

# OBSAH

Obsah .....	1
Úvod .....	3
Hanus: Jaderná energetika – šance pro budoucnost a větší bezpečnost národů .....	4
Železný: Co to je jaderná energetika .....	7
Dlouhý: Energetická potřeba v ČR .....	21
Hanus: Černobyl po dvaceti letech (postřehy z konference Černo- bylského fóra) .....	24
Kočvara: Kdo se bojí radiace? .....	26
Klener: Biologické účinky a zdravotní následky působení malých dávek ionizujícího záření .....	33
Thinová, Čechák, Klusoň, Trojek: Monitorování životního prostředí v okolí jaderné elektrárny Temelín pomocí bioindi- kátorů .....	39
Trtílek, Zapletal: Bezpečnost Jaderné elektrárny Temelín se týká také odpadů .....	45
Bláha: Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí .....	49
Bláha: Mezinárodní agentura pro atomovou energii .....	51
Bláha: Popularizace jaderné energetiky v České republice .....	53
Burket: CYG 1997–2004 .....	57
Dubská: Women in Nuclear Global .....	61
Zeman: Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze .....	62
Matějka, Kolros: Záměna vysoce obohaceného paliva na školním reak- toru VR-1 Vrabec .....	64
Kříž: Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s. – portrét společnosti .....	71
Říha: Perspektivy společnosti ŠKODA JS a.s. ....	73
Přeček: Výzkumné zařízení JET .....	76
Bláha: Informace o jaderné energetice .....	80
Bláha: Jaderně energetická zařízení v České republice .....	82
Aktuality České nukleární společnosti .....	86

***zvláštní  
číslo***

***VIII.***

***ročník***

**2006**

# ŠKOLSKÁ FYZIKA

Ročník VIII.

2006

Praktický časopis pro výuku fyziky a práci s talentovanými žáky na základních a středních školách

**Vydává:** Katedra obecné fyziky Pedagogické fakulty Západočeské univerzity v Plzni ve spolupráci s ústředním výborem FO, katedrou obecné fyziky Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity v Brně, katedrou didaktiky fyziky Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze, katedrou fyziky Pedagogické fakulty Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích, dalšími fakultami připravujícími učitele fyziky a Českou nukleární společností pod patronací Jednoty českých matematiků a fyziků

**Šéfredaktor:** Václav Havel (email: havelv@kof.zcu.cz)

**Výkonný redaktor:** Miroslav Randa (email: randam@kof.zcu.cz)

**Sekretářka redakce:** Jitka Štychová (email: stychova@kof.zcu.cz)

**Redakční rada:** Václav Havel, Josef Kepka, Soňa Křítková, Aleš Lacina, Miroslav Randa, Karel Rauner, Milan Rojko, Ivo Volf.

**Rozšířená redakční rada:** Jan Bečvář, Václav Bláha, Josef Blažek, Zdeněk Bochníček, Ivo Čáp, Jiří Erhart, Gerhard Höfer, Jan Hrdý, František Kamenčák, Zdeněk Kluíber, Daniel Kluvanec, Václav Kohout, Jana Krsková, Václav Křivohlavý, Vítězslav Kubín, Vladislav Kvapil, Dušan Novotný, Jan Novotný, Jitka Prokšová, Jan Slavík, Václav Soukup, František Špulák, Rudolf Šup, Josef Trněček, Václav Turek, Josef Veselý.

**Adresa redakce:** Školská fyzika, KOF PeF ZČU, Klatovská 51, 313 00 Plzeň,  
☎ 377 636 303 nebo 377 636 441; fax 377 636 333

**Vychází:** čtyřikrát ročně ve verzi pro ZŠ, verzi pro SŠ a společné verzi pro ZŠ+SŠ

**Předplatné:**

verze ZŠ	250 Kč ročně (4 čísla po 62,50 Kč)
verze SŠ	250 Kč ročně (4 čísla po 62,50 Kč)
verze ZŠ+SŠ	300 Kč ročně (4 čísla po 75,00 Kč)
studentská sleva verze ZŠ+SŠ	150 Kč ročně (4 čísla po 37,50 Kč)

**Objednávky přijímá:** Jitka Štychová, katedra obecné fyziky FPE ZČU, Klatovská 51, 313 00 Plzeň

**URL (Internet):** <http://sf.pef.zcu.cz/>

ISSN 1211-1511

*Toto číslo bylo odesláno k tisku 26. 4. 2006.*

## Úvod

Zvláštní číslo Školské fyziky vzniklo ve spolupráci Školské fyziky a České nukleární společnosti. Česká nukleární společnost spolupracuje s redakcí Školské fyziky a podporuje ji od prvních ročníků. Díky uvedené spolupráci jste v uplynulých letech dostali několik mimořádných a zvláštních (monotematických) čísel časopisu.

Zvláštní číslo Školské fyziky, které právě držíte v rukou, vychází u příležitosti dvacátého výročí černobylské katastrofy. Jeho cílem je přispět k informování vás, čtenářů Školské fyziky, o příčinách havárie. Zároveň přináší spoustu aktuálních informací o jaderné energetice i organizacích, které podporují rozvoj jaderné energetiky. Věříme, že každý z vás nalezne v tomto čísle údaje a informace, které jej zaujmou a obohatí. Zájemci o podrobnější informace o Černobylu a Temelínu je mohou získat na následujících webových adresách České nukleární společnosti <http://www.csvts.cz/cns/news06/cernob06.pdf> a <http://www.csvts.cz/cns/news06/temcase.pdf>. Zájemci o tištěné verze těchto publikací si o ně mohou napsat členu redakční rady a viceprezidentovi České nukleární společnosti Ing. Václavu Bláhovi na mail [blahavac@quick.cz](mailto:blahavac@quick.cz). Pro čtenáře Školské fyziky je rezervováno 100 výtisků.

