-japonští dodavatelé, např. GE-Hitachi.

V kontextu tohoto článku je nutné zmínit potenciální japonské dodavatele jaderných a energetických zařízení, zejména Hitachi, resp. GE-Hitachi, ale také společnost Toshiba, která již více než 50 let poskytuje dodávky a služby pro jadernou energetiku (jaderné reaktory, parní turbíny a generátory, údržbu, podpůrné služby, vyřazování z provozu a demontáž). Nové technologie TOSHIBA mají pokročilé bezpečnostní prvky, které podporují pokračující vývoj instalací nových jaderných elektráren.

V Česku je známo, že pro vybraného dodavatele bloků EDU II, tedy korejskou firmu KEPKO – KHNP, dodala Toshiba parní turbíny do jaderné elektrárny Baráka v SAE.

V současnosti japonští dodavatelé nových jaderných bloků „vypadli“ z evropských projektů, ale to by se mohlo změnit v souvislosti s novou geopolitickou situací ve světě, protože Japonsko udržuje kontakty spíše se státy euro-atlantického prostoru, než se státy bloku „Čína – Rusko – Indie“.

Změna by mohla nastat právě i v dodávkách varných reaktorů BWR. Implementací BWRX-300 pomine nevýhoda obrovských tlakových nádob velkých BWR a také se naskytá jedinečná šance zbavit se velmi velkých tepelných za-

řízení, jako jsou parogenerátory, se všemi jejich problémy.

Možnost či nutnost dalších dodavatelů pro Evropu a také pro Česko se bude zvyšovat s tím, jak bude docházet obecně k rozvoji jaderné energetiky a v Česku k jaderné de-

monopolizaci společnosti ČEZ, v důsledku výskytu jiných investorů a provozovatelů bloků SMR, např. ORLEN Unipetrol, Sokolovská uhlerná, SEV.EN (Tykač), EPH (Křetínský), a další průmyslové skupiny.

Reference

[1] Neuman, Petr, Královec Josef: „BWRX-300 – jediný malý modulární reaktor varného typu“; Jaderná energie/Jadrová energia, č. 1, 2025

[2] Neuman, Petr, Královec Josef: „Malé modulární reaktory BWRX-300“; All for Power č. 2, 2025

[3] Neuman, Petr: „Jadrové bloky SMR s odberom tepla pre sústavy SZT“; ATP Journal, časť 1, č. 6 (Jún), časť 2 č. 7 (Júl), 2024

[4] Nuclear Power Reactors in the World, IAEA Reference data series No. 2., 2024 Edition

[5] Wagner Vladimír: „Jaderná energetika v polovině roku 2025“; ENERGETIKA, č. 4, 2025 (dvoměsíčník)

[6] Program rozvoju BWRX-300 w Polsce; OSGE – Orlen Syntos Green Energy, 2024

[7] Johan Lundberg: UNIPER – 80 is the new 60! – Long Term Operation of Nuclear Power, 2025

[8] OSGE & BWRX-300 most advanced SMR project in the EU, 2025

[9] What are the advantages and disadvantages of boiling water reactors and pressurized water reactors? Quora 2020, staženo z adresy: <https://www.quora.com/> v roce 2025

[10] Královec Josef, Mladý Zdeněk: „Jaderná energetika ve světě“; ŠKODA PRAHA a. s., technická zpráva TU/RO/020/1998 (počet stran 249), Plzeň, březen 1998



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.

Před 35 lety dosáhl školní reaktor VR-1 „Vrabec“ poprvé kritického stavu

Ing. Jan Rataj, Ph.D.

Katedra jaderných reaktorů, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, České vysoké učení technické v Praze

Školní reaktor VR1 „Vrabec“ slaví 35 let od dosažení prvního kritického stavu. Od roku 1990 slouží jako klíčové výukové a výcvikové zařízení pro české i zahraniční studenty a odborníky v oblasti jaderné energetiky. Článek přibližuje historii výstavby, technické parametry, modernizace, experimentální vybavení i význam reaktoru pro vzdělávání, výzkum a mezinárodní spolupráci.

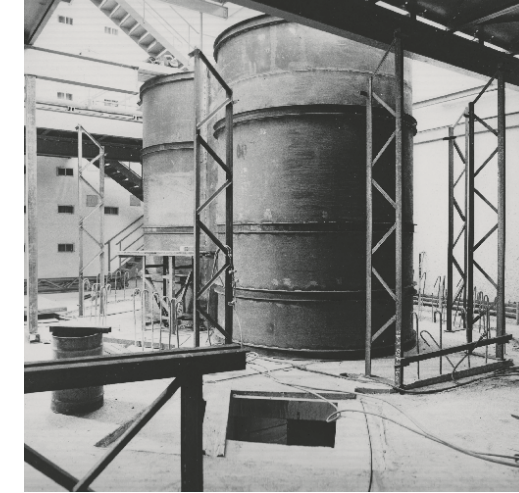
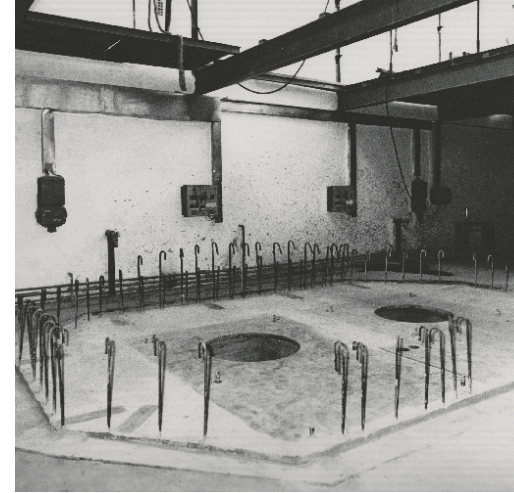
The VR1 “Sparrow” training reactor celebrates 35 years since reaching its first critical state. Since 1990, it has served as a key educational and training facility for Czech and international students and professionals in nuclear energy. The article outlines its construction history, technical parameters, modernisation, experimental equipment, and the reactor’s role in education, research, and international cooperation.

Před čtyřiceti lety začala na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze výstavba unikátního výukového jaderného zařízení – školního reaktoru VR-1, přezdívaného Vrabec. Reaktor byl dokončen v roce 1989 a před pětatřiceti lety, dne 3. prosince 1990 v 16 hodin a 25 minut dosáhl svého prvního kritického stavu. Za 35 let provozu pomohl reaktor vychovat pro českou energetiku, průmysl, výzkum i státní správu obrovské množství jaderných odborníků. Reaktor VR-1 se stal uznávaným výukovým a výcvikovým pracovištěm nejen v České republice, ale i v zahraničí. Každý rok absolvují na reaktoru výuku více než dvě stovky studentů z našich a zahraničních univerzit.

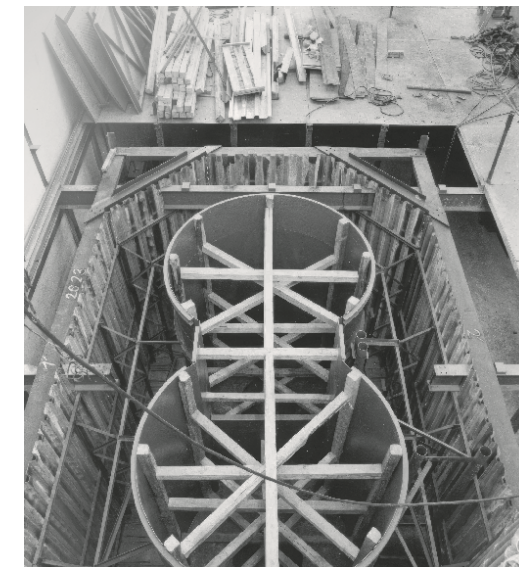
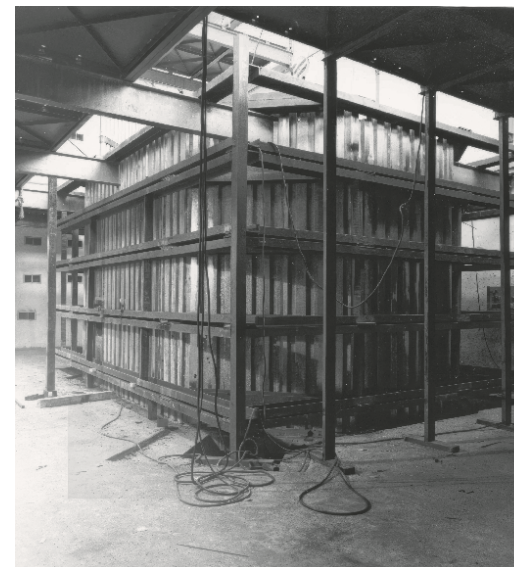
1. Historie reaktoru

Projekt reaktoru VR-1 by zpracován Chemo projektem Praha, kterému připravila technické podklady ŠKODA JS Plzeň a Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská (FJFI). Výstavba reaktoru byla zahájena v roce 1985. Stavební práce zajišťovaly Pozemní stavby Praha, hlavní technologické části reaktoru dodala ŠKODA JS Plzeň. FJFI se na výstavbě reaktoru podílela koordinací

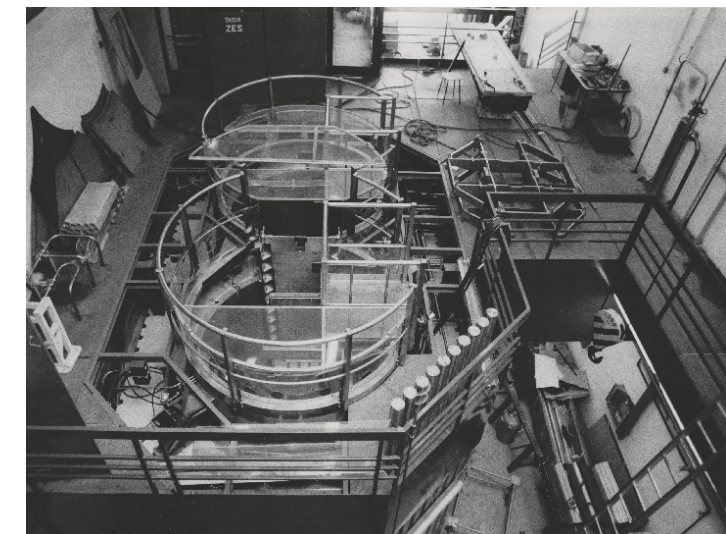
prací, koncepčním návrhem ovládacího zařízení reaktoru, včetně sestavení a oživení jeho řídicího programu. FJFI dále realizovala výpočty neutronově-fyzikálních charakteristik reaktoru a jeho bezpečnostní analýzy. První palivo pro reaktor, typově označené IRT-2M (obohacení 36 % ^{235}U), bylo dodáno z bývalého SSSR. Palivo bylo na pracoviště reaktoru přivezeno v letech 1988 a 1989. Ke konci roku 1988 byla dokončena výroba reaktorových nádob ve ŠKODA JS Plzeň a ty byly po kontrolní montáži hlavní sestavy začátkem roku 1989 uloženy do připravených pouzder ve stínění na hale reaktoru. Veškeré stavební a montážní práce byly dokončeny v červnu 1989. Do září 1990 probíhalo neaktivní vyzkoušení, na které navázalo fyzikální spouštění. Poprvé dosáhl reaktor kritického stavu dne 3. prosince 1990 v 16.25 hod SEČ. Následně probíhal zkušební provoz, během něhož byly experimentálně ověřeny všechny hlavní parametry reaktoru a připravené pedagogické úlohy. Reaktor VR-1 je v trvalém provozu od ledna 1992. Malý pohled na výstavbu reaktoru přibližují fotografie na Obr. 1 až 4.



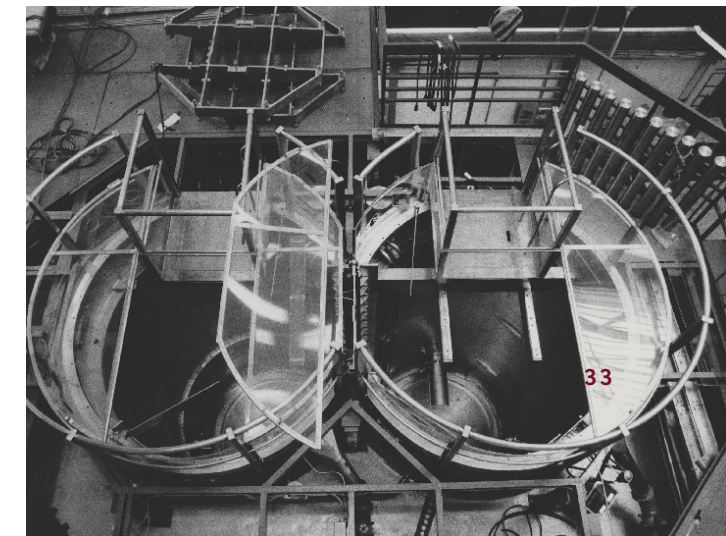
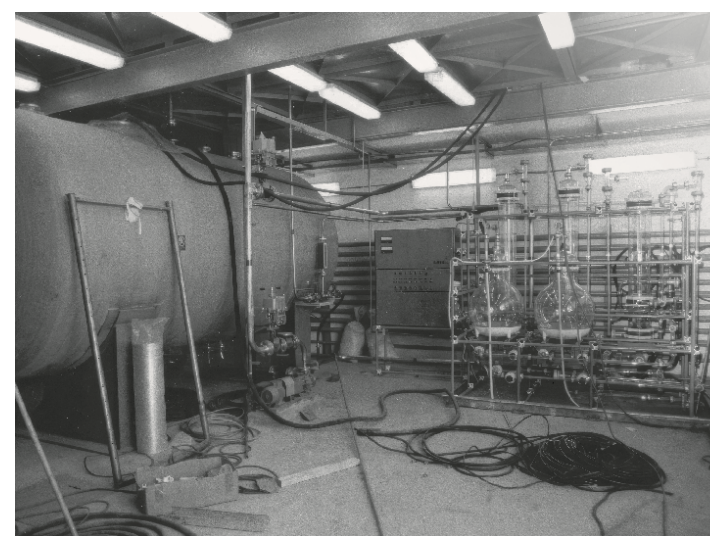
←
Obr. 1: Výstavba reaktoru – prostor v hale připraven pro výstavbu reaktoru (vlevo) a pouzdra pro reaktorové nádoby usazená v hale reaktoru (vpravo)



←
Obr. 2: Výstavba reaktoru – ocelová konstrukce stínění reaktoru (vlevo) a pouzdra pro reaktorové nádoby připravené na betonování stínění (vpravo)



↙
Obr. 3: Výstavba reaktoru – betonování stínění (vlevo) a kompletace vodního hospodářství (vpravo)



↓
Obr. 4: Výstavba reaktoru – kompletace vnitřních částí reaktorových nádob a haly reaktoru



Obr. 5: Jak se měnil
pult operátora (1990–
2001–2018)



Výkon	100 W _t , krátkodobě (max. 72 h ročně) 500 W _t	
Hustota toku tep. neutronů	přibližně 10 ¹⁰ n/cm ² /s v centru aktivní zóny, nicméně závisí na typu aktivní zóny	
Palivo výroba a dovoz Ruská federace	typ	IRT-4M, trubkové palivo
	palivová směs	disperze Al+UO ₂
	obohacení	19,7 % ²³⁵ U
	geometrie	čtvercová
Reaktorové nádoby vyrobeny z nerezové oceli	průměr	2 300 mm
	výška	4 720 mm
	tloušťka stěn	15 mm
	tloušťka dna	20 mm
	objem	17 m ³
Stínění voda + beton	nad aktivní zónou	vrstva vody (cca 3 000 mm)
	boční	vrstva vody (cca 850 mm) a těžkého betonu (cca 950 mm)
Moderátor a chladivo	lehká voda	
Teplota v reaktoru	cca 20 °C podle teploty okolí	
Chlazení aktivní zóny	přirozenou konvekcí	
Tlak	atmosférický	
Regulační systém	5 až 7 absorpčních tyčí s kadmiovým absorbátorem	
Provozní měření výkonu	čtyři širokopásmové štěpné detektory	
Nezávislá výkonová ochrana	čtyři bórové korónové detektory	
Externí zdroj neutronů	AmBe, emise neutronů 2·10 ⁷ n/s	



Tab. 1: Přehled základních
parametrů reaktoru VR-1

V dosavadních pětatřiceti letech provozu reaktoru lze nalézt řadu milníků, které se významně zapsaly do jeho života. Jednalo se především o inovační práce, které vedly ke zvýšení bezpečnosti, spolehlivosti a komfortu provozu reaktoru. Například pult operátora byl do této doby měněn již třikrát (viz Obr. 5). Mezi nejvýznamnější události v dosavadním životě reaktoru patří:

- 1990** dosažení prvního kritického stavu (3. 12. 1990 v 16.25 hodin)
- 1992** ukončení zkušebního a zahájení trvalého provozu
- 1997** první záměna paliva – palivo IRT-2M bylo nahrazeno novým palivem IRT-3M (obohacení 36 % ²³⁵U)
- 2001** inovace pultu operátora a rozhraní člověk stroj
- 2002** inovace bezpečnostního řetězce a motorů absorpčních tyčí
- 2002** povodeň – v srpnu 2002 bylo pracoviště reaktoru VR-1 zaplaveno do výše jednoho metru, díky úsilí pracovníků nedošlo k žádnému významnému poškození komponent reaktoru a výraznějším škodám na

majetku, provoz reaktoru byl obnoven v listopadu téhož roku

- 2003** instalace nového řídicího počítače
- 2004** inovace radiačního monitorovacího systému
- 2005** inovace nezávislé výkonové ochrany reaktoru
- 2005** druhá záměna paliva – reaktor přešel z paliva IRT-3M na nízko-obohacené palivo typu IRT-4M (obohacení 19,7 % ²³⁵U)
- 2007** inovace provozního měření výkonu reaktoru
- 2009–2010** instalace nového rozhraní člověk-stroj na pultu operátora
- 2014** výměna mostového jeřábu v hale reaktoru
- 2015** inovace potrubní pošty reaktoru
- 2016** inovace řídicího počítače
- 2018** inovace pultu operátora a instalace technologie pro Internet Reactor Laboratory
- 2020** výměna demineralizační stanice
- 2025** výměna absorpčních tyčí a jejich řídicích jednotek, výměna radiačního monitorovacího systému