Na rozdíl od ostatních čísel časopisu toto zvláštní číslo neprošlo recenzním řízením a dostáváte jej zdarma nad rámec předplatného.



**Jaderná elektrárna Temelín**

## Jaderná energetika – šance pro budoucnost a větší bezpečnost národů

*Václav Hanus\* , prezident České nukleární společnosti*

Myslím, že každý občan zaregistroval „plynovou rozmišku“ mezi Ruskem a Ukrajinou, s důsledky i pro EU. O čem to vypovídá? Vypovídá to o energetické závislosti a o vydíratelnosti závislých. Evropa se stává manipulovatelnou pro ty, kdo mají v ruce zdroje energetických surovin. Ať je to plyn nebo ropa, a to se všemi ekonomickými a politickými důsledky. Jak z toho ven? Řešení nabízí jaderná energetika. Vždyť **pro provoz jaderné elektrárny je zapotřebí jen několik desítek tun** (několik metrů krychlových) **jaderného paliva za rok** a to je množství, které se dá dopředu nakoupit a skladovat. Pro zajištění paliva máme vždy dost času a lze si vybrat na trhu na roky provozu dopředu palivo nejvhodnější jak technicky, tak i ekonomicky. Rychlé „uzavření kohoutků“ s uranem nepřipadá tedy v úvahu a je vždy dost času na jednání ekonomická i na případná jednání politiků.

Výše jsem se zmínil o jedné zásadní **výhodě jaderných elektráren**, která nebyla dosud tolik v zorném poli veřejnosti. Existuje však řada dalších výhod, pro které stojí za to jít cestou využívání jaderné energie. Stručně zmíním několik z nich:

- Jaderné elektrárny *neprodukují skleníkové plyny* při výrobě elektřiny. Při jejich stavbě se vzhledem k jejich výkonu vyprodukuje méně skleníkových plynů, než při stavbě větrných elektráren srovnatelného výkonu.
- Jaderné elektrárny *mohou být provozovány i za meteorologicky katastrofických podmínek*. Vzpomeňme například povodně před pár lety, kdy do sítě Česka dodávaly elektřinu pouze jaderné elektrárny Temelín a Dukovany. Bez těchto zdrojů by dopad povodní byl daleko horší. Mnozí pamětníci si vzpomenou na katastrofální pokles teplot na Silvestra 1978, kdy byla z velkých zdrojů v provozu v celém Československu pouze jaderná elektrárna Jaslovské Bohunice.
- *Cena energie vyrobené z jádra není v podstatě závislá na ceně paliva*. Její podstatnou složku tvoří investiční náklad. Jinými slovy, jaderné elektrárny produkují energii za velmi stabilní cenu, předvídatelnou na roky dopředu. Již dnes je cena energie z jádra nižší, než cena z dalších zdrojů. V České republice je nejlacinější elektřina z jaderné elektrárny Dukovany.
- *Zásoby jaderného paliva jsou téměř nevyčerpatelné*. Odpůrci tvrdí, že zásoby štěpného uranu 235 jsou omezeny na cca 50 let. To je sice pravda, ale je to relativní. Například při ceně ropy 90 dolarů za barel je již ekonomicky výhodné získávat uran z mořské vody. V tomto případě je zásoba uranu 235 téměř nevyčerpatelná. To nemluvím o reaktorech používajících jiný štěpný materiál než je uran 235. Lze použít uran 238, thorium, uran 233, plutonium, případně další transurany vznikající v dnešních reaktorech. Reaktory na tato paliva nejsou fikcí, jsou to odzkoušené technologie. Na rozdíl od, dle mého názoru, dosud snové technologie – jaderné syntézy. Tato technologie má před sebou ještě dlouhou cestu technického vývoje. Bude použitelná jen pro velké energetické soustavy v základním zatížení a bude zřejmě značně drahá. Neříkám, že nemá smysl se touto technologií zabývat. Efektivnost vývoje jaderné syntézy se určitě projeví i v nalezení a boč-

---

\* vaclav.hanus@cez.cz



ním využití nových materiálů a technologií, jako jsou například supravodivost, nové tepelně izolační materiály ap.

- Existují jaderné technologie, které pracují za velmi vysokých teplot s vysokou účinností. Vývoj je na úrovni provozních zkoušek. Velmi pokročilý stav je v Japonsku, Jihoafrické republice a i v Číně. Tyto *technologie dovolují stavět i malé spojovatelné moduly*, které jsou vhodné pro malé energetické soustavy. Ideální pro rozvojový svět. Právo „třetího světa“ na dostatek energie mu jistě nelze upřít. Je jisté, že tato většina lidstva si o tuto energii v brzké budoucnosti řekne. Je vůbec představitelné zajistit energii těmto lidem klasickými, nebo alternativními zdroji? Ekologické a ekonomické dopady by byly zřejmě katastrofální.
- Velmi se nabízí *spojení jaderné energetiky a takzvané vodíkové ekonomie*. Představme si malý stát bez vlastních energetických zdrojů. Musí být nutně energeticky, ekonomicky a i politicky závislý na jiném státě? Nemusí. Řešením by mohlo být použití jaderných zdrojů přiměřené velikosti jako primárního zdroje energie, který by se užil pro výrobu vodíku z vody. Vodík by sloužil jako „konzerva“ energie, která by nahradila plyn, ropu a uhlí v energetice, elektroenergetice, dopravě, snad i v domácnostech. Technologicky je tato představa dnešku daleko blíže, než jaderná fúze. Geopolitické souvislosti této vize jsou nasnadě. Jeví se mi, že zde by mohla jaderná energetika hrát výraznou demokratizační a stabilizační roli.

**Odpůrci jaderné energetiky používají několik argumentů proti jádru.** Snad nejvíce používaný argument je, že *není dořešen problém jaderného odpadu*, zejména vyhořelého jaderného paliva. Odborník ví, že tento problém fakticky neexistuje a je jakýmsi klišé. Pro kompletní vysvětlení zde není dost místa. Jen v krátkosti zmíním to, že veškeré problematické dlouhožijící radionuklidy, které vznikají v jaderných reaktorech, lze v jistých technologiích, které jsou částečně v provozu a částečně ve vývoji, převést na radionuklidy stabilní, či krátkodobé, a to i tím, že se použijí jako palivo do reaktorů vyšších generací. Dnes se běžně používá například plutonium v palivu zvaném MOX v klasických tlakovodních reaktorech. Stavbu reaktoru tzv. IV. generace, schopného spalovat „vyhořelý odpad“ současných reaktorů, nedávno oznámil francouzský prezident Chirac. V reaktorech této vyšší generace se po přepracování využije dnešní vyhořelé palivo a stabilizuje se na formu, kterou bude nutno skladovat ne 10 000 let, ale jen cca 100 roků a ještě se při tom získá energie. Jsou i další varianty řešení problému.

Dalším argumentem odpůrců je *hrozba jaderného výbuchu, či zamoření životního prostředí radiací*. Jaderný průmysl se poučil ze svých omylů a chyb. Hybnou silou pokroku bývá bohužel malér. Čtenář jistě vzpomene Černobylské katastrofy, či havárie jedné jaderné elektrárny v USA. Po těchto událostech vznikly organizace, jako je INPO a WANO, které zajišťují dohled nad bezpečností jaderných elektráren ve světě a zprostředkovávají provozovatelům jaderných elektráren výměnu informací a poznatků týkající se zvyšování bezpečnosti. Státní jaderný dozor se posílil, provozovatelé jaderných elektráren se otevřeli inspekčním OSN (MAAE). Jaderný průmysl implementoval do své činnosti prvek neustálého ověřování své úrovně bezpečnosti a učení se. Neexistuje na světě jiný průmysl, který by i přes to, že si jeho společnosti na trhu konkurují, takto úzce a otevřeně spolupracoval v otázkách bezpečnosti. Je to ojedinělé, nevídané a mohlo by to být vzorem pro jiná odvětví lidské činnosti, která jsou nyní daleko nebezpečnější, než je jaderná energetika. Troufám si tvrdit, že jaderný průmysl je nyní nejbezpečnější lidskou aktivitou.

Jaký je nyní vývoj ve světě?

**Afrika** – *Jihoafriická republika* vyvíjí reaktory pro budoucí potřebu kontinentu. Lze očekávat rozmach v následujících desetiletích.

**Amerika** – v *USA* se dlouho nestavěla žádná jaderná elektrárna, hlavně z důvodů ekonomických. Po kalifornských problémech s rozpadem elektrické sítě a z důvodu rostoucí závislosti *USA* na dovozu energetických surovin se vláda *USA* rozhodla pro podporu stavby nových jaderných elektráren. Nedávno byla v *USA* udělena licence pro nový reaktor generace III+ od firmy Westinghouse (AP 1000) pro jeho použití v *USA*. Během příštích 2 let lze očekávat zahájení stavby více nových jaderných elektráren v *USA*. *Kanada* oživuje své „staré“ reaktory typu Candu.

**Asie** – *Japonsko* je na jaderných elektrárnách životně závislé a postupně staví nové reaktory, jeden za cca 2 roky. Největší rozvoj zaznamenáváme v *Číně*. Hladová ekonomika si žádá ambiciózní rozvoj energetiky. Nové lokality, Tianwan a Ling-ao jsou ve spouštění a ve stavbě. Plánuje se do roku 2020 postavit cca 30 nových bloků, to je asi 15 Temelínů. *Indie* a *Pákistán* staví také nové jaderné bloky.

Nejsložitější situace je v **Evropě**. Jednoznačně proti je *Rakousko*. *Německo* je oficiálně také proti, ale neoficiálně váhá. *Belgie* ohlásila opuštění jaderné energetiky. Další rozvoj a náhradu starých bloků ohlásila *Francie* a *Velká Británie*. *Itálie* a *Polsko* se rozmýšlejí. Jaký je postoj „ekologicky vzorových“ zemí, jako jsou *Švýcarsko*, *Finsko* či *Švédsko*? Švýčari řekli v referendu ANO pokračování využívání jaderných elektráren. Finové zahájili stavbu nového bloku EPR o výkonu 1 600 MW s termínem dokončení 2009. Je to blok francouzsko-německého konsorcia AREVA. Švédové mají problém se svým dřívějším vládním rozhodnutím o postupném odstavování jaderných elektráren. Veřejnost je proti tomuto odstavování. *Slovensko* uvažuje o dostavbě jaderné elektrárny Mochovce, *Maďaři* rozhodli o prodloužení provozu jaderné elektrárny Pakš. *Bulhaři* budou stavět novou jadernou elektrárnu v Belene, *Ukrajina* a *Rusko* pokračují v dostavbě dříve zamýšlených bloků ve stávajících lokalitách.

A jak je to v **České Republice**? Státní energetická koncepce uvažuje o stavbě 2 menších bloků okolo let 2015–2020. Dle mého názoru to budou 2 bloky, ale standardní velikosti okolo 1 000 MW.