2. Popis reaktoru

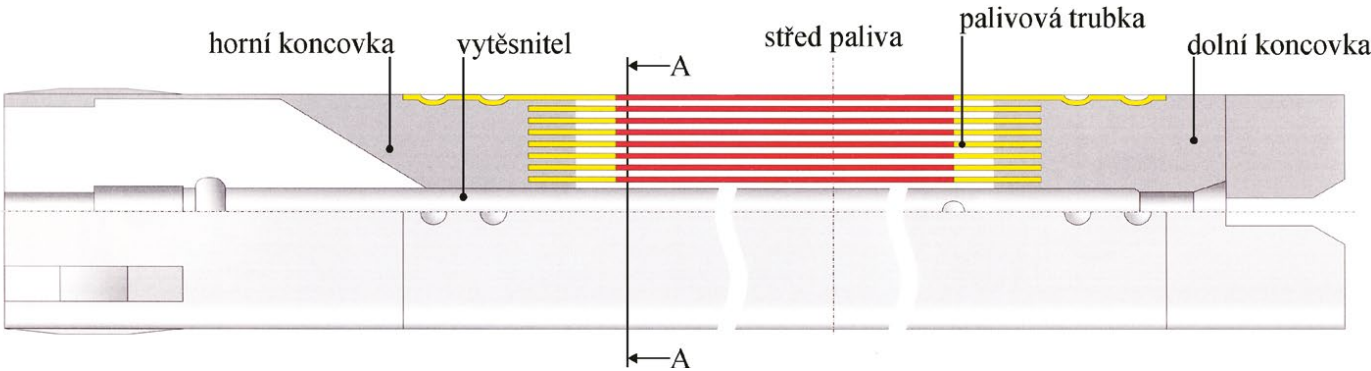
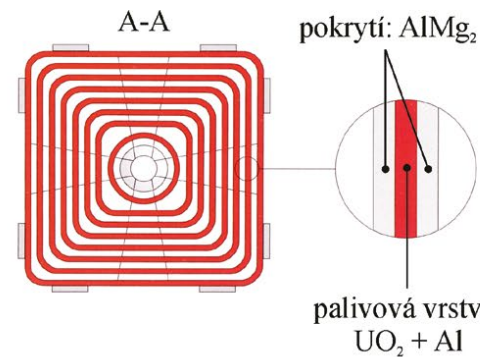
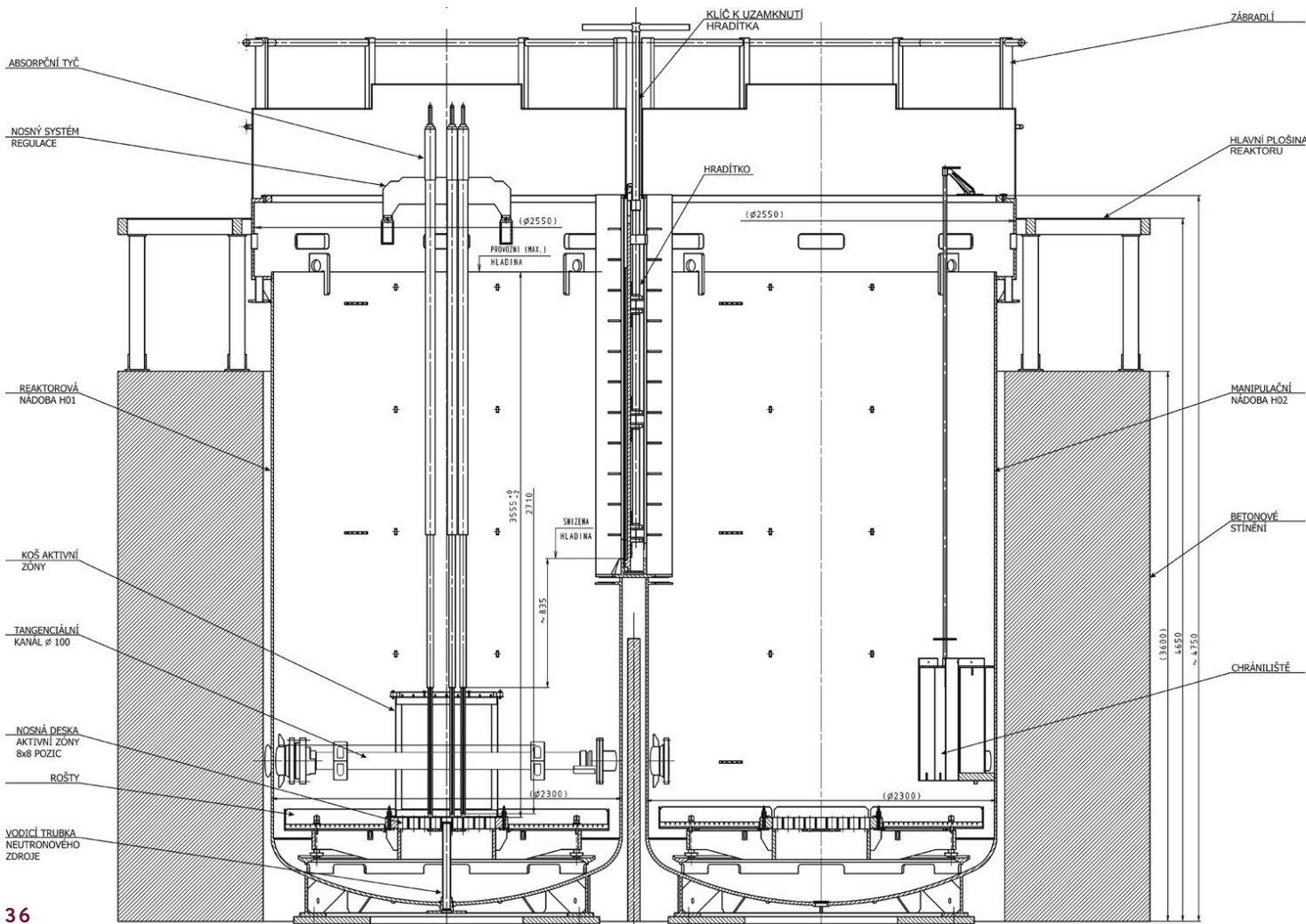
Školní jaderný reaktor VR-1 je výzkumným jaderným zařízením, které je využíváno především k pedagogickým a vědecko-výzkumným účelům. Držitelem povolení k provozu reaktoru je ČVUT v Praze, provoz zajišťuje FJFI (konkrétně Katedra jaderných reaktorů). Reaktor je umístěn v hale budovy těžkých laboratoří, která se nachází v areálu Trója MFF UK. Hala reaktoru má obdélníkový tvar o rozměrech 15 × 8,4 m, přičemž výškově přesahuje tři podlaží budovy. Reaktor se nachází téměř uprostřed haly. Její součástí je také prosklený velín a otevřená učebna nad velínem, která slouží k teoretické přípravě studentů, resp. účastníků výcvikových kurzů. Na hale je k dispozici mostový jeřáb umožňující přemisťovat břemena až do hmotnosti 5 000 kg.

Reaktor spadá do kategorie lehkovodních reaktorů bazénového typu, které pracují s obohaceným uranem. Lehká voda slouží nejen jako moderátor a reflektor, ale i jako biologické stínění a chladivo. Díky malému výkonu je pro odvod tepla uvolněného při štěpení uranu v aktivní zóně dostatečné přirozené proudění bez nutnosti použití čerpadla. K uvádění reaktoru do provozu se používá neutronový zdroj typu AmBe o emisní četnosti 2·10⁷ n/s. Jeho intenzita poskytuje dostatečný signál ovládacímu zařízení reaktoru i v případě hluboce podkritických stavů (například při odstaveném reaktoru).

Schéma reaktoru je na Obr. 6 a přehled jeho základních parametrů v Tab. 1.

2.1 Reaktorové nádoby

Těleso reaktoru má tvar osmistěnu, vyrobeného ze stínícího betonu (hustota 3 000 až



3 600 kg/m³). V tělese reaktoru jsou umístěny dva bazény – nádoby značené H01 a H02. Obě nádoby jsou prakticky shodné, jsou vyrobené z nerezové oceli o tloušťce 15 mm, jejich výška je 4 700 mm a průměr 2 300 mm a mají objem 17 m³. Různá je však funkce nádob a tím i jejich vybavení vnitřními částmi. První nádoba H01, reaktorová, je určena pro umístění aktivní zóny, druhá nádoba H02 slouží jako manipulační. Toto uspořádání bylo zvoleno především z důvodů radiační bezpečnosti a usnadnění některých manipulací. Manipulační nádoba umožňuje plnit řadu funkcí jako je příprava experimentů nebo dočasné skladování ozářených vzorků, mimo jiné je vybavena schránkami (tzv. chrániliště) pro dočasné skladování palivových článků. V případě potřeby lze obě nádoby pomocí vratového uzávěru vodotěsně oddělit. To je výhodné zejména při prohlídkách a kontrolách jednotlivých nádob, případně i při větších úpravách aktivní zóny. Bazénové uspořádání reaktoru umožňuje jednoduchý a rychlý přístup k aktivní zóně, snadné zakládání a vyjímání různých experimentálních vzorků a detektorů, jednoduchou a bezpečnou manipulaci s palivovými články apod.

Vnitřní části reaktoru sestávají z několika funkčních skupin, které vesměs navazují na aktivní zónu reaktoru. Patří mezi ně zejména nosný systém aktivní zóny, rošty, nosný systém

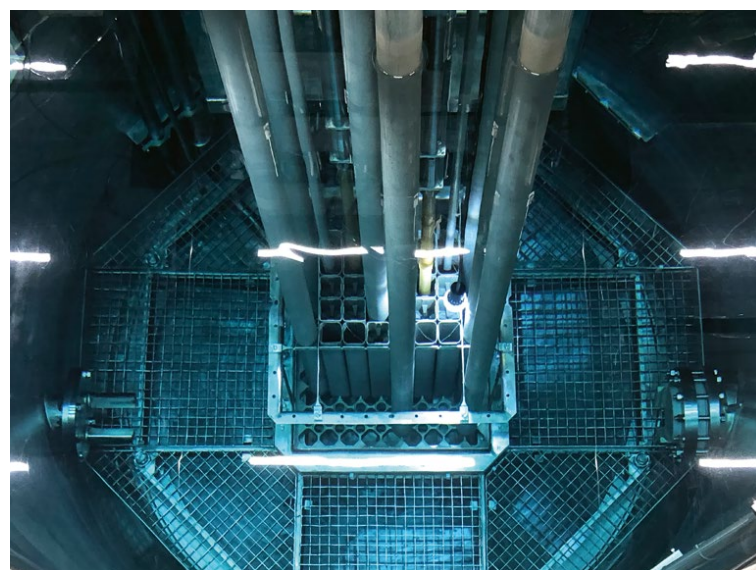
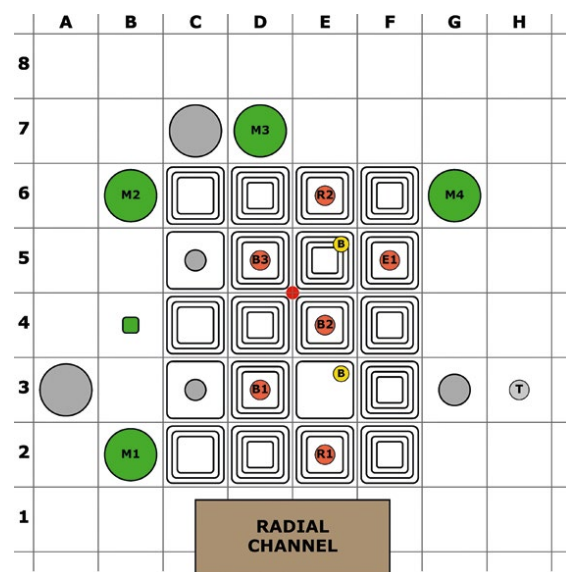
regulace, měřicí kanály, provozní a měřicí potrubí a chrániliště palivových článků v nádobě H02. V reaktorové nádobě H01 je i plošina, která umožňuje manipulace v aktivní zóně a jejím okolí při snížené hladině vody.

Kromě reaktorových nádob, je na pracovišti reaktoru k dispozici i nádoba pro zásobu moderátoru. Nádoba je značena H03 a její objem je 19 m³. Do nádoby lze vypustit kompletně obsah vody nádoby H01 nebo H02. Všechny tři nádoby jsou propojeny s demineralizační stanicí, která umožňuje jak výrobu nového, tak i přečišťování použitého moderátoru ve vybraných nádobách.

2.2 Palivo a aktivní zóna

Na reaktoru je od roku 2005 využíváno palivo typu IRT-4M, jehož obohacení je 19,7 % ²³⁵U, řadí se tedy mezi nízko-obohecené palivo. Palivový článek tvoří koncentrické trubky čtvercového průřezu, spojené dolní a horní koncovkou (viz Obr. 7). Vnější rozměr palivového článku je 69,6 × 69,6 mm a jeho celková délka je 820 mm. Palivo je standardně dodáváno ve třech provedeních: čtyřtrubkovém, šestitrubkovém a osmitrubkovém. Do šestitrubkových a čtyřtrubkových palivových článků lze umístit absorbatory absorpčních tyčí, vertikální experimentální kanály nebo vybraná experimentální zařízení.

Obr. 7: Palivo typu IRT-4M



↑
Obr. 8: Schéma konfigurace aktivní zóny C1 (vlevo) a pohled na aktivní zónu v reaktorové nádobě (vpravo)

Palivová vrstva článku IRT-4M je tvořena disperzí Al a UO_2 o tloušťce 0,6 mm, která je z obou stran pokryta vrstvou slitiny hliníku a hořčíku tloušťky 0,5 mm. Ve čtyřtrubkovém článku je přibližně 200 g ^{235}U , v šestitrubkovém 265 g ^{235}U a v osmitrubkovém článku přibližně 300 g ^{235}U . S ohledem na malý výkon reaktoru zůstává jeho palivo fyzikálně čerstvé (tzn. nedochází k měřitelnému vyhoření). V reaktoru je spotřebováno za 1 rok méně než 0,01 g ^{235}U .

Palivo se může nacházet pouze na třech místech pracoviště reaktoru, v nádobě H01 (v aktivní zóně), v nádobě H02 (v chráništi) a ve skladu paliva, kde se palivo umísťuje do trezorových skříní. S palivem se manipuluje pomocí ručních manipulátorů, a to i v případě jeho umísťování, resp. vyjímání z aktivní zóny.

Palivové články jsou v reaktorové nádobě usazeny v mříži aktivní zóny, jejíž krok je $71,5 \times 71,5$ mm. Mříž obsahuje celkem 8×8 pozic, do nichž lze umístit palivové články a další komponenty (např. makety palivových článků, grafitový nebo beryliový reflektor, různá experimentální zařízení a další.). Každá pozice má své písmenné (horizontálně A až H) a číselné (vertikálně 1 až 8) označení. Standardní provozní aktivní zóna obsahuje mezi 18 až 20 palivovými články. Schéma typické provozní aktivní zóny je na Obr 8. Vnější tvar aktivní zóny je v horní části (v oblasti horních koncovek palivových článků) fixován pomocí posuvných kovových pásků.

2.3 Ovládací zařízení

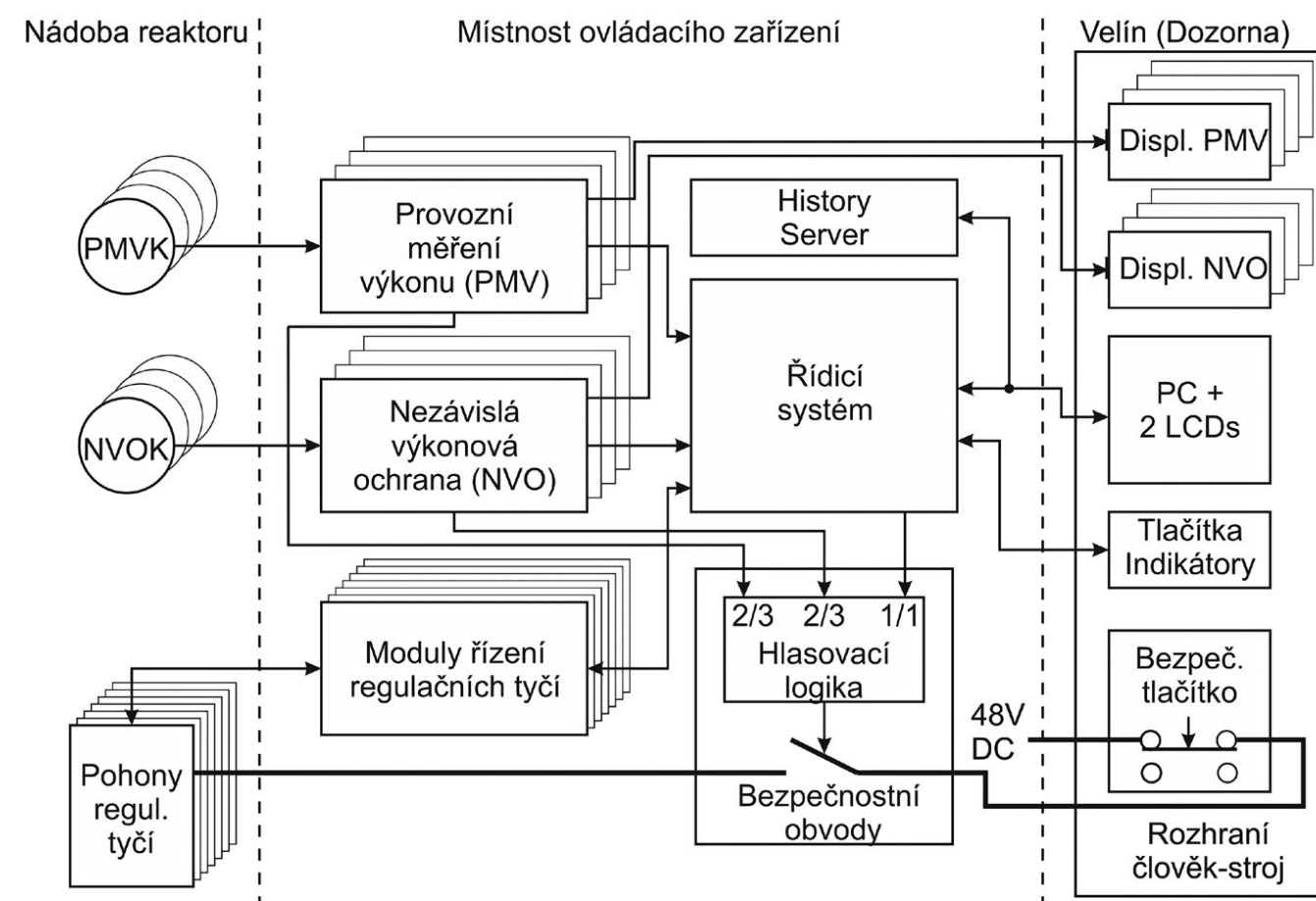
Ovládací zařízení reaktoru, které představuje systém ochrany a regulace reaktoru, zajišťuje zejména:

- měření hustoty neutronového toku (výkonu) a rychlosti jeho relativních změn při všech provozních i mimořádných stavech reaktoru
- ruční nebo automatické řízení hustoty neutronového toku
- nepřetržitou kontrolu stavu reaktoru se signalizací nepřipustných stavů a přiblížení k nim
- vlastní kontrolu před spouštěním reaktoru a při jeho provozu se signalizací poruch
- ruční i automatické zastavení reaktoru při jeho nepřipustných stavech i poruchách ovládacího zařízení.

Základními komponentami ovládacího zařízení reaktoru jsou (viz Obr. 9):

- absorpční tyče
- 4 kanály provozního měření výkonu (PMV)
- 4 kanály nezávislé výkonové ochrany (NVO)
- řídicí systém, resp. řídicí počítač
- bezpečnostní řetězec
- rozhraní člověk-stroj

Řízení reaktoru zajišťuje 5 až 7 absorpčních tyčí s kadmiovým absorbátorem. Počet tyčí v aktivní zóně závisí na její konkrétní konfiguraci. Všechny tyče jsou konstrukčně shodné, liší



se pouze funkcí, určenou podle jejich pozice v aktivní zóně a způsobem zapojení do ovládacího zařízení. V rámci ovládacího zařízení se rozlišují tři různé typy tyčí dle funkce: bezpečnostní, experimentální a regulační. Bezpečnostní tyče jsou tři. Za standardního provozu jsou vytaženy do horních koncových poloh a po odpojení napájení magnetů tyčí spadnou (spolu s ostatními tyčemi) do aktivní zóny a zastaví štěpnou řetězovou reakci. Bezpečnostní tyče jsou schopny zanést do reaktoru největší množství záporné reaktivity. Experimentální tyče mohou být maximálně dvě podle konfigurace aktivní zóny a slouží k vykompenzování vlivu experimentálních zařízení v reaktoru na reaktivitu. Poslední dvě tyče plní funkci regulačních tyčí. Pomocí nich se reaktor řídí, tj. zajišťují dosahování kritického stavu a změny výkonu.

Absorpční tyč se skládá z pohonu, absorptoru a vodicího kanálu. Tyče byly v letošním roce, poprvé po 35 letech, kompletně vyměněny. Z pohledu konstrukčního řešení zůstal původní pouze absorptor a jeho vodicí kanál, nicméně i ty byly upraveny. Pohon tyče zajišťuje pohyb elektromagnetu, který obsluhuje absor-

bátor. Pohonnou jednotkou je servomotor s absolutním enkodérem a s planetovou převodovkou. Přenos krouticího momentu z pohonné jednotky na lineární aktuátor je realizován prostřednictvím Oldhamovy spojky. Aktuátor zajišťuje převod rotačního pohybu na lineární posuv pomocí šroubu a matice s trapézovým závitem. Elektromagnet pomocí odpružené kotvy zajišťuje spojení s absorbatorem, přičemž kotva je součástí absorbatoru. Pohon je vybaven koncovými spínači horní a dolní koncové polohy, které jsou umístěny na plášti aktuátoru. Aktivní část absorbatoru obsahuje tenký kadmiový plech navinutý na válcové hliníkové vložce. Absorbátor se umísťuje do vodicího kanálu, který zajišťuje jeho vedení v oblasti aktivní zóny reaktoru a k zachycení pádu absorbatoru pomocí hydraulického tlumiče. Řízení tyčí je zajišťováno pomocí PLC Siemens Simatic řady S7-1200.