Na závěr se chci omluvit za některá silná zjednodušení, která jsem musel pro názornost a krátkost článku použít. Článkem jsem chtěl vnímavé čtenáře inspirovat k hledání správných odpovědí na některé otázky a dát některé věci do širších souvislostí.

## Co to je jaderná energetika

Václav Železný\*, *Fakulta strojní, ČVUT v Praze*

### ÚVOD

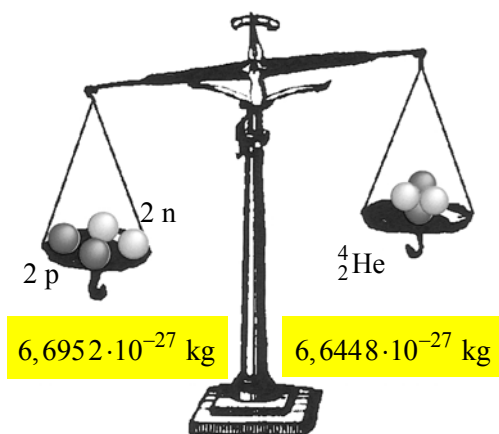
Výhody jaderné energetiky i důvody, proč stavět či alespoň definitivně nezavrhnout jaderné elektrárny, byly již popsány v úvodním článku prezidentem České nukleární společnosti panem Václavem Hanusem. V následující části tohoto časopisu se nyní budeme věnovat popisu jaderné energetiky jako takové, historii jaderné energetiky, v současnosti nejvíce rozšířeným tlakovodním reaktorům a srovnání tlakovodního reaktoru s černobylským reaktorem RBMK, a to zejména z hlediska provozu a bezpečnosti. Nyní se tedy věnujme jaderné energetice samotné a stručnému vysvětlení základních principů získávání energie z atomového jádra.

### TAJEMSTVÍ ENERGIE Z JÁDRA HMOTY

Lidé si často kladou otázku, jak je možné, že i v poměrně malém množství hmoty je ukryto značné množství energie, a co způsobuje, že se tato energie při jaderných reakcích uvolňuje. Po dlouhou dobu se předpokládalo, že hmota a energie existují nezávisle na sobě a není mezi nimi žádný vztah. Tuto vazbu objevil teprve Albert Einstein. V tehdy publikovaných statích se také téměř mimochodem objevil dnes již přímo kultovní vzorec  $E = m \cdot c^2$ . Rychlost světla  $c$  je sama o sobě velmi velká a  $c^2$  tudíž představuje obrovské číslo  $\approx 9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ . To vysvětluje, proč je v hmotě skryto tak velké množství energie. Slavný Einsteinův vztah však dává odpověď pouze na první část otázky. Ta druhá část zůstává, neboť na první pohled by součet hmotností elementárních částic účastnících se reakce měl zůstat stejný a nemělo by docházet k jakémukoliv hmotnostnímu deficitu. Ve skutečnosti je tomu ovšem jinak.

Tuto skutečnost objevil v roce 1919 britský chemik F. W. Aston. Pomocí nově sestaveného hmotnostního spektrografu zjistil, že součet hmotností všech nukleonů (protonů a neutronů), což jsou stavební kameny atomového jádra, je o něco větší nežli hmotnost výsledného atomového jádra, viz obrázek 1. A protože hmota se nemůže nikam ztratit, hledejme vysvětlení v Einsteinově rovnici. Chybějící hmota se přeměnila na energii, která se uvolnila při hypotetické jaderné reakci. V jádru tuto energii nyní nahrazují vazebné jaderné síly, které drží jádro pohromadě. Tím je zaručeno, že množství energie připadající na jeden nukleon zůstává konstantní. Pokud bychom chtěli jádro zpětně rozbít na jednotlivé nukleony, museli bychom onu energii opět dodat. To však stále ještě nedává vysvětlení na druhou část otázky.

To se objeví teprve, když si zmíněný hmotnostní deficit vztáhneme na jednotlivé nukleony. Zjistíme, že tento deficit je odlišný prvek od prvku. Nejprve poměrně rychle narůstá od nejlehčích jader směrem k železu, kde dosahuje maxima, a poté nastává pozvolný pokles směrem k nejtěžším jádrům. Termojaderná syntéza probíhající na hvězdách tedy může teoreticky dosáhnout ma-



**Obrázek 1 Rozdíl hmotností atomového jádra a nukleonů tvořících jádro**

\* Vaclav.Zelezny@fs.cvut.cz

ximálně železa, neboť pro syntézu těžších prvků už je třeba naopak energii dodávat. Ke vzniku těžších prvků tak podle astronomů docházelo zejména při kosmických katastrofách, jako jsou například výbuchy supernov, kdy byla k dispozici dostatečná energie, aby se jádra lehčích prvků mohla sloučit na těžší. Zde tedy máme vysvětlení, jak lze při jaderných reakcích získávat energii. Je to možné buďto slučováním lehkých jader, kdy napodobíme to, co příroda provozuje v nitru hvězd, anebo štěpením velmi těžkých jader, kdy naopak využijeme energii, která musela být dodána při tvorbě těchto jader v raných dobách vesmíru. V obou případech je celková hmotnost jader vstupujících do reakce vyšší nežli hmotnost jader z ní vystupujících a tento hmotnostní deficit se přeměňuje na energii. Aby však bylo možné tuto energii využít musí být možné tyto reakce udržovat a řídit a to se prozatím daří pouze v případě štěpení těžkých jader.

### ŠTĚPNÁ ŘETĚZOVÁ REAKCE

---

Italský vědec Enrico Fermi bombardoval jádra jednotlivých prvků neutrony s cílem vyvolat radioaktivní přeměny. V případě nejtěžšího tehdy známého prvku – uranu – však nastal do té doby neznámý jev – štěpení. Tento jev později vysvětlili Hahn, Meitnerová a Strassmann, Otto Hahn za objev štěpení uranu dostal Nobelovu cenu. Bylo potvrzeno, že jádro uranu je schopno se při ostřelování neutrony rozštěpit na dvě lehčí jádra. Ukázalo se, že tato reakce je výrazně exotermická, tedy uvolňuje se při ní značné množství energie. Navíc bylo zjištěno, že se při rozštěpení jádra uranu uvolňují dva až tři neutrony, které jsou schopné štěpit další jádra uranu. Tato zjištění představovala první krok na cestě k využití energie z atomového jádra. Ke skutečnému využití jaderné energie bylo však ještě daleko, neboť je velký rozdíl vyvolat v malém množství uranu štěpení pomocí neutronů z cizího zdroje a vytvořením takového zařízení, ve kterém je možné udržovat a řídit samovolnou štěpnou řetězovou reakci.

Základním problémem je to, že uran se v přírodě vyskytuje jako směs dvou izotopů  $^{235}\text{U}$  a  $^{238}\text{U}$ . Označení izotopy se používá pro atomy jednoho a téhož prvku, jejichž jádra se však liší počtem neutronů, a tedy i atomovou hmotností. Snadno štěpitelný je však pouze  $^{235}\text{U}$ , který lze štěpit neutrony celého energetického spektra od rychlých až po pomalé. Tohoto izotopu je ovšem pouhých 0,7 % z celkového množství. Zbýlých 99,3 % tvoří  $^{238}\text{U}$ , který je štěpitelný pouze omezeně, a to neutrony s velkou energií. Pro uskutečnění štěpné řetězové reakce je tedy nutné zvýšit pravděpodobnost, že letící neutron zasáhne jádro  $^{235}\text{U}$  a způsobí štěpení. To je v zásadě možné realizovat dvěma způsoby. Tím prvním je umělé zvýšení koncentrace  $^{235}\text{U}$ , které se v jaderné technice označuje termínem obohacení paliva. Zde je však třeba podotknout, že obohacování uranu je technologicky složitý a finančně náročný proces. Palivo s vyšším stupněm obohacení se proto zatím využívá zejména v menších výzkumných reaktorech a pak také v takzvaných rychlých množivých reaktorech, které se ovšem v jaderné energetice dosud sériově nerozšířily. Druhou možností je zpomalení neutronů. Bylo zjištěno, že pomaleji letící neutrony mají o dva až tři řády větší pravděpodobnost, že zasáhnou jádro  $^{235}\text{U}$  a způsobí jeho rozštěpení. Celková pravděpodobnost štěpení pak v takovém případě výrazně převyšuje pravděpodobnost jiných jaderných reakcí a je možné dosáhnout toho, aby se štěpná řetězová reakce udržela. U většiny současných energetických reaktorů se oba způsoby do určité míry kombinují tak, že zpomalujeme neutrony a zároveň mírně obohacujeme palivo.

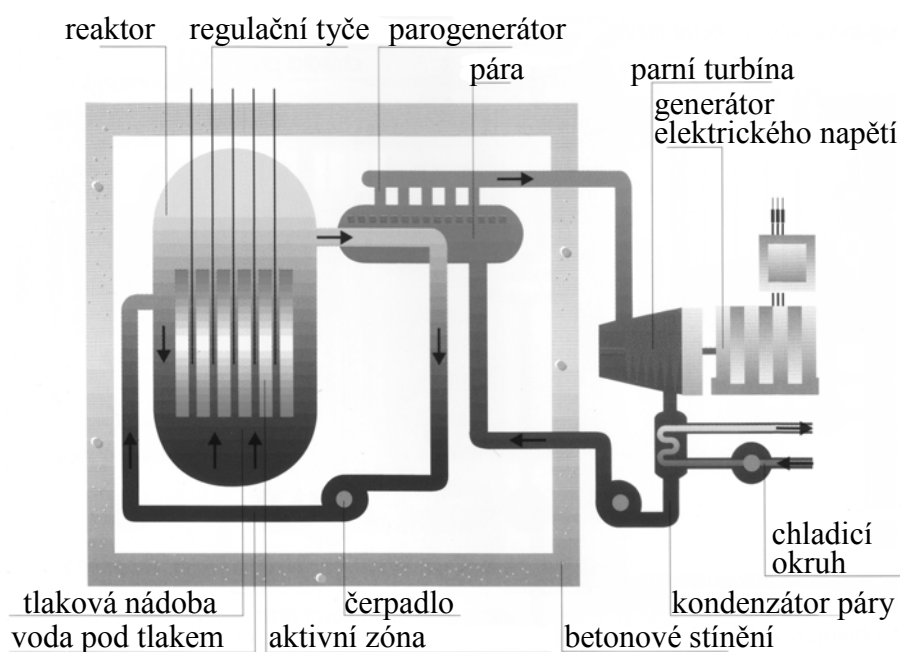
Podmínkou pro zpomalení neutronů ovšem je, že palivo musí být v reaktoru obklopeno látkou, která je schopná neutrony co nejlépe zpomalovat a přitom je co nejméně pohlcuje, abychom je neztráceli parazitní absorpcí, nýbrž aby se pohlcovaly v palivu, kde způsobí další štěpení. Takovou látku nazýváme moderátor. Požadavkům na dobrou schopnost zpomalování a nízkou absorpci vyhovují pouze některé látky, přičemž v jaderné energetice se nejvíce rozšířily obyčejná (lehká) voda, těžká voda a grafit. Reaktory podle typu používaného mode-

rátoru pak označujeme za lehkovodní, těžkovodní a grafitové. Lehká voda však zcela nesplňuje podmínku nízké absorpce neutronů, a tak reaktory, které ji využívají jako moderátor, musí mít alespoň mírně (okolo 4 %) obohacené palivo, zatímco reaktory využívající jako moderátor těžkou vodu či grafit jsou z hlediska hospodaření s neutrony úspornější a jsou schopné pracovat i s neobohaceným palivem vyrobeným z přírodního uranu.