Nejdůležitějším systémem ovládacího zařízení reaktoru z hlediska jaderné bezpečnosti je ochranný systém. Ochranný systém se skládá ze čtyř kanálů PMV a 4 NVO. Aktivní, tj. v režimu „měření“ jsou však nejvýše tři kanály PMV, resp. NVO vyhodnocované v logice „dva ze tří“,

Obr. 9: Blokové schéma ovládacího zařízení reaktoru



Obr. 10: Simulace bublinkového varu v aktivní zóně reaktoru VR-1

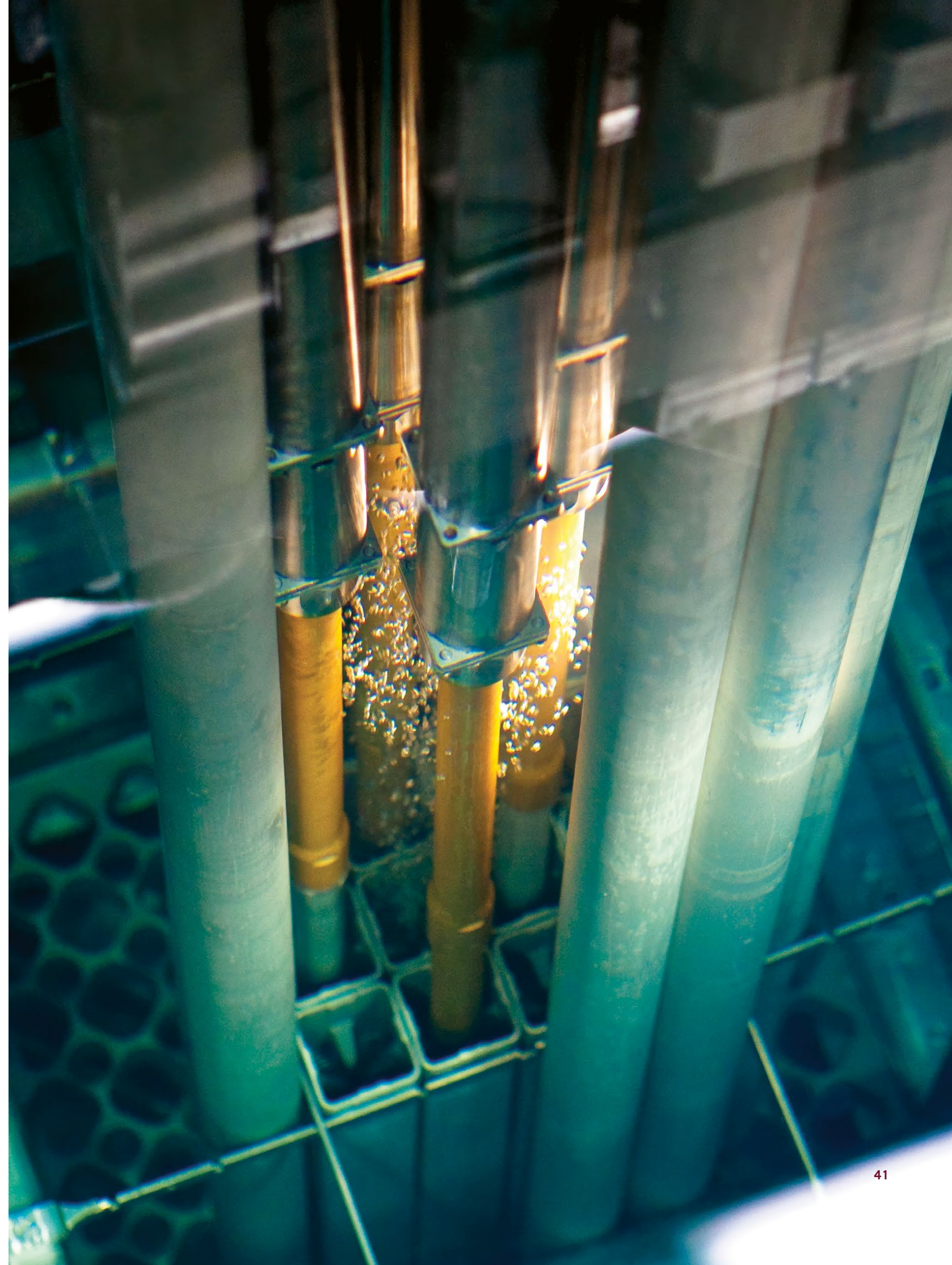
čtvrtý kanál je v režimu „záloha“ s rozpojeným bezpečnostním relé. Kanál v režimu „záloha“ může po přepnutí do režimu „měření“ řídicím počítačem nahradit výpadek jednoho původně aktivního kanálu. Kanály PMV jsou založeny na průmyslových PC doplněných obvody pro zpracování signálů ze širokopásmových nekompensovaných štěpných komor typu RJ1300. Kanály PMV, které pracují v impulzním i proudovém režimu, určují v celém výkonovém rozsahu reaktoru jeho okamžitý výkon a rychlost změny výkonu, porovnávají zjištěné hodnoty s bezpečnostními úrovněmi a pokud jsou tyto úrovně překročeny, aktivují bezpečnostní řetězec, který v logice „dva ze tří“ rozhoduje o bezpečnostním odstavení reaktoru. Dále posílají provozní data řídicímu systému a na individuální displeje jednotlivých kanálů. Kanály NVO snímají stav reaktoru pomocí bórových komor typu SNM-12, které pracují v impulzním režimu. Tyto komory, které se nacházejí vně reaktorové nádoby, měří výkon pouze v cca posledních dvou dekádách výkonového rozsahu. Kanály NVO, kromě výkonu rovněž vyhodnocují rychlost změny výkonu, sledují bezpečnostní úrovně a při jejich překročení aktivují bezpečnostní řetězec, který v logice „dva ze tří“ rozhoduje o bezpečnostním odstavení reaktoru. Dále posílají provozní data řídicímu systému a na individuální displeje jednotlivých kanálů.

Bezpečnostní řetězec ovládacího zařízení reaktoru představuje reléový systém s použitím vysoce kvalitních bezpečnostních relé. Zajišťuje vyhodnocení logiky „dva ze tří“ pro bezpečnostní signály z PMV a NVO, dále bezpečnostní signál z řídicího počítače a případně z technologie v logice „jeden z jednoho“. Pokud „dva ze tří“ PMV nebo „dva ze tří“ NVO nebo libovolný samostatný bezpečnostní signál od řídicího počítače nebo technologie jsou aktivovány, rozpojí se bezpečnostní řetězec. Tím se přeruší napájení magnetů řídicích tyčí, tyče spadnou do svých dolních koncových poloh a zastaví štěpnou řetězovou reakci.

Řídicí systém reaktoru VR-1 je realizován na základě jednoho počítače (průmyslové PC). Tento řídicí počítač přijímá data z kanálů PMV a NVO, provádí vyhodnocení stavu reaktoru

a v případě překročení bezpečnostních úrovní (provádí vyhodnocování i pro data z jednotlivých kanálů PMV a NVO s logikou „dva ze tří“) nezávisle na PMV nebo NVO odstavuje reaktor. Rovněž vypočítává střední hodnoty výkonu a rychlosti změny výkonu, které pak předává rozhraní člověk stroj. Řídicí počítač ovládá na základě příkazů z rozhraní člověk stroj hodnotu zadaného výkonu, vypočítává odchylku od zadaného výkonu. Systém přijímá příkazy od rozhraní člověk stroj a provádí je za předpokladu, že jsou splněny podmínky pro jejich vykonání, dále ovládá polohy řídicích tyčí a zajišťuje funkci automatického regulátoru výkonu reaktoru.

Pomocí rozhraní člověk stroj (HMI – human machine interface) řídí operátor reaktor. HMI se skládá z počítače, dvou monitorů pro alfanumerickou komunikaci a grafické zobrazení dat, individuálních displejů pro sledování hodnot z individuálních kanálů PMV a NVO, klávesnice pro zadávání příkazů, tlačítek, indikátorů a záznamového počítače. Řídicí počítač předává HMI data o stavu reaktoru. Jsou to střední výkon, rychlost změny výkonu, odchylka od zadaného výkonu, stav systému – údaje o kanálech, zda jsou v měření, záloze, resp. poruše a hlášení o dosažení varovných nebo bezpečnostních úrovní. Zároveň přijímá příkazy z klávesnice a tlačítek na pultu operátora a vykonává příslušné činnosti, pokud jsou povoleny. Komunikace mezi operátorem a řídicím počítačem probíhá pomocí klávesnice a ovládacích tlačítek. Operátor má na jednom monitoru v grafické podobě k dispozici informace o stavu ovládacího zařízení (provozních stavech systému, varovných a bezpečnostních signálech, hlášeních apod.). Druhý monitor pak funguje jako alfanumerická konzole, pomocí které zadává operátor příkazy. V případě výpadku jednoho z monitorů lze důležité informace převést z nefunkčního monitoru na monitor funkční. Jazyk uživatelského rozhraní je volitelný – česky nebo anglicky. Systém HMI byl v rámci inovace doplněn tzv. history serverem, který zaznamenává všechna provozní data i zadávané příkazy v rámci ovládacího zařízení. Systém uchovává kompletní provozní historii ovládacího zařízení a reaktoru. Lze ho využívat pro vyhodnocování



experimentů, dokládání bezpečného provozu reaktoru nebo pro účely kalibrace.

2.4 Experimentální vybavení reaktoru

Experimentální vybavení výzkumných reaktorů je jejich klíčovou součástí, jelikož určuje jejich možné aktivity a možnost flexibility. V případě reaktoru VR-1 je snaha jeho experimentální vybavení neustále inovovat a doplňovat tak, aby uživatelům byla poskytnuta maximální variabilita a experimentální podmínky na míru jejich požadavků.

Základním vybavením reaktoru, tak jako v případě ostatních výzkumných reaktorů, jsou vertikální a horizontální kanály. Na pracovišti reaktoru jsou k dispozici vertikální kanály o průměru 10 mm až 90 mm, které se umísťují buď přímo do aktivní zóny, nebo na její periferii. Vertikální kanály slouží především k insta-

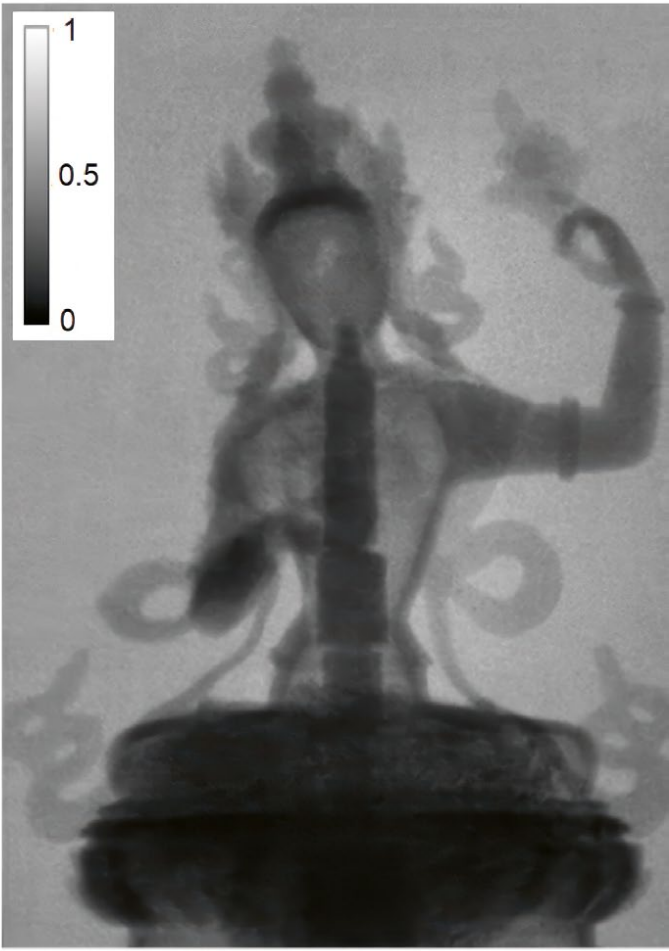
laci různých detektorů, které jsou nezávislé na ovládacím zařízení reaktoru. Do těchto kanálů se umísťují také vzorky za účelem jejich ozařování. Kromě řady vertikálních kanálů může reaktor VR-1 poskytnout dva horizontální kanály, přičemž jeden je radiální a druhý tangenciální. Tangenciální kanál, oproti radiálnímu, není pevnou součástí reaktorové nádoby, ale v případě potřeby se do ní vkládá. Jak tangenciální, tak i radiální kanál slouží k vyvedení svazku neutronů mimo aktivní zónu reaktoru. Využívají se především k testování různých detekčních systému, ozařování větších vzorků, nebo například při neutronové radiografii. Především radiální kanál reaktoru VR-1 se v poslední letech dočkal výrazně vyššího využití, a proto bylo investováno do jeho dovybavení. Byl opatřen automatickým uzávěrem (tzv. shutter), což usnadňuje manipulace uvnitř kanálu i se zkoumanými

→ ↑ ↓ ← ↶ ↷ ↸

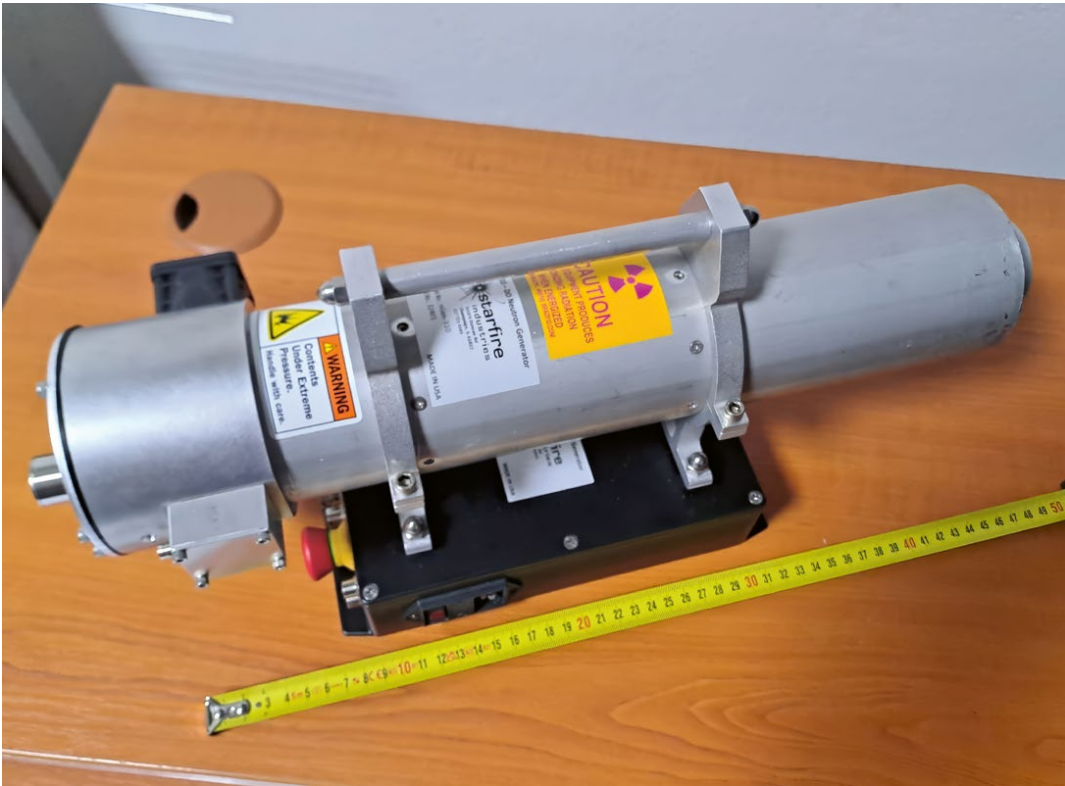
Obr. 11: Neutronová radiografie tibetské sošky realizovaná na reaktoru VR-1



1 cm



1 cm



Obr. 12: D-D generátor neutronů pro pulzní experimenty na reaktoru VR-1

vzorky a flexibilním betonovým stíněním v okolí svého výstupu. To umožňuje realizovat experimenty na maximálním výkonu reaktoru i ve stavu otevřeného kanálu, což se uplatňuje zejména při realizaci experimentů zaměřených na neutronové zobrazování.

Reaktor VR-1 je vybaven, tak jako jiné výzkumné reaktory, potrubní poštou. Je to pneumatický transportní systém, který umožňuje rychlý přesun ozařených vzorků z aktivní zóny reaktoru do místa, kde jsou tyto vzorky analyzovány. Na reaktoru VR-1 je potrubní pošta tvořena ozařovacím vertikálním kanálem (lze ho umístit do různých pozic aktivní zóny) a systémem transportu vzorku. Tento systém byl opět inovován, takže potrubní pošta umožňuje nejen transport vzorku mezi aktivní zónou reaktoru a laboratoří neutronové aktivační analýzy (nachází se vně haly reaktoru), ale nově je možné transportovat ozařený vzorek i na dolní podlaží haly reaktoru. Inovací prošel i systém řízení a kontroly transportu vzorku. Pohyb vzorku je řízen počítačem, pracovníci si mohou zvolit koncovou stanici, do níž bude ozařený vzorek transportován, a zároveň mají díky nově instalované signalizaci přehled o aktuální pozici vzorku.

Řada experimentálních zařízení, která se nacházejí na reaktoru VR-1 není standardní součástí výzkumných reaktorů a byla vyvinuta přímo pro pedagogické účely na Katedře jaderných reaktorů, nicméně je lze využít i pro vědecko-výzkumnou činnost. Jedná se o zařízení pro studium zpožděných neutronů, zařízení pro studium vlivu bublinkového varu na reaktivitu, zařízení pro studium dynamiky reaktoru (tzv. vertikální oscilátor) a zařízení pro neutronové zobrazování NIFFLER (Neutron Imaging Facility for Learning and Research).

Zařízení pro studium zpožděných neutronů je instalováno u stínění reaktoru na dolní podlaží haly reaktoru v blízkosti jednoho z výstupů potrubní pošty. Umožňuje detekovat zpožděné neutrony emitované vzorky štěpného, resp. štěpitelného materiálu, po jejich ozaření v aktivní zóně reaktoru. Zařízení se skládá z velkého polyetylenového moderačního bloku s centrálním otvorem, který je kanálem propojen s výstupem potrubní pošty. Okolo centrálního otvoru jsou symetricky rozmístěny otvory pro instalaci detektorů neutronů, které zajišťují automaticky detekci zpožděných neutronů.

nů po zavedení ozářeného vzorku do moderačního bloku.

Zařízení pro studium vlivu bublinkového varu na reaktivitu umožňuje simulovat rozvoj bublinkového varu v aktivní zóně reaktoru (viz Obr. 10). Systém je tvořen řídicí jednotkou, vedením stlačeného vzduchu a dvěma koncovkami s generátory bublinek, které jsou umístěny v aktivní zóně. Ve standardním rozmístění je jedna koncovka umístěna pod palivovým článkem a jedna pod obrysovou maketou. Koncovka pod palivovým článkem umožňuje simulovat rozvoj bublinkového varu v podmoderované oblasti reaktoru a koncovka pod maketou pak v oblasti přemoderované. Průtok vzduchu, a tím i množství generovaných bublinek, je řízen pomocí řídicí jednotky. Studenti mohou sledovat odezvu reaktoru na tyto změny na pultu operátora.

Vertikální oscilátor umožňuje provádět velmi rychlé změny reaktivity v axiálním směru aktivní zóny reaktoru. Hlavní součástí zařízení je vertikální kanál, uvnitř kterého se pohybuje pouzdro se vzorkem ovlivňujícím reaktivitu. Koncovka experimentálního kanálu je navržena s ohledem na umístění do šestitrubkového nebo čtyřtrubkového palivového článku. Pohyb vzorku je zajišťován pomocí táhla poháněného pneumatickým pohonem. Pohyb vzorku lze ovládat a definovat pomocí řídicí jednotky. Ta umožňuje definovat rychlost pohybu vzorku, jeho počáteční pozici, dolní koncovou pozici, horní koncovou pozici, zdržení v jednotlivých pozicích a počet cyklů, které se mají provést. Odezvu reaktoru na změny reaktivity vyvolané tímto zařízením mohou studenti opět sledovat na pultu operátora nebo pomocí nezávislého detekčního systému.

Zařízení pro neutronové zobrazování NIFLER bylo vyvinuto pracovníky Katedry jaderných reaktorů v nedávné době. Jeho součástí je detekční systém, kolimátory a moderační materiály pro úpravu svazku neutronů v radiálním kanále reaktoru. Zařízení umožňuje realizovat experimenty neutronového zobrazování i na reaktoru malého výkonu, jakým je reaktor VR-1. Celou experimentální úlohu se podařilo optimalizovat tak, že ji lze využít jak pro výukové, tak pro výzkumné účely (viz neutronový radiograf na Obr. 11).

V neposlední řadě rozšířil experimentální možnosti reaktoru v letošním roce pořízený D-D generátor neutronů (viz Obr. 12). Generátor je možné provozovat nejen v kontinuálním, ale i pulzním režimu s relativně nízkými frekvencemi (desítky Hz), což umožňuje realizovat experimentální úlohy pulzního zdroje neutronů.

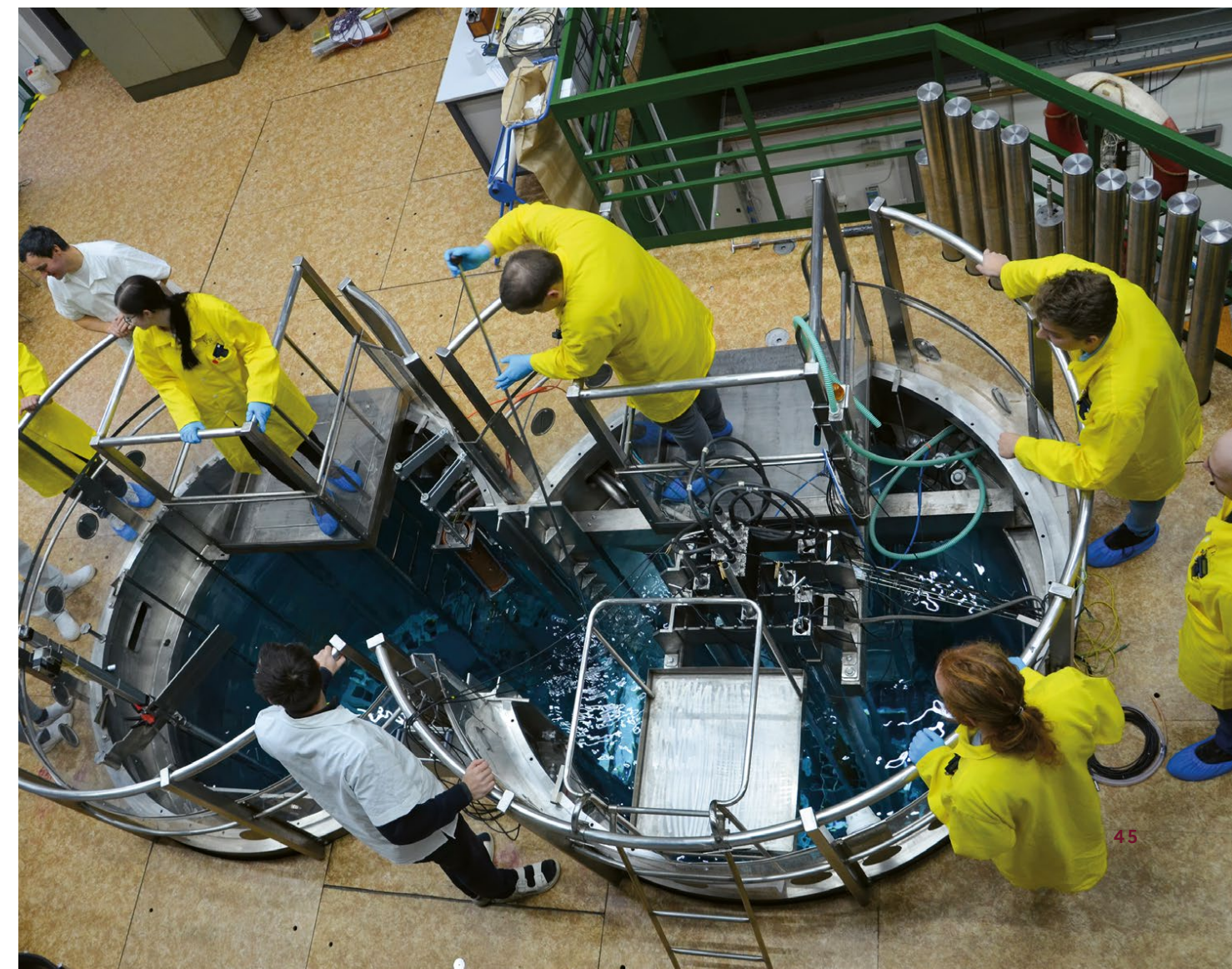
Generátor byl vybrán tak, aby jej bylo možné umístit do radiálního kanálu reaktoru.

3. Využívání reaktoru

Pracoviště s reaktorem VR-1 bylo primárně vybudováno za účelem zkvalitnění a prohloubení výuky budoucích jaderných expertů pro československý jaderný program. Neméně důležitým posláním bylo i doplnění a rozšíření teoretické přípravy specialistů z jaderné energetiky praktickými úlohami z experimentální reaktorové fyziky a samozřejmě zajištění informační a osvětové činnosti v oblasti využívání jaderné energie. V poslední době se reaktor snaží více uplatnit také na poli vědecko-výzkumném, a to i přes omezení, která jsou dána jeho nízkými výkonovými parametry.



Obr. 13: Studenti při praktické výuce na reaktoru VR-1



3.1 Výuka a výcvik

Reaktor je využíván hlavně pro výuku studentů technických vysokých škol v oblasti reaktorové a neutronové fyziky, radiační ochrany, jaderné bezpečnosti, nebo neutronových aplikací. Kromě studentů ČVUT využívají reaktor i posluchači ostatních vysokých škol v České republice. Pravidelnými účastníky praktických cvičení na reaktoru jsou studenti Vysokého učení technického v Brně a Západočeská univerzity v Plzni.

V závislosti na studijních plánech a zaměřeních jednotlivých univerzit probíhá výuka v pravidelném týdenním rozvrhu (především studenti FJFI) nebo turnusovou formou jednorázových tříd nebo pětidenních kurzů (studen-

ti z Brna a Plzně). Podle požadavků pedagogů jsou pak sestavovány konkrétní náplně kurzů, tj. kurzy na reaktoru jsou „šity na míru“ zákazníkovi. V současnosti je na reaktoru připraveno více než 25 experimentálních úloh. Většina úloh je k dispozici ve třech úrovních: demonstrační, standardní a rozšířená. Demonstrační úroveň je určená k základnímu pochopení fyzikálního jevu, který je v metodice aplikován, a studenti jsou zde spíše pasivními pozorovateli. Ve standardní úrovni se studenti již aktivně zúčastňují experimentu a samostatně vyhodnocují naměřené výsledky. Rozšířená úroveň je určena k podrobnému studiu dané problematiky, vyžaduje hlubší teoretické znalosti studentů a jejich

aktivní účast při přípravě měření, jeho průběhu i vyhodnocení a interpretaci získaných hodnot. Studovaný jev nebo proces se často sleduje z několika různých přístupů nebo podmínek.

Mezi základní úlohy realizované na reaktoru VR-1 patří:

1. Detekce neutronů a studium statistického charakteru záření
2. Detekce zpožděných neutronů a určování jejich parametrů
3. Měření periody a doby zdvojení reaktoru
4. Měření reaktivity různými metodami
5. Určování charakteristik absorpční tyče
6. Studium kinetiky nulového reaktoru a jeho odezvy na různé změny reaktivity
7. Studium teplotních efektů na reaktoru
8. Určení rozložení hustoty toku neutronů v aktivní zóně
9. Kritický experiment
10. Nácvik provozu a řízení reaktoru

Pokročilé úlohy jsou zaměřeny například na charakteristiku spektra neutronů v aktivní zóně pomocí aktivačních detektorů, stanovení absolutní hustoty toku tepelných neutronů, využití metod pulzního zdroje neutronů a šumové analýzy, anebo různé aplikace neutronové aktivační analýzy. Pro všechny používané experimentální úlohy jsou zpracovány a publikovány učební texty a návody k úlohám (v českém i anglickém jazyce).

Velmi populární je semestrální projekt pro studenty navazujícího magisterského studijního programu, v rámci něhož studenti navrhnou a výpočtově ověří novou konfiguraci aktivní zóny a připraví nezbytnou dokumentaci pro SÚJB. Následně pak během týdenního experimentu aktivní zónu sestaví a experimentálně ověří. Při experimentu vykonávají pod dohledem pracovníků reaktoru veškeré manipulace, včetně manipulací s palivem, provádějí kontrolu uvnitř reaktorové nádoby (viz Obr. 13) a při sestavování aktivní zóny realizují potřebná měření.

Nedílnou součástí využívání reaktoru VR-1 je i výuka studentů, kteří přijíždějí ze zahraničí. Dlouhodobá spolupráce probíhá se školami ze Slovenska (Slovenská technická univerzita v Bratislavě), Velké Británie (Defence Acade-

my of the United Kingdom a The University of Manchester), USA (The University of Tennessee, Knoxville a The Middlebury Institute of International Studies), Švédska (KTH Royal Institute of Technology) a Finska (Aalto University). Na několikaměsíční stáže přicházejí studenti z Francie (ENSI CAEN, Grenoble INP – Phelma, nebo Centrale Méditerranée)

Úzkou spoluprací v oblasti výuky a výcviku má pracoviště reaktoru VR-1 také s Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (MAAE). Velmi často jsou na reaktoru vedeny stáže zahraničních pracovníků v rámci různých programů MAAE. Kromě toho se před pěti lety zapojil reaktor VR-1 do projektu Internet Reactor Lab, který iniciovala a podporuje MAAE. Cílem projektu je umožnit vzdálený přístup pracovníkům zemí, které usilují o rozvoj své jaderné infrastruktury. Díky tomu bylo pracoviště dovybaveno videokonferenčním systémem, kamerovým systémem zabírajícím různé součásti reaktoru a systémem pro přenos dat z reaktoru. To umožňuje zájemcům absolvovat praktická cvičení, aniž by museli být přítomni na reaktoru. V reálném čase tak mají přístup ke všem důležitým hodnotám z reaktoru i experimentálních zařízení, včetně dat z detekčních systémů neutronů. Pomocí videokonferenčního systému komunikují s vedoucím výuky na reaktoru a zároveň mohou přes kamerový systém sledovat činnost operátora ve velínu reaktoru, nebo manipulace v jiných částech reaktoru. Každý rok je takto realizováno pět vysílání až pro čtyři různé země.

V neposlední řadě jsou na reaktoru organizovány specializované výcvikové kurzy, které jsou součástí přípravy provozního personálu jaderných elektráren. Operátoři a kontrolní fyzici obou našich i slovenských jaderných elektráren se v třídních nebo pětidenních kurzech zaměřují zejména na praktické aplikace z oblasti reaktorové fyziky (např. měření zpožděných neutronů, studium dynamiky jaderného reaktoru, měření reaktivity, kalibrace regulační tyče nebo bezpečné dosahování kritického stavu). Ročně proběhnou na reaktoru dva až čtyři výcvikové kurzy tohoto typu.

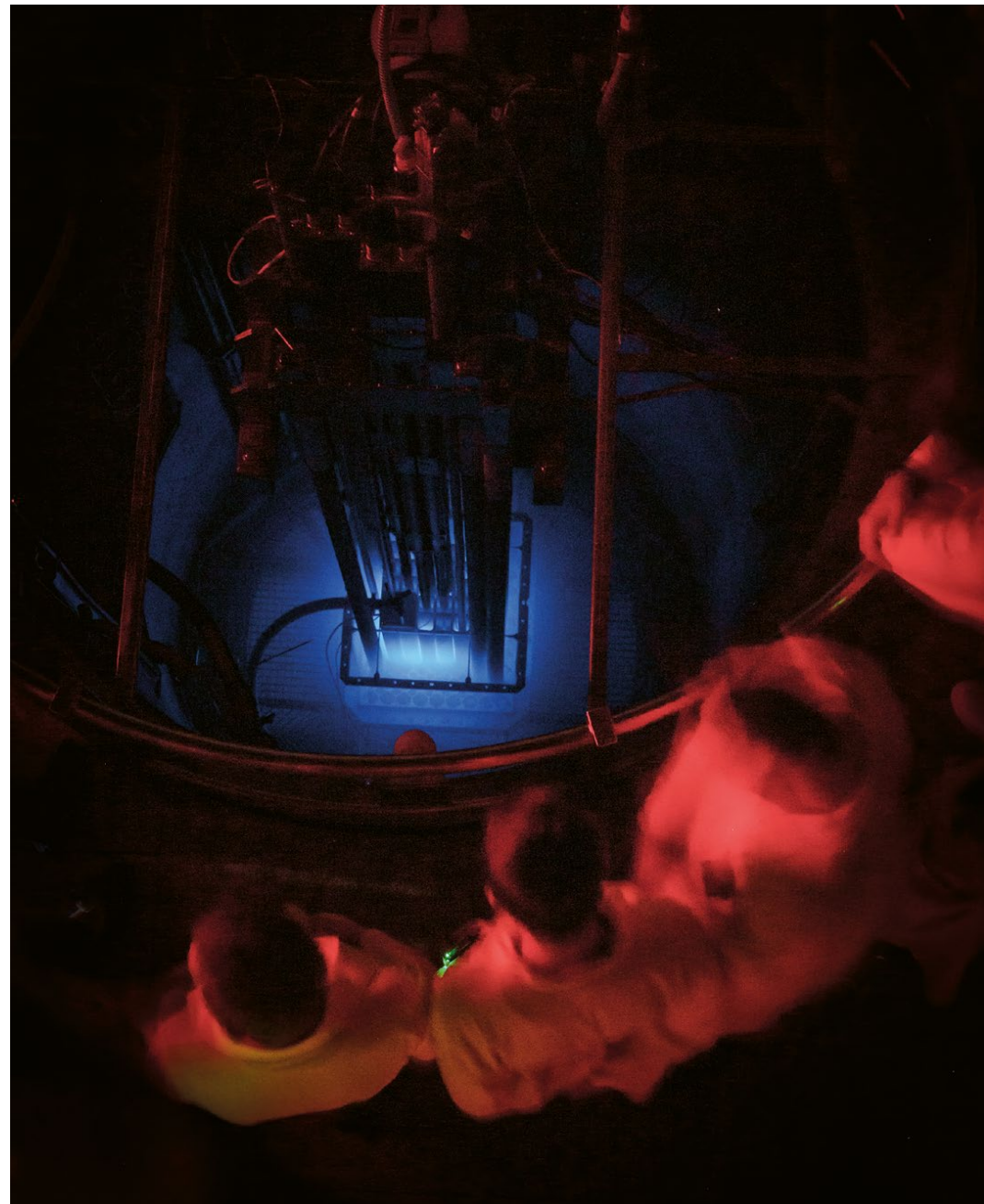


Obr. 14: Studenti Aalto University z Finska nacvičují uvádění reaktoru VR-1 do provozu





Obr. 15: Čerenkovovo záření na reaktoru VR-1 při exkurzi pro veřejnost



3.2 Informační a osvětová činnost

Velmi důležitou součástí využívání reaktoru je i informační a osvětová činnost. V jejím rámci přichází na reaktor velké množství návštěvníků, nejčastěji studentů středních a vysokých škol. Je pro ně připraven zajímavý a atraktivní program, tzn. exkurze s ukázkou provozu. Každoročně navštíví reaktor 300 až 400 studentů středních škol a přibližně 100 dalších návštěvníků přichází z řad široké veřejnosti. Odezva na tyto exkurze je vysoce pozitivní, návštěvníci mají možnost se při nich seznámit se všemi dů-

ležitými aspekty využívání jaderné energie. Poměrně časté jsou také exkurze pro návštěvy ze zahraničí. Velmi populárními se staly zimní exkurze s „Čerenkovem“ (viz Obr. 15).

Informace o možnosti exkurzí na reaktoru VR-1 mohou zájemci získat na jeho webových stránkách: www.reaktorvr1.eu.

3.3 Využití reaktoru pro výzkum a vývoj

Výzkumné práce jsou na reaktoru limitovány především jeho relativně malým výkonem. Proto jsou zaměřeny na aktivity, kde nízký výkon

není překážkou. Jedná se například o srovnávání výpočtů různých reaktorových parametrů s experimentálními výsledky, studium dynamických vlastností násobících soustav, aplikace neutronové aktivační analýzy, vývoj řídicích a detekčních systémů, včetně jejich testování apod. Výhodou reaktoru je jeho značná flexibilita, dle potřeb daného experimentu lze sestavit konkrétní konfiguraci aktivní zóny s potřebným experimentálním vybavením. Především vědecko-výzkumné aplikace neutronové aktivační analýzy jsou na reaktoru VR-1 realizovány napříč různými obory (umění, historie, životní prostředí nebo třeba biologie). Jako příklad zajímavého projektu lze uvést zkoumání koster-ních pozůstatků mamutů pomocí neutronové aktivační analýzy, který byl na reaktoru realizován ve spolupráci s Archeologickým ústavem AV ČR, Brno.

Reaktor VR-1 a jeho budoucnost

Školní reaktor VR-1 úspěšně slouží českému, resp. československému „jádro“ již 35 let. Za tu dobu si vydobyl renomé nejen doma, ale i v zahraničí, což dokládá stále se zvyšující počet zájemců o jeho služby.

Jedním z důležitých předpokladů jak být úspěšným výukovým jaderným zařízením je kvalitní provozní personál a pravidelná modernizace jeho komponent a vybavení. A to se daří

dlouhodobě na Vrabcevi plnit. Provozní personál je soustavně doplňován o mladé pracovníky, především z řad čerstvých absolventů FJFI. Modernizace a inovace probíhá na reaktoru téměř každý rok, stejně tak i rozšiřování experimentálního vybavení. V letošním roce byla například provedena již zmíněná výměna absorpčních tyčí a radiačního monitorovacího systému, příští rok proběhne výměna jednotek provozního měření výkonu. V dalších letech se předpokládá výměna jednotek nezávislé výkonové ochrany a řada dalších změn. Kontinuálně bude probíhat také rozšiřování experimentálního vybavení reaktoru a výukového programu.

Při provozu a využívání reaktoru je samozřejmě kladen důraz na dodržování přísných požadavků české atomové legislativy. I proto jsou dosavadní zkušenosti z provozu Vrabce více než pozitivní a díky pečlivým provozním kontrolám, kvalitní údržbě a kontinuální modernizaci má reaktor dlouhodobou perspektivu spolehlivého provozu. Tento optimismus vyplývá z dobrého stavu hlavních komponent reaktoru, soustavného zdokonalování zařízení i jeho personálu a důkladné přípravy provozovatele reaktoru na prodlužování jeho životnosti.

Na závěr nezbyvá než popřát Vrabcevi minimálně další 35 ve službách českého jaderného vzdělávání.