### JAK PRACUJE JADERNÁ ELEKTRÁRNA

Na obrázku 2 je zjednodušené schéma jaderné elektrárny s reaktorem typu VVER (vodo-voděnnj eněrgetičeskij reaktor), které provozujeme i v našich jaderných elektrárnách. Reaktory VVER obecně patří do kategorie takzvaných tlakovodních reaktorů, které se do současnosti ve světě nejvíce rozšířily.

Základem fungování jaderné elektrárny je štěpná řetězová reakce probíhající v palivu. Zpomalený neutron zasáhne jádro  $^{235}\text{U}$ , to se stává nestabilním a ve velmi krátkém časovém intervalu se rozpadá na dvě menší jádra, což je doprovázeno uvolněním energie a emisí dvou až tří rychlých štěpných neutronů doprovázenou rovněž emisí záření gama.



**Obrázek 2 Zjednodušené schéma jaderné elektrárny**

Emitované štěpné neutrony o velké energii vylétají z paliva a dostávají se do moderátoru. Zde narážejí do jader moderátoru, kterým při srážkách předávají část energie, čímž postupně snižují svou rychlost. Účinnost tohoto brždění je dána atomovou hmotností jader moderátoru a obecně platí, že čím lehčí je jádro, tím účinnější je brždění. Ideálním moderátorem by tedy z tohoto pohledu byl vodík, neboť zde by mohl neutron ztratit veškerou svou energii při jediné srážce prostřednictvím pružného rázu, jaký známe třeba při srážce kulečnickových koulí. Vodík však nelze použít, neboť moderátor nemůže být plynného skupenství, a kapalný vodík existuje pouze při teplotách velmi hluboko pod bodem mrazu, při kterých by ovšem žádné energetické zařízení nemohlo pracovat. Z tohoto důvodu používáme jeho kapalnou sloučeninu s kyslíkem – vodu. U tohoto typu reaktoru má voda navíc i funkci chladiwa, které zajišťuje odvod tepla z aktivní zóny a reaktoru. Ruský název vodo-vodní tedy nemá nic společného s vodovodem, ale znamená vodou moderovaný – vodou chlazený.

Po několika desítkách srážek ztratí neutron veškerou přebytkovou kinetickou energii. Takový neutron pak označujeme jako pomalý nebo také tepelný, neboť jeho energie je

v rovnováze s tepelným pohybem molekul prostředí. V prostředí reaktoru se takový neutron nadále pohybuje prostřednictvím difúze. Posléze vniká zpět do paliva, kde dochází ke štěpení jádra  $^{235}\text{U}$ , a tím se celý cyklus uzavírá.

Energie uvolněná při štěpení se z velké části předává nově vzniklým jádrům – takzvaným fragmentům, další části energie odnášejí emitované neutrony a záření gama. Zbývající energie připadá na neutrina. V případě fragmentů i neutronů má tato energie formu kinetické energie. Avšak jaderné palivo je pevná látka, ve které se fragmenty, jenž se při štěpení velkou rychlostí rozlétnou od sebe, téměř nemají možnost pohybovat, a tak svou energii prakticky okamžitě předávají okolnímu materiálu, čímž dochází k ohřevu paliva. Neutrony předávají svou energii z velké části v moderátoru, který, jak už bylo řečeno, je u lehkovodních reaktorů zároveň i chladivem a odebírá i teplo uvolňované v palivových tyčích.

Ohřáté chladivo posléze proudí ven z reaktoru do zařízení nazývaného parogenerátor, což není nic jiného než velký tepelný výměník, kde se teplo předává vodě sekundárního okruhu. Poté je chladivo, jehož teplota poklesne zhruba o  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , hnáno hlavními cirkulačními čerpadly zpět do reaktoru. Tento okruh označujeme jako primární. Pára vzniklá v něm na sekundární straně parogenerátoru se po separaci zbývajících vodních kapiček vede do parní turbíny, kde postupně expanduje a předává svou energii rotoru turbíny. Po průchodu turbínou se pára odvádí do kondenzátoru, kde přechází zpět do kapalného skupenství. Vzniklá voda se prostřednictvím napájecích čerpadel vrací zpět do parogenerátoru, přičemž tento okruh označujeme jako sekundární. Takovéto uspořádání elektrárny nazýváme jako dvouokruhové. Můžeme mít i jadernou elektrárnu s jednookruhovým uspořádáním. V takovém případě se ovšem musí použít odlišný typ reaktoru, a to takzvaný reaktor varný. Zde dochází k varu vody přímo v reaktoru a vzniklá pára se rovnou vede do turbíny. Toto uspořádání je sice poněkud snadnější z konstrukčního hlediska, a tudíž i méně nákladné, ale za provozu má určitou nevýhodu, neboť zde dochází k zanášení radioaktivity do turbíny a kondenzátoru. U dvouokruhového uspořádání s tlakovodními reaktory zůstává radioaktivita uzavřena pouze v primárním okruhu, což má z hlediska provozu a údržby zbylých částí zařízení své nezanedbatelné výhody. Mimo jiné i z tohoto důvodu se tyto reaktory doposud využívají nejvíce.