Ing. Jan Rataj, Ph.D.

jan.rataj@fjfi.cvut.cz

Jan Rataj, vedoucí katedry jaderných reaktorů, FJFI ČVUT v Praze, absolvoval magisterské a doktorské studium na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze v oboru Jaderné inženýrství. V roce 2001 se stal pracovníkem Katedry jaderných reaktorů, od roku 2005 zde působí jako akademický pracovník. V letech 2008 až 2018 zastával funkci vedoucího provozu reaktoru VR-1 a zástupce vedoucího katedry, od roku 2018 vykonává funkci vedoucího katedry. Je garantem bakalářského studijního programu Jaderné inženýrství. Jako akademický pracovník zajišťuje výuku v oblasti experimentální neutronové a reaktorové fyziky. Věnuje se experimentální a výukové činnosti na reaktorech VR-1 a VR-2 a rozvoji jaderného vzdělávání v ČR. Spolupracuje s MAAE v oblasti využívání výzkumných jaderných reaktorů a podpory jaderného vzdělávání a výcviku, účastní se misí MAAE zaměřených na hodnocení bezpečnosti výzkumných jaderných zařízení. Je členem Rady Státního ústavu radiační ochrany, v.v.i.

Výročí 25 let záchytové terapie na reaktoru LVR-15

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

Článek připomíná 25 let od zahájení borové záchytové terapie (BNCT) na reaktoru LVR-15, která kombinuje cílenou akumulaci boru v nádorových buňkách s ozářením neutronovým svazkem. Popisuje princip metody, její využití při léčbě radiorezistentních nádorů, historii prvního klinického ozáření v ČR a současný výzkum včetně projektu NuCapCure zaměřeného na inovativní kombinace neutronové a protonové terapie.

The article marks 25 years since the introduction of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) at the LVR-15 reactor, combining targeted boron accumulation in tumour cells with neutron irradiation. It explains the method's principle, its role in treating radioresistant cancers, the history of the first clinical exposure in the Czech Republic, and ongoing research, including the NuCapCure project focused on innovative neutron and proton therapy combinations.

Využití výzkumných reaktorů pro radiomedicínu
Výzkumné jaderné reaktory představují klíčovou infrastrukturu pro moderní radiomedicínu zejména v oblasti produkce radioizotopů využívaných pro diagnostiku a terapii. Nukleární medicína se stala nedílnou součástí klinické praxe, přičemž radioizotopy umožňují nejen zobrazování anatomických struktur, ale i sledování funkčních procesů v organismu. Diagnostické metody, jako je fotonová emisní tomografie (SPECT) a pozitronová emisní tomografie (PET), využívají radionuklidy s krátkým poločasem rozpadu – například technecium-99m – které poskytují vysokou citlivost a specifitu při detekci patologických změn.

Produkce těchto radionuklidů je závislá na vysokém toku neutronů, který typicky poskytují výzkumné reaktory nebo urychlovače. Nejvýznamnější izotop pro diagnostiku, molybden-99 (prekurzor technecia-99m), kromě toho se v výzkumných reaktorech aktivují cílové materiály pro výrobu dalších radionuklidů, například lutecia-177, terbia-161, jódu-131 nebo iridia-192 pro terapeutické účely.

Evropské reaktory, jako BR2 (Belgie), HFR (Nizozemsko), Maria (Polsko) či LVR-15 (Česká republika), zajišťují významnou část světové produkce lékařských radioizotopů. Jejich role přesahuje pouhou výrobu – slouží také jako platforma pro vývoj nových radiofarmak a inovativních metod, ale i pro vývoj speciální apli-

kace pro oblast léčby nádorových onemocnění v podobě například borové záchytové terapie.

Borová záchytová terapie
Borová záchytová terapie (BNCT, Boron Neutron Capture Therapy) představuje inovativní metodu cílené radioterapie, která kombinuje biologickou selektivitu s fyzikální přesností. Princip spočívá v selektivní akumulaci izotopu boru-10 (¹⁰B) v nádorových buňkách a následném ozáření neutronovým svazkem, což vede k vysoce lokalizovanému uvolnění destruktivní energie. BNCT je zkoumána zejména pro léčbu radio-resistentních nádorů, jako jsou glioblastomy, melanomy či recidivující karcinomy hlavy a krku.

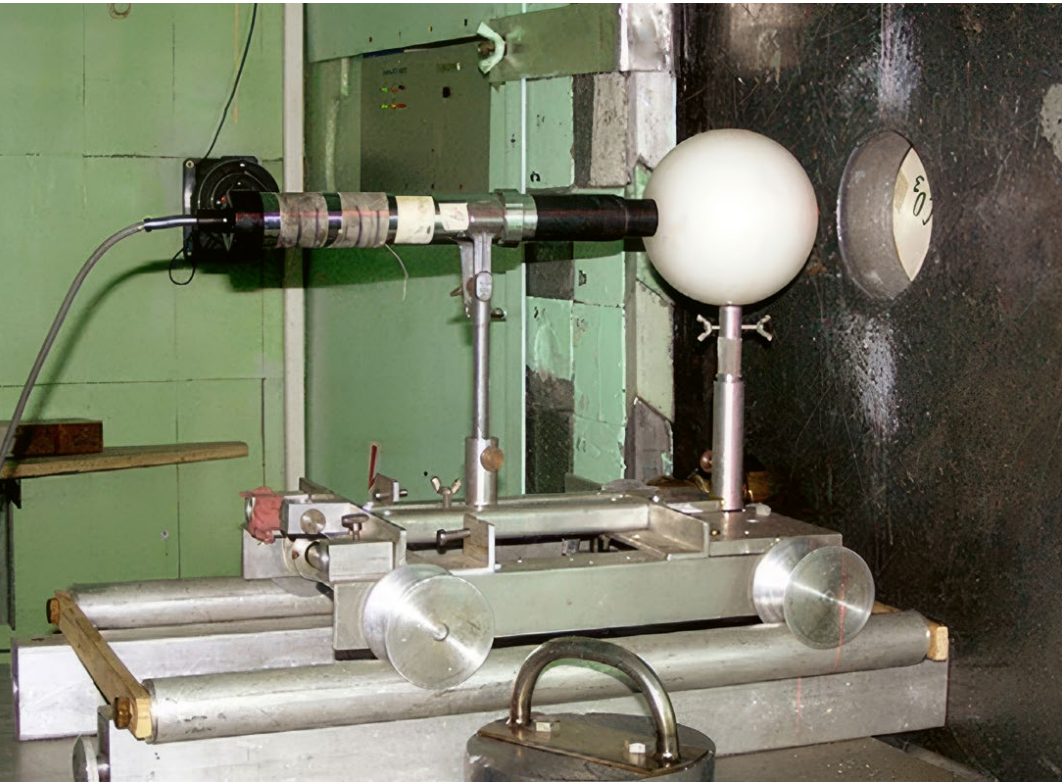
Typicky BNCT probíhá ve dvou základních fázích:

1) Farmakologická příprava
Pacientovi se podá sloučenina obsahující ¹⁰B, která se preferenčně hromadí v nádorové tkáni. Nejčastěji používané látky jsou borofenylalanin (BPA) a natrium-borokaptát (BSH). Cílem je dosáhnout co nejlepšího poměru koncentrace boru v nádoru vůči zdravé tkáni.

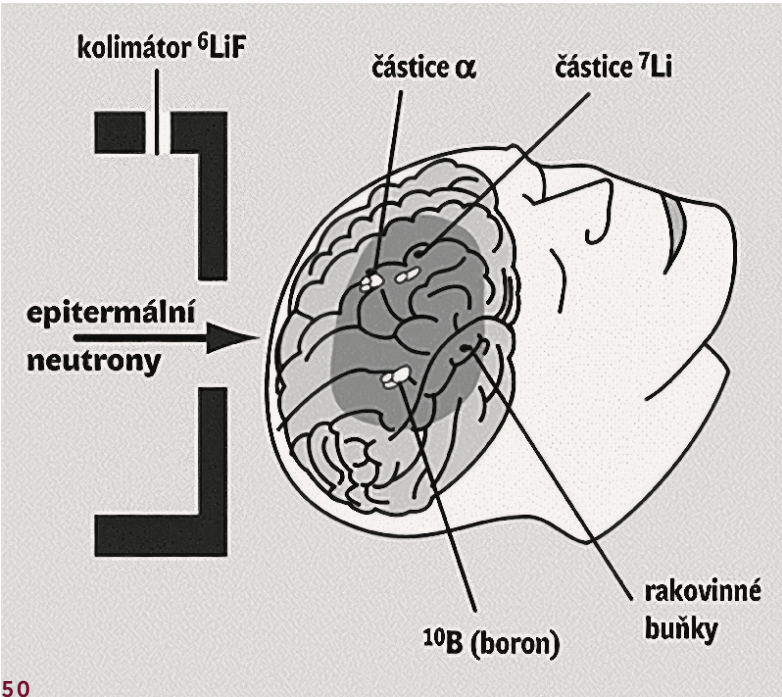


2) Neutronové ozáření
Po dosažení optimální distribuce boru je pacient vystaven svazku neutronů. Neutrony pronikají do tkáně, zpomalují se na termální energii a reagují s ¹⁰B podle reakce: ¹⁰B+n → ⁷Li+α+γ

Produkty této jaderné reakce – částice α a jádra lithia – mají vysoký lineární přenos energie a dosah pouze několik mikrometrů, což zajišťuje významné poškození v okolí buněk obsahujících bor bez významného poškození ostatní tkáně ve větší vzdálenosti.



← **Obr. 1:** Princip BNCT (zdroj: ÚJV Řež, a. s.)



↑ **Obr. 2:** Stínění a manipulační vozík bývalé tepelné kolony VVR-S (zdroj: ÚJV Řež, a. s.)

← **Obr. 3:** Testovací měření pro ověření charakteristik epitermálního svazku (zdroj: ÚJV Řež, a. s.)



↑
Obr. 4: Pacient při ozařování na reaktoru LVR-15 (zdroj: ÚJV Řež, a. s.)

→
Obr. 5: Model části lidského těla, alias fantom František (zdroj: ÚJV Řež, a. s.)



Historie na LVR-15

Vývoj v oblasti BNCT je založen na využití epi-termálního svazku na reaktor LVR-15. Tento svazek byl vystaven na místě bývalé tepelné kolony reaktoru VVR-S a je jedním z několika tzv. radiálních kanálů, které umožňují vyvedení neutronového svazku skrz stínění reaktoru pro potřeby měření.

Vývoj samotného pracoviště probíhal ve spolupráci s odbornými pracovišti i mimo tehdejší Ústav jaderného výzkumu v Řeži jako například SÚRO, Katedra dozimetrie FJFI ČVUT v Praze nebo Onkologická klinika VFN. Cílem byla výstavba ozařovací komory a velínu pro obsluhu umožňující bezpečnou realizaci ozařování včetně provádění testů s prvními pacienty.

První český pacient se zhoubným nádorem mozku byl reaktoru LVR-15 ozářen 28. září 2000. Česká republika stala teprve pátou zemí světa, která provedla klinickou aplikaci neutronové zachytové terapie. Předchozí testy metody BNCT byly provedeny v USA (BNL – Brookhaven National Laboratory, MIT – Massachusetts Institut of Technology), Japonsku (KURR Kyoto University Research Reactor, JRR – 4 JAERI

Tokai), Holandsku (ECN a JRC Petten) a Finsku (FiR-1, VTT Espoo).

Součástí vývoje metody BNCT bylo nejen samotné vybudování pracoviště pro potřeby ozařování, ale také zdokonalené způsoby monitorování svazku, vývoj metod hodnocení včetně zajištění potřebných přípravných měření. Pro potřebný hodnocení dopadů byly vytvořeny i potřebné fantomy simulující lidské tělo.

Budoucnost na LVR-15

Přestože dříve využívaný speciální svazek epi-termálních neutronů na tepelné koloně reaktoru ani původně vyvinuté pracoviště BNCT na LVR-15 nejsou dále provozovány, výzkum v oblasti zachytové terapie pokračuje.

Díky navázané spolupráci s týmy z Řecka (z uzavřeného reaktoru Demokritos) a specialisty z norských lékařských institutů byly v nedávné době realizovány sady testů v oblasti zachytové terapie – jak borové, tak gadolinové. Využity byly další neutronové svazky na reaktoru LVR-15 a nově vybudovaná laboratoř v Centru výzkumu Řež (CVŘ) pro výzkum biologických vzorků po ozáření.

Výsledkem spolupráce je několik vědeckých projektů včetně projektů pod záštitou Horizon, jakými je aktuálně mezinárodní projekt NuCapCure (www.nucapcure.eu), kde se v rámci České republiky nepodílí jen infrastruktura a specialisté z CVŘ, ale i odborníci z dalších výzkumných infrastruktur z ČR.

Přístup při řešení projektu NuCapCure zahrnuje vytvoření přizpůsobených fotosenzito-



↑
Obr. 6: Busta člověka pojmenovaná „kamarád“, která se používala při vývoji BNCT metody na reaktoru LVR-15 (zdroj: ÚJV Řež, a. s.)

rů (PS) obsahujících bor s využitím intracelulární biochemie. Tato inovativní strategie usiluje o vytvoření nových radikálních a pro rakovinu specifických léčebných postupů, kombinujících protonovou radioterapii, protonem indukovanou aktivaci PS, terapii zachytem boru a neutrony a neutrony indukovanou aktivaci PS.

Jeden z hlavních cílů projektu NuCapCure se zaměřuje na návrh, vývoj, validaci a optimalizaci léčiv modifikovaných PS s borem. Tyto sloučeniny usnadní intracelulární produkci modifikovaných PS obcházením životně důležitých biosyntetických drah. Jinými slovy, rakovinné buňky se stanou malými individuálními chemickými laboratořemi, které generují finální léky, což povede k jejich destrukci pomocí léčby založené na neutronech nebo urychlených protonech.



Ing. Ján Milčák
jan.milcak@cvrez.cz

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

Jaderné dny 2025

Ing. Jan Ullmann, Ing. David Mašata

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni

Článek se věnuje konferenci Jaderné dny 2025, která představila komplexní odborný i popularizační program zaměřený na současné trendy v jaderné energetice v České republice. Konference na ZČU v Plzni se zaměřila na energetickou bezpečnost Evropy, rozvoj nových jaderných zdrojů a inovace v oblasti SMR. Součástí programu byly panelové diskuze, výstava současných technologií i mezinárodní studentská posterová sekce. Novinkou byly Dny firem, které propojily studenty s průmyslovou praxí. Akce posílila spolupráci akademické sféry, průmyslu a státních institucí a podpořila zájem mladé generace o jadernou energetiku.

Article focuses on the 2025 Nuclear Days conference, which offered a comprehensive expert and outreach programme centred on current developments in nuclear energy in the Czech Republic. The event at the University of West Bohemia addressed Europe's energy security, new nuclear projects and SMR innovation. The programme featured panel discussions, a technology exhibition and an international student poster section. Newly introduced Company Days linked students with industry practice. The conference strengthened cooperation between academia, industry and state institutions and highlighted growing interest in nuclear energy among young professionals.

Již patnáctý ročník Jaderných dnů potvrdil své výsadní postavení mezi odbornými a popularizačními akcemi v oblasti jaderné energetiky v České republice. Úvodní konference pořádaná v prostorách Západočeské univerzity v Plzni přinesla i letos bohatý program zaměřený na aktuální témata evropské energetiky, inovace nebo vzdělávání v této oblasti. Ústředním motivem ročníku a názvem konference bylo heslo

„Jaderná energie a energetická bezpečnost Evropy“, které reflektovalo dynamický vývoj energetického sektoru a rostoucí význam jaderných technologií v kontextu dekarbonizace a posilování stability evropské energetické soustavy. Akce Jaderné dny se konají tradičně s podporou generálního partnera ŠKODA JS a dalších partnerů.

Dvoudenní odborná konference (10.–11. září 2025)

Hlavním pilířem akce byla již tradičně zahajovací odborná konference, která letos proběhla v inovovaném formátu. Organizátoři zvolili kombinaci krátkých úvodních vystoupení a navazujících diskuzních kulatých stolů, což umožnilo otevřenější výměnu názorů a debatu mezi akademickou, průmyslovou a státní sférou. Konference byla simultánně tlumočena do angličtiny a streamována na platformě YouTube, čímž se její dosah výrazně rozšířil i mimo Českou republiku.

První den konference zahájila panelová diskuze „EU, ČR a nové jaderné zdroje“, které se zúčastnila řada významných představitelů české jaderné energetiky. Mezi řečníky vystoupili Tomáš Ehler (Ministerstvo průmyslu a obchodu), Petr Závodský (ředitel projektu EDU II), Alois Míka (poradce společnosti KHNP), dále František Krček (ŠKODA JS), Radek Trněný (Doosan Škoda Power) a Martin Čermák (Sokolovská uhelná). Diskuze přinesla řadu podnětných pohledů na přípravu nových jaderných kapacit nebo investiční rámce v kontextu evropské taxonomie a energetické soběstačnosti.

Následovaly dva tematické kulaté stoly zaměřené na licencování nových jaderných zdrojů a pokročilé reaktorové technologie, které moderoval analytik Jan Žižka. První den byl zakončen společenským setkáním v plzeňském pivovaru, které tradičně nabídlo prostor pro neformální diskuze mezi všemi účastníky akce.

Druhý den konference byl věnován rozvoji lidských zdrojů a zapojení mladé generace do jaderné energetiky. Diskuze se soustředily například na téma malých modulárních reaktorů (SMR), jejich průmyslové implementace nebo role vzdělávacích institucí při přípravě odborníků pro budoucí projekty. SMR byly tématem také dalšího pátečního bloku a konferenci zakončil kulatý stůl na téma životní cyklus jaderných elektráren, o nichž hovořili zástupci průmyslu i akademické sféry. Moderátory jednotlivých sekcí byli Jana Jiříčková z KEE ZČU v Plzni, publicista Jan Žižka a ředitel SÚRAO Lukáš Vondrovic.



Výstava na Fakultě strojní ZČU

Nedílnou součástí Jaderných dnů je výstava v prostorách Fakulty strojní, která doprovází odbornou část konference a pokračuje navazujících pět týdnů. Letošní expozice představila komplexní přehled exponátů současného jaderného průmyslu – od výzkumných institucí, přes univerzity až po zásadní průmyslové podniky v české jaderné energetice. Návštěvníci mohli zhlédnout modely jaderných zařízení, simulátory řízení reaktoru, interaktivní vizualizace i ukázky pokročilých materiálů a výrobních technologií. Výstava tradičně přilákala studenty středních a vysokých škol, odborníky i širokou veřejnost.

Studentská posterová sekce

Zvláštní pozornost byla opět věnována mezinárodní studentské posterové sekci. Soutěž-



Obr. 1: Konference Jaderné dny 2025 (zdroj: Západočeská univerzita v Plzni)



Obr. 2: Panelová diskuze „EU, ČR a nové jaderné zdroje“ (zdroj: Západočeská univerzita v Plzni)

**JADERNÉ
DNY 2025
na ZČU
v Plzni**
10. 9. - 16. 10.

Soutěže
o tablety
při každé
prezentaci

Přednáší
experti
z oboru

Zajímá vás jaderná energie?

Znáte energetické problémy současnosti?
Chcete vědět, jak funguje jaderný reaktor?
Je jaderná energie bezpečná?
Ekologická? Užitečná? Zjistěte to sami!
Navštivte originální výstavu v prostorách ZČU v Plzni.



→
Obr. 3: Zahájení výstavy na FST ZČU v rámci Jaderných dnů 2025 (zdroj: Západočeská univerzita v Plzni)

↓
Obr. 4: Předávání ocenění studentům v rámci posterové sekce (zdroj: Západočeská univerzita v Plzni)

ní práce byly hodnoceny odbornou porotou pod vedením Petra Ereta, vedoucího Katedry energetických strojů a zařízení FST ZČU, a nabídla zajímavé příspěvky z aktuálního výzkumu mladých odborníků v oblasti jaderné techniky – od výpočtových modelů po experimentální aplikace.