### PROVOZOVANÉ JADERNÉ ELEKTRÁRNY

---

Ze statistik uváděných mezinárodní agenturou pro atomovou energii lze zjistit, že z více než 440 reaktorů, které jsou v současné době v provozu po celém světě, je skoro 270 reaktorů tlakovodních. Druhým nejvíce rozšířeným typem jsou zmíněné varné reaktory, kterých je kolem 90. Všechny tyto reaktory, dohromady více než tři čtvrtiny z celkového počtu, patří mezi reaktory chlazené a moderované obyčejnou lehkou vodou. Z ostatních v současnosti provozovaných typů lze ještě zmínit kanadské reaktory CANDU, které jsou chlazené i moderované těžkou vodou, a kterých je v provozu přes 40. Dále pak jsou to britské grafitem moderované a plynem chlazené reaktory Magnox a jejich modernější verze reaktory AGR, kterých je dohromady 22. A posledním typem pak jsou neblaze proslulé ruské grafitem moderované a vodou chlazené reaktory RBMK (Černobyl), kterých do současnosti zbývá v provozu 16. U ostatních typů lze říci, že se neprosadily pro opakované průmyslové použití a nemá význam je zde uvádět. Sem patří zejména prototypové rychlé reaktory a některé další.

## Historie jaderné energetiky ve světě

### ZAČALO TO V CHICAGU

---

Desítky let bádání a práci mnoha vynikajících vědců završil v roce 1942 Enrico Fermi, když poprvé v historii úspěšně spustil řízenou štěpnou řetězovou reakci. Bylo to 2. prosince krátce po půl čtvrté odpoledne, když se v jím zkonstruovaném experimentálním reaktoru Chi-

cago Pile 1, umístěném v podzemí opuštěného sportovního stadionu chicagské university, podařilo takovouto reakci nejen nastartovat, ale také udržovat a řídit. Tento okamžik je označován za počátek jaderné éry lidské civilizace. Do povědomí lidstva tak začal vstupovat nový pojem „jaderná energie“.

### RANÉ OBDOBÍ

---

Ačkoliv byla štěpná řetězová reakce poprvé spuštěna kontrolovaným způsobem, jaký známe z dnešních jaderných elektráren, další vývoj kolem jaderné energie rozhodně nezapřel fakt, že se tak stalo v rámci amerického atomového projektu Manhattan, jehož hlavním úkolem bylo získání jaderné zbraně. To se také v průběhu roku 1945 skutečně podařilo. Jaderná energie se tak nejprve představila jako obrovská ničivá síla při explozích atomových bomb nad japonskými městy Hirošima a Nagasaki. Obě jaderné exploze však byly pro lidstvo významným poučením. Jaderná energie dokázala, že se při nevhodném zacházení může z očekávaného nositele pokroku stát pohádkovým zlým džinem, což bylo důrazným varováním pro budoucnost.

I po druhé světové válce výzkum pokračoval nadále zejména pro vojenské využití. V tomto případě však už nelze říci, že by to bylo ke škodě budoucí jaderné energetice. Dnes nejrozšířenější typ jaderného reaktoru, tj. lehkovodní tlakovodní reaktor, byl totiž původně vyvíjen pro pohon vojenských námořních plavidel, a to zejména ponorek a letadlových lodí. Lze říci, že určité zásluhy na vzniku tohoto spolehlivého typu jaderného reaktoru tak má i tehdejší ministr námořnictva admirál Rickover, který zastával vizi moderního námořnictva, jehož páteří jednotky budou mít jaderný pohon propůjčující plavidlům prakticky neomezený operační dojezd a vysokou rychlost danou velkým výkonem hnacích agregátů. Za zmínku rovněž stojí, že již v této vizi byl kladen velký ohled na bezpečnost takovýchto zařízení, přičemž ohledy na bezpečnost bohužel nejsou pro vojáky vždy typické.

Jestliže za počátek jaderné éry je označován prosinec 1942, pak datem narození jaderné energetiky by byl 8. prosinec 1953, neboť právě v tento den přednesl tehdejší americký prezident Dwight Eisenhower svůj slavný projev nazývaný „Atomy pro mír“, ve kterém mimo jiné navrhoval i vznik pozdější Mezinárodní agentury pro atomovou energii. Krátce poté bylo rozhodnuto o výstavbě první „komerční“ jaderné elektrárny Shippingport ve státě Pennsylvania. Dodavatelem reaktoru se stala firma Westinghouse, která se opírala o zkušenosti svých vědců a inženýrů, kteří je nasbírali ve vojenských projektech. Elektrárna Shippingport byla k elektrizační síti připojena v roce 1957. Pomyslné prvenství však tento projekt nezískal, neboť již v roce 1954 byla v tehdejších SSSR připojena k síti jaderná elektrárna Obninsk s první generací reaktoru RBMK a v roce 1956 britská jaderná elektrárna Calder Hall s grafitovými reaktory Magnox. Evropa tedy v tomto případě USA o něco předběhla.