Oceněné práce v jednotlivých kategoriích potvrdily vysokou úroveň mladých výzkumníků:

- **Bakalářské studium:**
1. místo – Karolína Nejdlá, ČVUT v Praze
Optimization of the Workplace for Non-Destructive Characterization of Containers for Radioactive Wastes
- **Magisterské studium:**
1. místo – Michaela Svatošová, ČVUT v Praze
Experimental and Computational Modeling of Fuel Cladding under Loss of Coolant Accident Conditions
- **Doktorské studium:**
1. místo – Jan Ullmann, Západočeská univerzita v Plzni



Neural Networks for Predictive Control of SMRs in Industrial Energy Systems

Počet účastníků i kvalita přihlášených studentských prací podtrhuje rostoucí zájem mladé generace o jadernou energetiku i schopnost českých univerzit kvalitně připravovat odbor-



níky na výzvy moderní energetiky. Posterová sekce Jaderných dnů se stává důležitým mostem mezi výzkumem, vzděláváním a průmyslovou praxí.

- Doprovodný program a Dny firem**
Vedle konference, výstavy a tradičních doprovodných přednášek byly letos nově představeny „Dny firem“, které přiblížily studentům fungování klíčových podniků českého jaderného průmyslu. Pilotní ročník nabídl tři tematicky zaměřené dny:
- Den se ŠKODA JS (24. září),
 - Den s ČEZ (8. a 9. října),
 - Den s Doosan Škoda Power (9. října).

Každý den zahrnoval prezentace, diskuze, praktické ukázky a možnost osobního setkání se zástupci praxe. Dny firem se ukázaly jako efektivní nástroj propojení vzdělávací sféry s průmyslem a pomohly studentům získat realistický pohled na možnosti profesního uplatnění v jaderném sektoru.

Nedílnou součástí pětítýdenního doprovodného programu poté byly tradiční tematické přednášky pro studenty středních škol, vždy spojené se soutěží o tablet a v neposlední řadě

celoroční vydávání „Jaderných týdeníků“, které tvoří studenti jaderného oboru na FST.

FabLab University – popularizace a vzdělávání
Zajíma vás zpestřením letošního ročníku byla návštěva mobilní laboratoře „FabLab University“, která během konference zaparkovala přímo v areálu ZČU. Tato interaktivní laboratoř na kolech přilákala více než stovku žáků základních škol z Plzně a okolí a nabídla jim praktické ukázky z oblasti 3D tisku, robotiky či energetiky. FabLab University tak obohatila program Jaderných dnů o nový výrazný vzdělávací rozměr a podpořila rozvoj technického přemýšlení u žáků před nástupem na střední školu.

Závěr
Rok 2025 potvrdil, že Jaderné dny se staly více než jen výstavou a konferencí – představují komplexní platformu pro odborný dialog, popularizaci a vzdělávání. Propojují univerzitní výzkum, průmyslovou praxi, státní sféru a veřejnost a přispívají k formování nové generace odborníků v oblasti jaderné energetiky. Díky těmto aktivitám se Plzeň trvale profiluje jako významné centrum jaderného vzdělávání a výzkumu v České republice.



Ing. Jan Ullmann
ullmann@fel.zcu.cz
Jan Ullmann je absolventem Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni v oboru Výkonové systémy a energetika. V současné době působí jako vědecký pracovník a student doktorského studia na FEL ZČU, zabývá se využitím neuronových sítí a AI v oblasti jaderné energetiky. Podílí se také na organizaci konference Jaderné dny.



Ing. David Mašata
masata@fel.zcu.cz
David Mašata je absolventem Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni v oboru Elektroenergetika. V současné době zde působí na Katedře elektroenergetiky jako vědecký pracovník a studuje v doktorském studijním programu. Zabývá se potenciálem a optimalizací využití jaderných zdrojů k výrobě tepla pro dálkové vytápění a je součástí týmu organizátorů konference Jaderné dny nebo Intercontinental Nuclear Institute.



<http://jadernedny.cz>



<http://skoda-js.cz>

Z knihy Vznik a historie státního dozoru nad jadernou bezpečností

Ze vzpomínek Zdeňka Kříže, díl šestnáctý

Tak, jak se od poloviny padesátých let vyvíjely jaderné technologie, vyvíjel se i názor na bezpečnost a zejména pravidla v tomto novém odvětví. Prvotní linie byla zaměřena především na nešíření jaderných zbraní, vznikla Mezinárodní atomová agentura (MAAE), ale začínaly se formovat i národní dozory.

V Československu vznikla Československá atomová komise (ČSKAE) a skupinka jaderných inženýrů kolem Ing. Jiřího Beránka a Ing. Zdeňka Kříže začala formulovat první pravidla jaderné bezpečnosti.

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

Státní systém kontroly a evidence jaderných materiálů

Po uzavření Smlouvy o nešíření jaderných zbraní (NPT) z roku 1968 a jejího vstupu v platnost na základě Dohody o provádění záruk MAAE v ČSSR v roce 1972 bylo nutno urychleně vydat potřebnou legislativu a vytvořit požadovaný státní systém pro kontrolu a evidenci jaderných materiálů a zahájit potřebné domácí kontrolní činnosti.

Ministerstvo zahraničních věcí vydalo vyhlášku č. 61/1974 Sb., O Smlouvě o nešíření jaderných zbraní /31/, která se tímto stala součástí našeho legislativního systému. Následně vydala ČSKAE vyhlášku č. 28/1977 Sb., O evidenci a kontrole jaderných materiálů, která v souladu s dokumenty MAAE definovala podrobně požadavky na státní dozor nad evidencí a kontrolou jaderných materiálů. Vyhláška stanovila odpovědnosti vedoucího organizace, kde se jaderné materiály nacházejí, požadavky na vedení evidenčních a provozních záznamů o jaderných materiálech, povinnosti vedoucího evidence jaderných materiálů na každém pracovišti, kde se jaderný materiál nacházejí. Dále

byla stanovena povinnost provádět tzv. fyzické inventury jaderných materiálů, zpracovat údaje o konstrukci jaderných zařízení tzv. Design Basis Information (DBI) a informace o oblastech bilance jaderného materiálu (MBA – Material Balance Area), které byly stanoveny v rámci zmíněné dohody a mezi MAAE a ČSSR.

Důležitou částí vyhlášky bylo ustanovení o mezinárodních převodech jaderných materiálů, kde byla nutná spolupráce s organizacemi zahraničního obchodu. Dále bylo nutno stanovit pravidla pro spolupráci s inspektory MAAE, kteří prováděli nezávislé inspekce na našich zařízeních a tím ověřovali funkčnost a spolehlivost našeho Národního systému kontroly a evidence jaderných materiálů (State System of Accountability and Control – SSAC). Inspektoři MAAE prováděli kontrolu formou ověřování tzv. knižní inventury (záznamů) a fyzické kontroly jaderných materiálů jak z hlediska jejich počtu, složení, případně obohacení uranem 235, a byli k tomu vybaveni potřebnými přístroji. Kontrolovali například neporušenost pečeti, které instalovali a doplňovali, vyměňovali záznamová zařízení na TV kamerách v reaktorovém sále a na



← **Obr. 2:** Kniha Zdeňka Kříže, Vznik a historie státního dozoru nad jadernou bezpečností Československé komise pro atomovou energii (1970–1992)

dalších místech, která byla vytypována jako citlivá z hlediska záruk.

Tato činnost dozoru byla významná ze dvou důvodů. Jako členská země Smlouvy se bývalé Československo stejně jako jiné nejaderné země zavázalo, že nebude vyvíjet jadernou zbraň a že umožní inspektorům MAAE vstup na citlivá místa v jaderných zařízeních. Kromě toho šlo o to plně prokázat správnost a pravdivost našich informací, předaných do MAAE, neboť v případě zjištění vážného porušení Smlouvy NPT může MAAE tuto skutečnost oznámit pří-

mo Radě bezpečnosti OSN, která může vyhlásit proti této zemi sankce (viz nedávné případy Iráku, Íránu a Severní Koreje). Toto bylo zvláště důležité, protože v první polovině 70. let bylo v bývalém Československu v provozu citlivé jaderné zařízení z hlediska záruk, což byla jaderná elektrárna A-1 v Jaslovských Bohunicích. Její reaktor měl palivové články z přírodního kového uranu, které se mohly na provozu kontinuálně vyměňovat pomocí zavážecího stroje. Palivo mělo poměrně nízké vyhoření, tj. ozářené palivo obsahovalo plutonium velmi kvalitního

složení, což je materiál vhodný pro výrobu jaderné bomby. Československo mělo v té době k dispozici i tzv. horké komory v Ústavu jaderného výzkumu v Řeži, které umožňovaly manipulace s vysoce aktivním materiálem, takže pro přepracování paliva bylo k dispozici potřebné zařízení. Proto bylo nutné spolehlivě prokazovat, že je Smlouva u nás plněna perfektně.

Uplatňování záruk na ostatních zařízeních včetně jaderných elektráren VVER je mnohem jednodušší z hlediska kontrolních zárukových postupů. Zde je výměna paliva prováděna v rámci odstávek jednou za rok a v průběhu provozu je víko reaktorové nádoby zapečetěno pečetěmi MAAE a po celý rok sledováno objektivitami kamer MAAE. Národní systém byl vždy MAAE vyhodnocován jako velmi spolehlivý a řada našich pracovníků pracovala v MAAE v oblasti záruk jako inspektoři a v pozicích vedoucích pracovníků divize záruk.

Přesto jsme se jednou dostali v této oblasti vlastní vinou do potíží. Po krizi ČSKAE v 2. polovině roku 1989, která bude stručně zmíněna v další části, došlo k politováníhodnému případu. Zpočátku byla databáze národního systému kontroly a evidence jaderných materiálů vedena na počítači EC 1040 v ÚJV Řež. Koncem 80. let,

kdy začínaly být k dispozici první stolní počítače, byl zahájen převod této databáze z ÚJV na ČSKAE. Vedoucí oddělení kontroly jaderných materiálů, který v roce 1990 odcházel z ČSKAE, však úmyslně vymazal ze stolního počítače na ČSKAE všechna záruková data. Bylo nutné hlásit tento případ ztráty zárukových dat nejen na policii, ale hlavně na MAAE s tím, že data budou rekonstruována nejpozději během tří měsíců pomocí ještě existující databáze v ÚJV. Všechno se nakonec podařilo napravit, ale pracovníky oddělení jaderných materiálů to stálo mnoho úsilí a nervů.

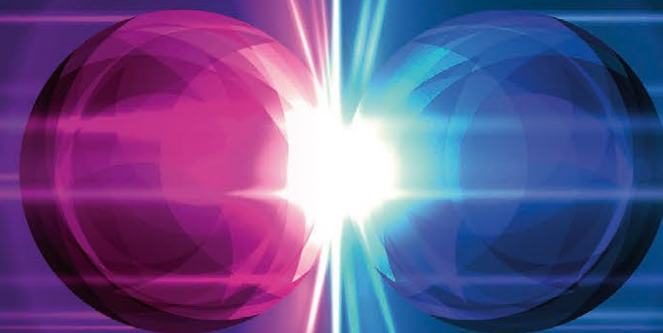
Po rozpadu ČSFR na přelomu let 1992/1993 neprodleně přistoupily oba nově vzniklé státy – Česká republika a Slovenská republika – ke Smlouvě NPT. Národní systémy kontroly a evidence vznikly po zániku ČSKAE neprodleně v rámci nových národních orgánů dozoru – Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) a Úřadu jadrového dozoru (ÚJD). Databáze státního systému kontroly a evidence jaderných materiálů pro jaderná zařízení na Slovensku byly předány z ČSKAE do ÚJD v rámci platné předávací dohody.



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 dozorcí činnosti. Po návratu z MAAE v roce 2001 nastoupil opět do ÚJV Řež jako vedoucí vědeckého sekretariátu. V období 2001–2011 byl předsedou Poradního výboru pro jadernou bezpečnost předsedkyně SÚJB Dany Drábové a od roku 2004 externím členem Výboru pro bezpečnost jaderných zařízení ČEZ, a. s.

Pracujte s technologiemi pro 3. tisíciletí!



Skupina ÚJV, člen Skupiny ČEZ, poskytuje širokou škálu služeb, zahrnujících především projektové a inženýrské činnosti v oblasti jaderné i klasické energetiky, průmyslu azdravotnictví a radise ke špičce technologických pracovišť u nás i v Evropě.

Unikátní zázemí, unikátní technologie, zkušenosti odborníci a specializované technické infrastruktury nám umožňují soutěžit o komplexní zakázky ve všech oborech našeho zaměření na národní i mezinárodní úrovni.



www.ujv.cz/kariera

Proč pracovat pro Skupinu ÚJV?

- **Inovace a technologie**
Budeš mít příležitost pracovat na špičkových technologiích, jako jsou malé modulární reaktory (SMR), a podílet se na vývoji inovací, které formují budoucnost energetiky.
- **Odpovědnost a vliv**
Můžeš aktivně přispět k udržitelné budoucnosti a mít reálný vliv na energetickou politiku a ekologii.
- **Růst a vzdělávání**
Budeš mít možnost neustálého profesního rozvoje a vzdělávání v dynamickém a podporujícím prostředí.
- **Tým a spolupráce**
Budeš součástí týmu odborníků, kde si navzájem pomáháme a sdílíme znalosti, což vytváří inspirativní pracovní atmosféru.
- **Stabilita a zázemí**
Jako člen Skupiny ČEZ se staneš součástí stabilní společnosti se zajištěnou budoucností ve stále se rozvíjícím odvětví.

Benefity



Robert Oppenheimer – může civilizace přežít s jadernou energií? 2. část

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

S objevem možnosti štěpné řetězové reakce na začátku druhé světové války se otevřela cesta k jaderné zbrani schopné zničit naši civilizaci i k jadernému reaktoru pro produkci elektřiny, který má naopak potenciál zajistit dostatek energie pro její dlouhodobý udržitelný rozvoj. Již v té době tak byli Robert Oppenheimer, považovaný za otce jaderné bomby, a jeho kolegové postaveni před otázkou, jak zajistit mírové využití jaderné energie i ve stínu ničivých jaderných zbraní. Podívejme se v historickém kontextu na tyto výzvy a postavu tohoto excelentního fyzika.

Jak získat dostatek energie pro naši civilizaci?

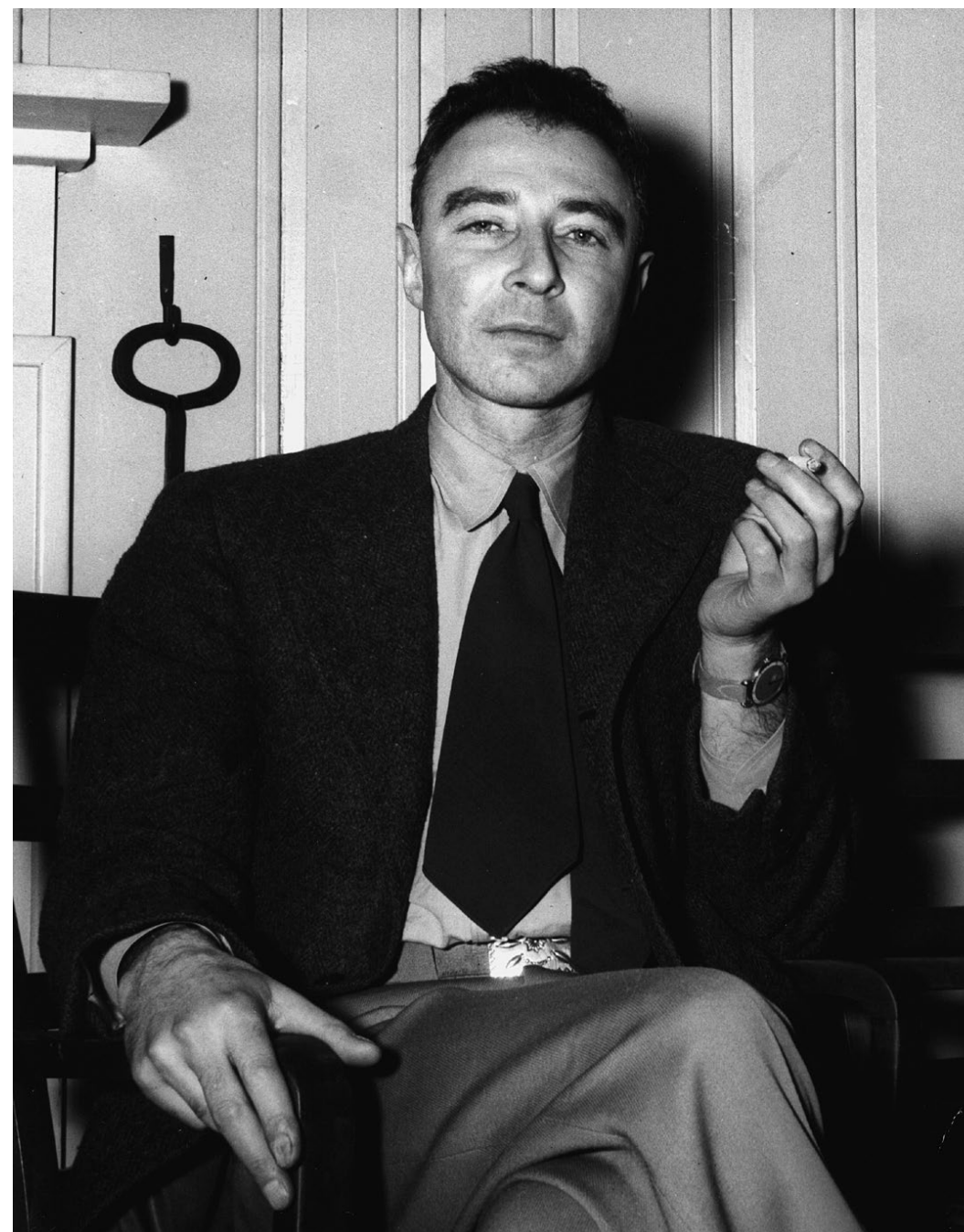
Dostatek energie je klíčovou podmínkou pro přežití lidského společenství a významně přispěl k rozvoji moderní demokracie v jejím současném pojetí, zejména díky průmyslové revoluci umožněné využitím fosilních paliv. Ta je možná pouze v případě zajištění základních potřeb a odpovídající životní úrovně pro všechny členy této společnosti. Starořecká či římská demokracie byla omezena na velmi omezený okruh občanů. Netýkala se otroků, žen a celé řady dalších skupin. Opravdu nešlo o formu zřízení, kterou si představujeme pod pojmem demokracie nyní. Demokracie a její ochrana potřebuje dostatek energie. Pokud se máme obejít bez fosilních paliv, je potřeba za ně mít ekvivalentní náhradu, a ta se podle mě neobejde bez využití jaderných zdrojů.

Už Oppenheimer přikládal velkou důležitost možnosti mírového využití jaderné energie co nejširšímu počtu států. Zapáleným propagátorem mírového využití jaderné energie byl Strauss. Od něj pochází výrok, že jaderná energie bude v budoucnu tak levná, že nebu-

de potřeba instalovat elektroměry. Ten je často vytržený z kontextu zneužíván protijadernými aktivisty při kritice jaderné energetiky.

Již od počátku bylo jasné, že jaderná energie může být i velmi efektivním a kompaktním energetickým zdrojem. Proto se souběžně s vojenským využitím jaderné energie intenzivně pracovalo na jejím využití pro mírové účely. První jaderný reaktor, který vyrobil elektřinu, byl experimentální reaktor EBR-1 v Idaho ve Spojených státech 20. prosince 1951. Ovšem v tomto případě šlo o pouhou demonstraci, při které se rozsvítily pouhé čtyři žárovky. Maximální výkon, kterého byl později reaktor schopen dosáhnout, byl 0,2 MW_e. Jednalo se o první experimentální množivý reaktor chlazený sodíkem.

Úplně první reaktor, který dodával elektřinu domácnostem, byl v Obninsku v Sovětském svazu. Reaktor AM-1 byl předchůdcem reaktorů RBMK a jeho výkon byl 5 MW_e. Fungoval až do roku 2002 a v provozu tak byl 48 let. První západní jadernou elektrárnou reálně dodávající elektřinu domácnostem byla Calder Hall ve Velké Británii. První blok této elektrárny z celkových čtyř začal dodávat elektřinu 24. srpna



←
Obr. 1: Robert Oppenheimer v Guest Lodge, Oak Ridge (zdroj: <https://www.flickr.com/photos/department-of-energy/10405624854>, U.S. Department of Energy, United States Government Work)

1956. Jednalo se o plynem chlazené reaktory typu Magnox s výkonem 60 MW_e. První z nich byl v provozu až do roku 2003, tedy 47 let. Jako zlomovou lze označit jadernou elektrárnu Shippingport v Pensylvánii, která byla prvním reaktorem postaveným čistě pro výrobu elektřiny, a také prvním tlakovodním reaktorem. To je typ, který se i v současné době využívá jako zdroj energie nejčastěji. První elektřinu dodal

blok s výkonem 60 MW_e dne 18. prosince 1957 a reaktor pak pracoval do roku 1982.

Během šedesátých let se realizovaly reaktory I. generace a vyvinuly reaktory II. generace. V sedmdesátých a osmdesátých letech se pak jaderná energetika rozvíjela velmi rychle, podobně jako se v nedávné době rozvíjely větrné a solární zdroje. Mezi lety 1970 až 1990 vzrostla roční produkce elektřiny z jaderných zdrojů z necelých 80 TWh na téměř 1 900 TWh, tedy



↑
Obr. 2: Průmyslová revoluce a rozvoj současné civilizace byl umožněn fosilními zdroji energie, jejich postupná náhrada probíhá teprve nyní - na fotografii uhelná elektrárna Ledvice (zdroj: ČEZ, a. s.)

více než dvacetkrát. V roce 1990 a následujících více než deset let byl podíl jádra na produkci elektřiny okolo 17 %.

V té době byly v čele rozvoje jaderné energetiky Spojené státy a Evropa. V USA nakonec překročil v maximu počet reaktorů číslo sto a v počtu reaktorů druhá Francie se v počtu bloků v provozu dostala téměř k šedesátce. Největší rozvoj je spojen s ropnou krizí, kdy hlavně evropské státy, které na rozdíl od USA mají omezené zdroje ropy a plynu, viděly v jaderné energetice možnost zajistit stabilní zdroj nefosilní energie. Francie tak během zhruba dvaceti let přešla k nízkoemisní elektroenergetice, ve které jaderné elektrárny produkují přes 70 % elektřiny. Francie zároveň ve velké míře přešla na vytápění elektřinou, a i v této oblasti se dobrala nízkoemisnosti. Francie tak ukázala, že je možné kombinací jaderných a obnovitelných

zdrojů dosáhnout nízkoemisní elektroenergetiky. Je třeba připomenout, že těmi obnovitelnými zdroji byly z počátku dominantně vodní elektrárny a Francie necítila na nízké emise, ale na vyloučení hrozby při výpadku dovozu fosilních paliv, které se projeví v době ropných krizí v roce 1973 a 1979.

Ropné krize opadly, zásoby fosilních paliv se ukázaly daleko větší, než se předpokládalo a nezbytnost náhrady fosilních zdrojů klesla. K tomu se připojily intenzivní kampaně protijaderných aktivistů a dopady havárií ve Three Mile Island a Černobylu. Navíc se reálná doba provozování jaderných reaktorů ukázala delší, než se původně předpokládalo. Nebylo tak potřeba je nahrazovat novými zdroji. V Evropské unii a Spojených státech se tak výstavba nových reaktorů téměř zastavila.



↑
Obr. 3: První výroba použitelné jaderné elektřiny v Argonne National Laboratory v Idahu proběhla 20. prosince 1951, kdy byly rozsvíceny čtyři žárovky elektřinou vyrobenou z reaktoru EBR-1. (zdroj: <https://www.flickr.com/photos/argonne/8167845201/in/album-72157631963785470>, Argonne National Laboratory, United States Department of Energy)

←
Obr. 4: Zaměstnanci první jaderné elektrárny u reaktoru AM-1. Obninská jaderná elektrárna byla uvedena do provozu 26. června 1954 (foto: Valentin Kunov / TASS)

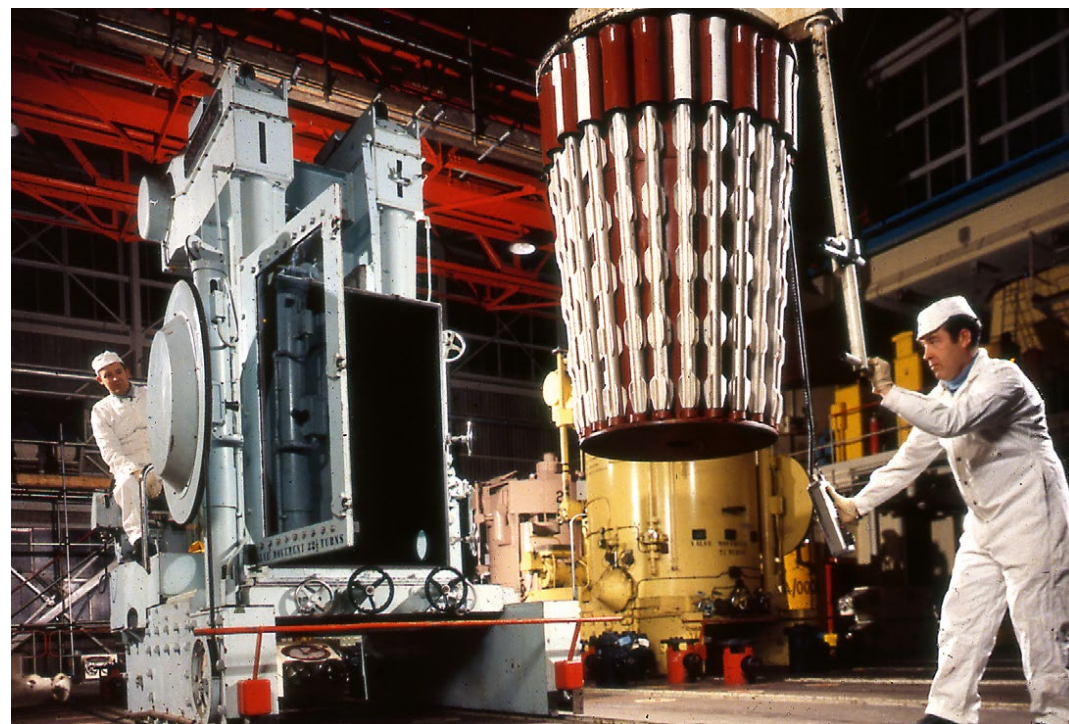
Od začátku nového tisíciletí začala probíhat jaderná renesance, dominantně však v Číně, Rusku, Indii, Jižní Koreji a rozvíjejících se státech, které potřebují dramaticky zvýšit produkci elektřiny. V Evropské unii a Spojených státech probíhala v té době stále stagnace či dokonce pokles. Teprve v současné době se začíná připravovat půda pro renesanci jaderné energetiky i v Evropské unii a USA. Ukazuje se, že bez jaderných zdrojů nelze realizovat přechod k nízkoemisní elektroenergetice v jiných než velmi specifických geografických podmínkách, které jsou například v Norsku nebo na Islandu. Francie, Švédsko, Švýcarsko i náš soused Slovensko jasně ukázaly, že lze na bázi kombinace jaderných a obnovitelných zdrojů realizovat nízkoemisní mix. Německo naopak ukazuje, že čistě s obnovitelnými zdroji se k němu nedospěje i extrémními financemi a úsilím. Zároveň se ukazuje, že nejen kvůli rozvoji využití umělé inteligence poroste spotřeba elektřiny i v rozvinutých státech.

Pokud se lidstvo rozhodne pro intenzivní využívání jaderné energie, musí řešit pět základních výzev. První je zajištění co nejdelšího udržení stávajících bloků v provozu. V současné době jsou nejstarší reaktory v polovině šestého desetiletí svého provozu. Předpokládá se, že

řada současných reaktorů II. generace by mohla být provozována i osmdesát let. Druhou výzvou je přechod od reaktorů II. generace k velkým reaktorům III. generace. V současné době je jich již okolo 10 % a jejich podíl roste. Třetí výzvou je intenzivní zapojení jaderných zdrojů do produkce tepla pro obyvatele a průmysl. V teplárenství by mohly pomoci malé modulární reaktory, které jsou čtvrtou výzvou. Mohly by pomoci nahradit uhelné kogenerační elektrárny a umožnit proniknutí jaderných zdrojů do decentralizované energetiky. Pátou výzvou je rozvoj reaktorů IV. generace, hlavně rychlých reaktorů, které umožní realizovat uzavření palivového cyklu, využití veškerých zásob uranu i thoria a co největšího snížení objemu jaderného odpadu.

Ve vzdálenější budoucnosti by se mohly začít využívat ještě pokročilejší jaderné technologie v podobě urychlovačem řízených transmutorů, které ještě efektivněji sníží objem jaderného odpadu, a nakonec i termojaderná fúze.

Vždy bude potřeba zajistit efektivní kontrolu jaderných materiálů a nešíření jaderných zbraní v podobě popsané v předchozí části, což jsou aspekty klíčové pro celosvětové přijetí jaderné energie.



→ **Obr. 5:** Zavážení paliva do reaktoru Magnox v jaderné elektrárně Calder Hall (zdroj: https://nda.blog.gov.uk/wp-content/uploads/sites/165/2019/09/AJ6288c_CXTrans.jpg, UK government agencies)



K poznání fyziky nejenergetičtějších procesů ve vesmíru

Předpokládejme, že se lidstvo dokáže vypořádat s hrozbou ničivého jaderného konfliktu a díky jaderným zdrojům si zajistí dostatek elektřiny pro svůj rozvoj. Pak by s využitím jaderných zdrojů mohlo dojít k expanzi lidstva do nejbližšího vesmíru, jak je popsáno v cyklu článků Jaderné zdroje energie pro vesmír. Pokud však budeme chtít cestovat dál než k nejbližším hvězdám, bude nutné využít extrémní zdroje energie. Takové zdroje pozorujeme ve vzdáleném vesmíru a jejich popis bude potřebovat zatím neznámou exotickou fyziku. Ta bude muset být kvantová a na jejích základech pracoval i Oppenheimer.

Jak bylo zmíněno, Oppenheimerova poslední práce byla v oblasti fundamentálních studií struktury hmoty zaměřena na konečná stadia velmi hmotných hvězd. Studoval stabilitu těchto objektů. Ta je dominantně dána kvantovými vlastnostmi degenerovaného fermionového plynu. Ten pomáhá odolávat gravitačnímu tlaku působícímu na hmotu hvězdy v době, kdy spálí palivo využitelné pro termojaderné reakce. Při zvyšování hmotnosti hvěz-

dy roste i tlak gravitace a kinetická energie částic (fermionů), které degenerovaný fermionový plyn tvoří. V okamžiku, kdy se tyto částice stanou relativistickými či dokonce ultrarelativistickými, vlastnosti plynu se dramaticky změní. Přestane mít schopnost odolávat gravitačnímu tlaku a hvězda zkolabuje.

Již dříve indický fyzik Subrahmanyan Chandrasekhar ukázal, že v případě bílého trpaslíka odolává toto konečné stádium velmi hmotné hvězdy díky degenerovanému elektronovému plynu. Určil i limitní hmotnost, jejíž překročení vede k přechodu do jeho relativistického stavu a kolapsu bílého trpaslíka. V tomto případě zabrání úplnému kolapsu to, že splnutím s elektrony se protony přemění na neutrony a vznikne neutronová hvězda. Ta odolává gravitačnímu tlaku díky degenerovanému fermionovému plynu složeného z neutronů.

Právě Oppenheimer s Richardem Tolmanem a Georgem Michaellem Volkoffem ukázal, že při dostatečné hmotnosti se i neutronový plyn stane relativistickým a neutronová hvězda zkolabuje. Limitní hmotnost pro neutronovou hvězdu se tak označuje jako TOV limita (Tolman-Oppenheimer-Volkoff). V tomto pří-

↑ **Obr. 6:** Instalace reaktorové nádoby v jaderné elektrárně Shippingport dne 10. října 1956 (zdroj: <http://hdl.loc.gov/loc.pnp/hhh.pa1658/photos.135430p>, United States Department of Energy, Naval Reactors Program)



← **Obr. 7:** Jaderná elektrárna Three Mile Island v roce 1979 (zdroj: <http://ma.mbe.doe.gov/me70/history/photos.htm>, United States Department of Energy)

↓ **Obr. 8:** V současnosti dokončovaná jaderná elektrárna Mochovce umožňuje Slovensku realizovat nízkoemisní exportní elektroenergetiku (zdroj: ŠKODA JS a.s.)



↑ **Obr. 9:** V současné době probíhá přechod k reaktorům III. generace. Těmi jsou korejské APR-1400, jejichž menší varianta bude i v Dukovanech. Na snímku jaderná elektrárna Barakah se čtyřmi reaktory APR-1400 (zdroj Emirates Nuclear Energy Company)

↙ **Obr. 10:** Limitní hmotnost neutronové hvězdy a její kolaps do černé díry popsal Robert Oppenheimer s kolegy. Na obrázku je umělecká ilustrace izolované neutronové hvězdy (autor: Casey Reed, Penn State University)

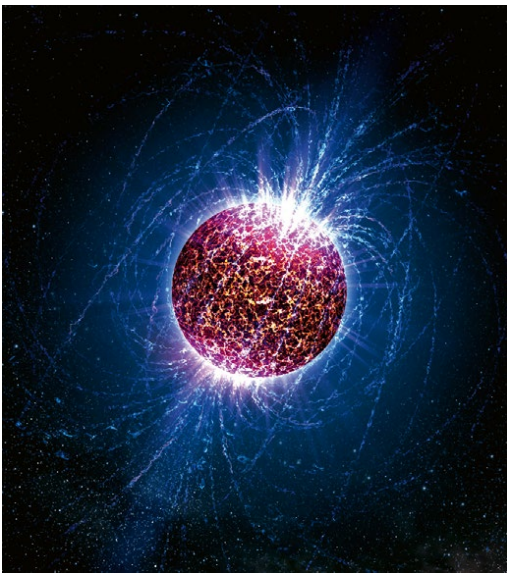
padě však neznáme formu hmoty, která by při dané hmotnosti hvězdy odolala vzniklému tlaku gravitace a hvězda se zhroutí pod Schwarzschildův poloměr do černé díry.

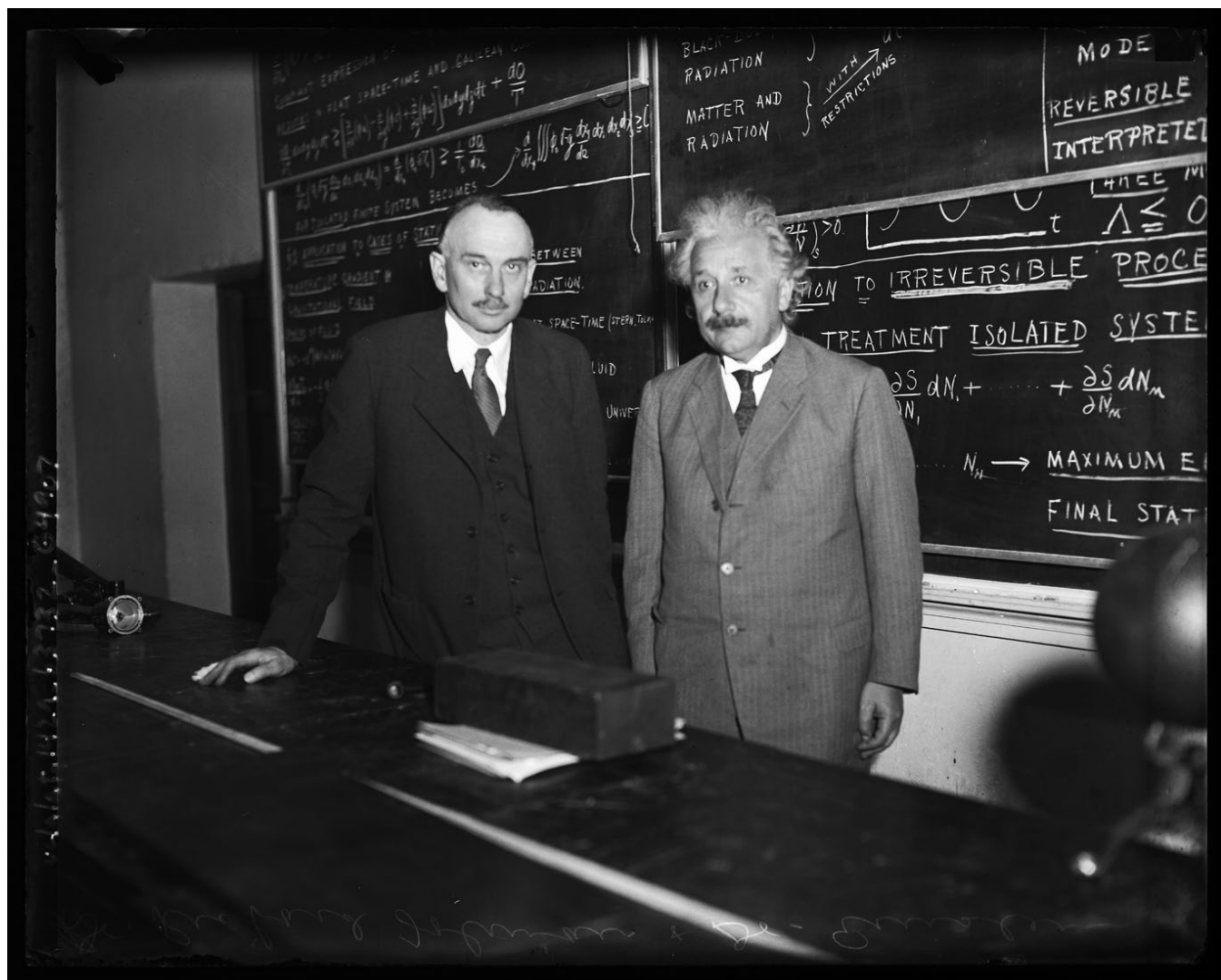
Zde patří k nejzajímavějším příběhům historie fyziky střet Oppenheimera a Wheelera. V článku Oppenheimera a Volkoffa v časopise Physical Review z února 1939 byla popsána limita pro hmotnost neutronové hvězdy, při jejímž překročení se zhroutí bez ohledu na složení ja-

derné hmoty a její stavovou rovnici. Ve stejném časopise Physical Review dne 1. září 1939 pak Oppenheimer publikoval společně s kolegou Hartlandem Sweetem Snyderem článek popisující nezadržitelný kolaps příliš hmotné hvězdy pod Schwarzschildův poloměr do černé díry. Šlo o první předpověď vzniku černé díry. Využilo se symetrické, homogenní řešení obecné teorie relativity nerotujícího velmi hmotného objektu.

V článku ukázali, že pozorovatel, který se pohybuje s povrchem kolabující hvězdy, spadne pod Schwarzschildův poloměr poměrně rychle. Pro pozorovatele, který jej pozoruje vně kolabující hvězdy, se kolaps hvězdy a pád jeho kolegy při přibližování k Schwarzschildovu poloměru stále více zpomaluje a překoná jej až v nekonečném čase. Pokud přijímá jím vysílané signály, pozoruje stále větší gravitační rudý posuv, až v nekonečnu signál úplně zmizí.

Jak už bylo zmíněno, ve stejném čísle Physical Review vyšel i společný článek Bohra a Wheelera o vlastnostech štěpení uranu. Zároveň 1. září 1939 začala druhá světová válka. Právě tento článek a historická událost dramaticky ovlivnily osudy všech zmíněných vědců. Robert Oppenheimer se stal vědeckým ředitelem pro-





↑
Obr. 11: S Robertem Oppenheimerem na popisu kolapsu neutronové hvězdy pracoval Richard C. Tolman. Využívali přitom Einsteinovu obecnou teorii relativity. Na snímku jsou Richard C. Tolman a Albert Einstein v Kalifornském technologickém institutu v roce 1932 (zdroj: <https://digital.library.ucla.edu/catalog/ark:/21198/z0002ppvq>, Los Angeles Times, UCLA Charles E. Young Research Library)

jektu Manhattan a byl klíčovou osobou vývoje americké jaderné zbraně. Na vývoji jaderné zbraně se podílel i John Wheeler, který pracoval na separaci plutonia v Hanfordu. Na projektu Manhattan pracoval i George Volkoff, stejně jako celá řada Oppenheimerových studentů.

Oppenheimer se už nikdy k výzkumu konečných stádií hvězd a černých děr nevrátil. Naopak Wheeler se stal v oboru černých děr a obecné teorie relativity veličinou. Stal se také tvůrcem pojmenování objektu černá díra. Navázal i na práci Oppenheimera o kolapsu velmi hmotných hvězd do černé díry. Nevěřil však, že je její výsledek správný. Podle něj byl izotropní a homogenní model příliš velkým zjednodušením a existující fluktuace by měly kolapsu pod Schwarzschildův poloměr zabránit. Podrobnější a komplexnější výpočty pomocí programů

E. Tellera, které vypracovali při cestě za termojadernou bombou, potvrdily nevyhnutelnou realizaci kolapsu a vzniku černé díry. A Wheeler svůj názor změnil a stal se jedním z nejvýznamnějších teoretiků v oblasti studia černých děr.

Teoretická studia Oppenheimera a jeho kolegů tak otevřela cestu k poznání extrémních stavů hmoty, které mohou v budoucnu přispět k popisu exotické fyziky za Standardním modelem hmoty a interakcí a extrémních přeměn energie ve vesmíru.

Dokáže naše civilizace využít jadernou energii a přežít jadernou hrozbu?

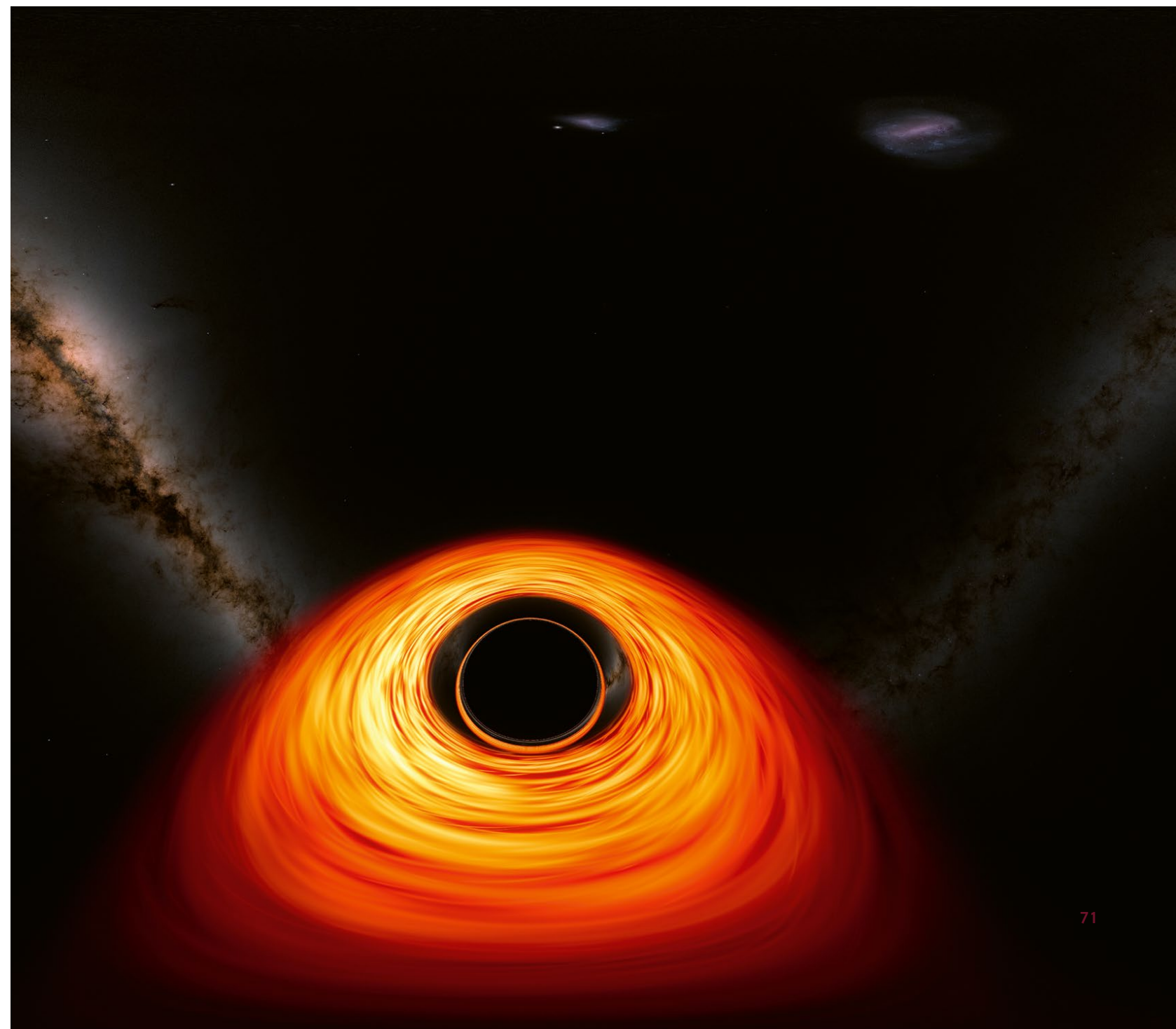
Představa Roberta Oppenheimera a některých dalších fyziků, kteří se podíleli na rozvoji jaderné fyziky i jaderných zbraní, o plné mezinárodní kontrole jaderných zbraní a mírového vyu-

žívání jaderných technologií se nerealizovala. Na druhé straně se však podařilo vytvořit poměrně efektivní systém kontroly šíření jaderných technologií a materiálů, a hlavně jaderných zbraní. Nesplnila se ani Oppenheimera naděje, že hrozba jaderné zbraně zabránila vzniku další války. Na druhé straně rovnováha v jaderných zbraních mezi západním a východním blokem v době studené války zajistila mír v Evropě, který trval déle než půl století a přežil i rozpad Sovětského svazu. K jeho konci došlo až nyní při invazi Ruska na Ukrajinu. Gene-

raci mých rodičů tak sice v dětství zasáhla válka vyvolaná nacistickým Německem, ale celý další život prožila v míru.

Zvláště v padesátých a šedesátých letech byly obavy z použití jaderných zbraní přítomné, ale i díky smlouvám popsaným v předchozí části postupně klesaly. Bohužel po otevřené invazi Ruska na Ukrajinu a výhrůžkách použití jaderných zbraní nejen proti Ukrajině i u oficiálních ruských představitelů, jako je Dmitrij Medveděv, rostou reálně nejen obavy, ale i skutečné riziko jaderné války. Zatím však v oblas-

↓
Obr. 12: Robert Oppenheimer byl u prvního popisu rozdílného pohledu na pád hmoty do černé díry u různých pozorovatelů, jméno dal černé díře John Archibald Wheeler. Na snímku počítačová vizualizace černé díry (autor: Jeremy Schnittman and Brian Powell, NASA's Goddard Space Flight Center)





↑
Obr. 13: V současné době se jaderné elektrárny ocitly ve válečných oblastech, Záporožská jaderná elektrárna je poblíž frontové linie. Na snímku Rafael Grossi, Generální ředitel MAAE s týmem bezpečnostních expertů při návštěvě Záporožské jaderné elektrárny dne 7. února 2024 (zdroj: MAAE)

ti jaderných zbraní dodržují všechny státy určité červené linie a dohodnutá pravidla, a to i ta, která nebyla ratifikována.

Je extrémně nepravděpodobné, že by nějaká teroristická organizace či zločinný soukromník dokázali vyvinout a zkonstruovat jadernou zbraň. Možností by byla krádež hotové jaderné zbraně nebo využití špinavé jaderné bomby, tedy ukradení radioaktivního materiálu a kontaminace dané lokality. Ovšem v současnosti existující jaderné bomby by měly být dostatečně jištěny proti nepovolanému odpálení. Podrobně o tom píše Vladimír Hnatowicz v kni-

ze „Jaderné zbraně – Princip a historie“, která vyšla v nakladatelství Naše vojsko. Cíle, kterých by bylo možné dosáhnout špinavou bombou, jsou pak daleko snadněji dosažitelné jinými chemickými a technologickými prostředky.

Jinou věcí je dostatečně technologicky a ekonomicky vyspělý stát. Jak ukazují příklady Indie, Pákistánu, Severní Koreje, JAR a Izraele, v případě odhodlání je takový stát schopen jadernou bombu získat, a to bez ohledu na to, zda má jadernou energetiku, či ne. Na druhé straně je však současná kontrola natolik spolehlivá, že si nelze představit, že by se mu snaha o vývoj jaderné zbraně podařila utajit.

Zároveň je otázka, jak by mu byla jaderná bomba užitečná. Jak jsem zmínil, jde čistě o nástroj odstrašení. Jeho platnost končí v případě použití, kdy vede k totální katastrofě. Zároveň nepomůže v případě, že daný stát nemá dostatečný potenciál klasických zbraní pro potřeby konvenční obrany. To je jasně vidět u Izraele, válek mezi Indií a Pákistánem, a ostatně i u současné invaze Ruska na Ukrajinu. Ve většině případů tak vlastnictví jaderných zbraní nepřináší výhodu.

Jak bylo zmíněno v předchozí části článku, lze jen těžko najít případ, kdy by v reálné válce nebyla taktická jaderná zbraň nahraditelná klasickou. Jedinou vlastností je právě to slovo „jaderná“ a strach, který v lidech vyvolává. Ale spoň podle mého názoru však jejím použitím tato vlastnost reálně zmizí. Problém však je, že v případě, kdy se taktické jaderné zbraně začnou používat, extrémně stoupne riziko použití strategických jaderných zbraní a všeobecné jaderné katastrofy.

Proto je strašně důležité, aby se červená linie nepoužití taktické jaderné zbraně udržela. Doufám, že v případě využití jaderné zbraně některým státem by se pro všechny ostatní stal vyvrhelem, proti kterému by se zásadně a efektivně postavily. Chovám naději, že by tak postupovaly Čína i Indie, kdyby se Putin rozhodl použít taktickou jadernou zbraň proti Ukrajině. Právě obava z takového postoje Číny a Indie doufám zabrání tomu, aby Putin tuto červenou linii překročil, i když Dmitrij Medveděv a řada dalších hlasů z Ruska po jejím překročení volají.

Naším předchůdcům se sice i přes snahy, které realizoval třeba i Oppenheimer, nepodařilo vyřešit problémy, které přináší jaderné zbraně, ale ve stínu jaderných zbraní dokázali přežít a přežila i západní demokracie. Nás a naše děti čeká nyní extrémně náročné a nebezpečné ob-

dobí a lze jen doufat, že se nám podaří se s ním vypořádat alespoň tak, jak se to podařilo jim.

Pokud budeme úspěšní, můžeme navázat na jejich fundamentální výzkum, poznat podstatu těch nejenergetičtějších procesů ve vesmíru a v budoucnu se vydat i do vzdáleného vesmíru.

Reference

Kai Bird, Martin J. Sherwin: Oppenheimer – Americký Prométheus

Vladimír Wagner: Spolupráce s Ruskem po 24. únoru 2022, Vesmír, 101 (2022) 461

Vladimír Hnatowicz: Jaderné zbraně – princip a historie, Naše vojsko, EAN: 9788020620248

Vladimír Wagner: Jaderné zdroje energie pro vesmír – 7. díl: Exotické možnosti mezihvězdného cestování, Jaderná energie, 2023, číslo 3, strana 64



RNDr. Vladimír Wagner, CSc.
wagner@ujf.cas.cz

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

České jaderné elektrárny splňují mezinárodní normy ochrany životního prostředí

Zdroj: ČEZ, a. s., foto Jan Luxík

Jaderné elektrárny Temelín a Dukovany letos opětovně potvrdily shodu s přísnými mezinárodními standardy v oblasti ochrany životního prostředí. Podle aktuálního auditu certifikační společnosti Det Norske Veritas obě elektrárny bez výhrad plní požadavky normy pro systém environmentálního řízení, a to v případě Dukovan nepřetržitě již od roku 2001 a u Temelína od roku 2004.

Odborníci se během kontrol zaměřili nejen na administrativní procesy, ale především na každodenní praxi v provozu technologických celků, jako jsou strojovny, dieselgenerátory či centrální hospodářství olejů a nafty. Sledovány byly rovněž investice do modernizace, nakládání s neaktivními odpady a efektivní nakládání

s vodou. Vedoucí týmu auditorů Zdeněk Grabmüller ocenil dlouhodobé nastavení a rozvoj celého systému, což kvituje i ředitel divize jaderná energetika ČEZ Bohdan Zronek, podle něhož jsou mezinárodní audity klíčovou zpětovou vazbou pro bezpečný a ekologický provoz.

Díky bezemisní výrobě v obou elektrárnách se do ovzduší ročně nevypustí přibližně 20 milionů tun oxidu uhličitého, přičemž jen v Temelíně směřují do ekologických opatření a modernizace desítky milionů korun ročně. Obdržенý certifikát má platnost tři roky a jeho udržení bude i v budoucnu podmíněno každoročními kontrolami, které prověří připravenost obou zdrojů na budoucí environmentální výzvy.



Plovoucí reaktor od Samsungu získal předběžné schválení

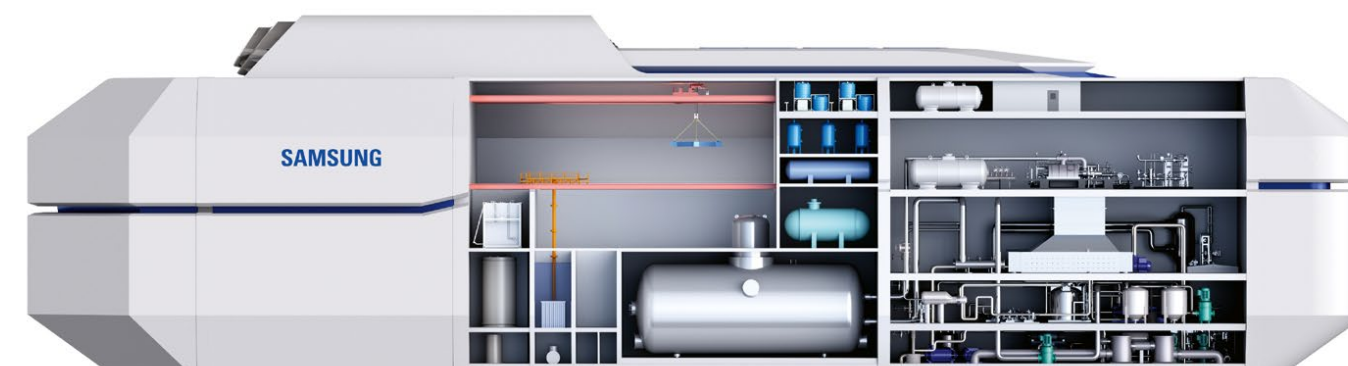
Zdroj: ABS, KAERI

Společnost Samsung Heavy Industries získala od Amerického úřadu pro lodní dopravu (American Bureau of Shipping / ABS) předběžné schválení (Approval in Principle / AIP) pro návrh plovoucí jaderné elektrárny (Floating Small Modular Reactor / FSMR).

AIP se uděluje v rané fázi koncepčního návrhu a slouží k prokázání proveditelnosti projektu partnerům a regulačním orgánům. Potvrzuje, že navržený koncept včetně nové technologie je

v souladu s relevantními pravidly a doporučeními ABS i s platnými průmyslovými normami a standardy, a to za splnění stanovených podmínek.

Koncept počítá se dvěma malými modulárními reaktory SMART100, které vyvinul Korejský institut pro výzkum atomové energie (Korea Atomic Energy Research Institute / KAERI), Samsung Heavy Industries uvádí, že platformu lze přizpůsobit i pro jiné typy SMR.



40 let od prvního zavezení paliva do druhého reaktoru Jaderné elektrárny Dukovany

Zdroj: ČEZ, a. s.

V závěru letošního roku uplynuly přesně čtyři desetiletí od jednoho z klíčových milníků české jaderné energetiky. Dne 21. prosince 1985 zahájili energetici v Jaderné elektrárně Dukovany historicky první zavážení jaderného paliva do reaktoru druhého výrobního bloku. Tato operace, která trvala celkem osm dní, představovala

zásadní etapu ve spouštění první jaderné elektrárny na českém území a potvrdila připravenost personálu i technologií na rozšíření provozu.

Proces uvádění druhého bloku do provozu těžil především z kontinuity a čerstvých zkušeností realizačních týmů, které získaly při spou-



štění prvního bloku o rok dříve. Podle současného ředitele elektrárny Romana Havlína je každé první spouštění jaderného bloku unikátním procesem, u kterého je kladen absolutní důraz na bezpečnost a opakované ověřování všech systémů. Právě díky efektivnímu využití předchozího know-how proběhla celá tato fáze velmi plynule. Po zavezení paliva následovalo 20. března 1986 zahájení zkušebního provozu a 23. ledna 1987 dosáhl druhý blok první řízené štěpné reakce.

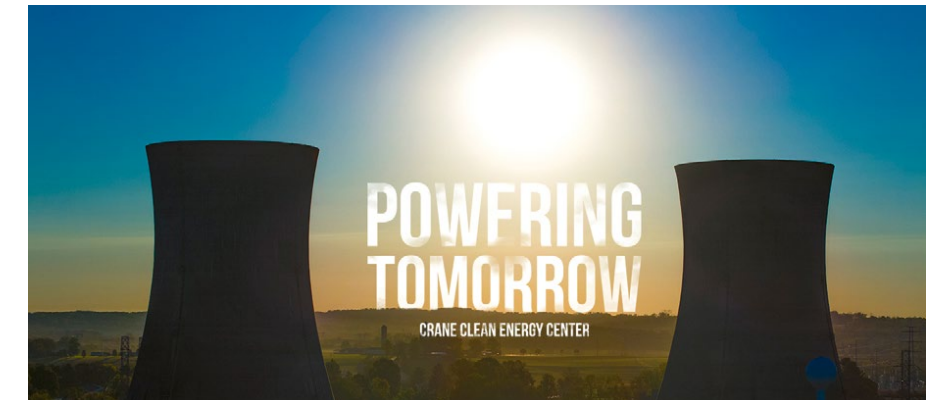
Přínos druhého dukovanského bloku za uplynulých 40 let je z pohledu energetické bilance a soběstačnosti České republiky zásadní. Od svého uvedení do provozu vyrobil celkem 132 280 026 MWh čisté bezemisní elektřiny. To je objem, který by dokázal pokrýt spotřebu celé České republiky po dobu více než dvou let. V současnosti celá elektrárna Dukovany dodává do sítě přibližně 15 TWh energie ročně, čímž dlouhodobě plní roli klíčového stabilního zdroje českého energetického mixu.

Three Mile Island dostane půjčku na restart prvního bloku

Zdroj: Constellation

Jaderná elektrárna Three Mile Island, která se zapsala do historie havárií druhého bloku v roce 1979 intenzivně pracuje na restartu prvního bloku. Ten byl 20. září 2019 odstaven po 45 letech provozu z důvodu ztrátovosti. Majitel elektrárny, americká energetická společnost Constellation ale v září loňského roku oznámila dohodu se společností Microsoft a obnovení provozu. Dvacetiletá smlouva o nákupu elektřiny představuje pro Microsoft strategický krok k naplnění spotřeby svých datových center a firemním závazkům udržitelného rozvoje (SDGs).

Letos v prosinci společnost Constellation prosinci oznámila, že práce na zprovoznění odstaveného jaderného bloku Three Mile Island 1 předčily očekávání. Už v rámci přípravné fáze dokončila celou řadu operací dříve, než plánovala. Projekt elektrárny, která ponese nový název Crane Clean Energy Center, se nyní



soustředí na přijímání zaměstnanců, inspekci zařízení, modernizaci budov a povolení a licencování restartu, který by měl podle předpokladů proběhnout v roce 2027. Usnadnit proces zprovoznění by nyní měla i půjčka ve výši jedné miliardy dolarů, kterou projektu poskytne americké Ministerstvo pro energetiku.