### ROZVOJ JADERNÉ ENERGETIKY

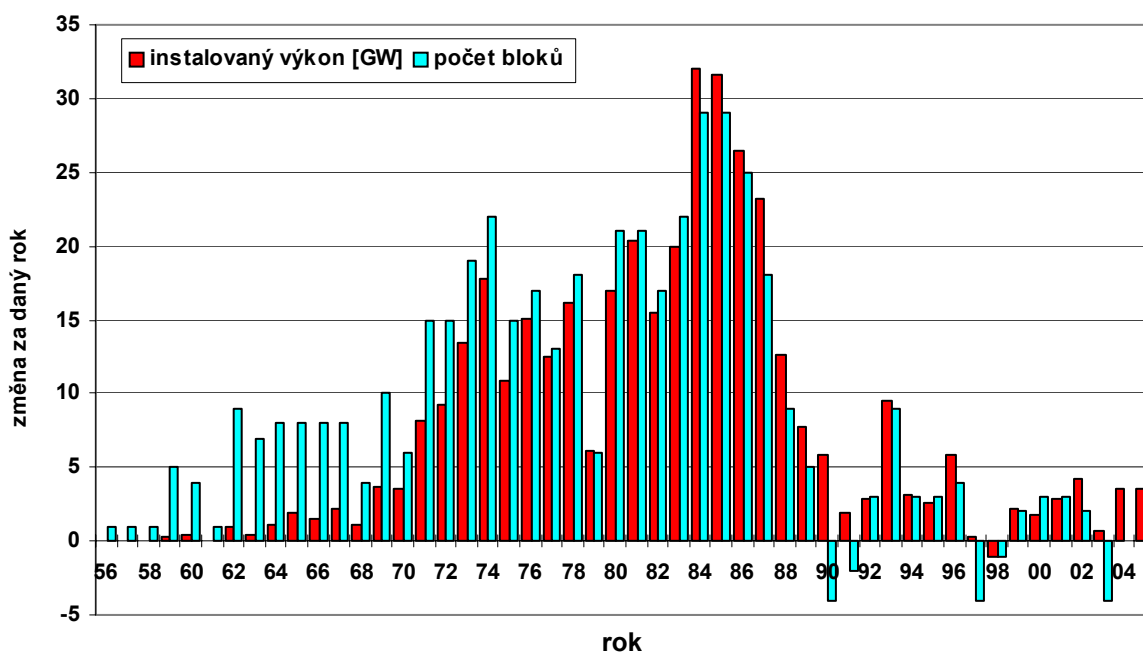
---

Rozvoj jaderné energetiky v prvních letech byl spíše ve znamení experimentování a hledání vhodných typů reaktorů, o čemž svědčí nízký celkový výkon elektráren uváděných do provozu v průběhu šedesátých let. Jaderná energetika však v této době získávala výrazně na popularitě. Bylo to dáno poměrně zřetelnou orientací zájmu veřejnosti na životní prostředí, díky čemuž upadala obliba elektráren spalujících uhlí a další fosilní paliva. V důsledku toho vzrůstal počet rozestavěných bloků, které pak byly dokončovány a uváděny do provozu v sedmdesátých letech. Na grafu 1 je v tomto období patrný výrazný přírůstek, a to jak počtu instalovaných bloků, tak i celkového instalovaného výkonu. To značí, že do provozu uváděné bloky byly již ryze komerční a měly větší výkony, nežli bloky z šedesátých let.

Druhé období, ve kterém se jaderná energetika znovu dostala do popředí zájmu politických činitelů i energetických společností, bylo v sedmdesátých letech, kdy byl zejména tehdejší

kapitalistický svět tvrdě zasažen ropnou krizí v roce 1973. V USA pak byla podobným šokem neočekávaně krutá zima 1976–1977, která způsobila problémy se zásobováním zemním plynem a silně ochromila celý americký středozápad. Tyto palivo-energetické šoky znovu posílily tendence zvýšit podíl jaderných elektráren na výrobě elektřiny, neboť jsou nezávislé na fosilních palivech a relativně i na klimatických extrémech. Odezva této změny orientace energetiky je patrná v dalším výrazném nárůstu počtu bloků i výkonu instalovaného v jaderných elektrárnách v průběhu osmdesátých let.

V té době vcelku příznivý obraz jaderné energetiky však byl narušen již 28. března 1979, kdy došlo k havárii na druhém bloku elektrárny Three Mile Island nedaleko Harrisburgu ve státě Pennsylvania. Ačkoliv při této havárii došlo jen k velmi malému úniku radiace a tudíž k zanedbatelným škodám na životní prostředí, utrpěla jaderná energetika poměrně značné škody na své pověsti a na důvěře občanů i politiků. Skutečnou katastrofu však pro jadernou energetiku znamenala havárie čtvrtého bloku ukrajinské jaderné elektrárny Černobyl v dubnu 1986. Na rozdíl od havárie na TMI 2, zde došlo prakticky k úplné destrukci jak reaktoru, tak i velké části reaktorového bloku a k masivnímu úniku radioaktivních látek, kterými bylo na různé úrovni zasaženo rozsáhlé území. Protijaderná hysterie, která se po havárii v Černobylu rozpoutala, měla pro jadernou energetiku jako obor katastrofální následky. S odstupem bezmála dvaceti let se však na základě výsledků rozsáhlých výzkumů prováděných WHO a UNSCEAR ukazuje, že například psychóza rozpoutaná v období bezprostředně po havárii měla pro lidi daleko horší následky než samotná havárie. Nezměnitelným faktem už bohužel zůstane, že tato havárie znamenala pro jadernou energetiku na více než deset let prakticky zmrtnění dalšího rozvoje.



**Obrázek 3 Změny počtu provozovaných jaderných bloků a celkového instalovaného výkonu v jednotlivých letech**

Vývoj v posledních několika letech se vyznačuje tím, že počet provozovaných reaktorových bloků kolísá na přibližně konstantní úrovni. Instalovaný výkon však prakticky neustále vykazuje přírůstky. Je to dáno tím, že i když je v současné době uváděno do provozu poměrně málo nových bloků, pohybují se jejich výkony v průměru okolo tisíce megawattů, zatímco z provozu jsou vyřazovány staré bloky z šedesátých let, jejichž výkon je mnohem menší. Úbytek instalovaného výkonu způsobený vyřazením několika starých bloků je tak kompenzo-



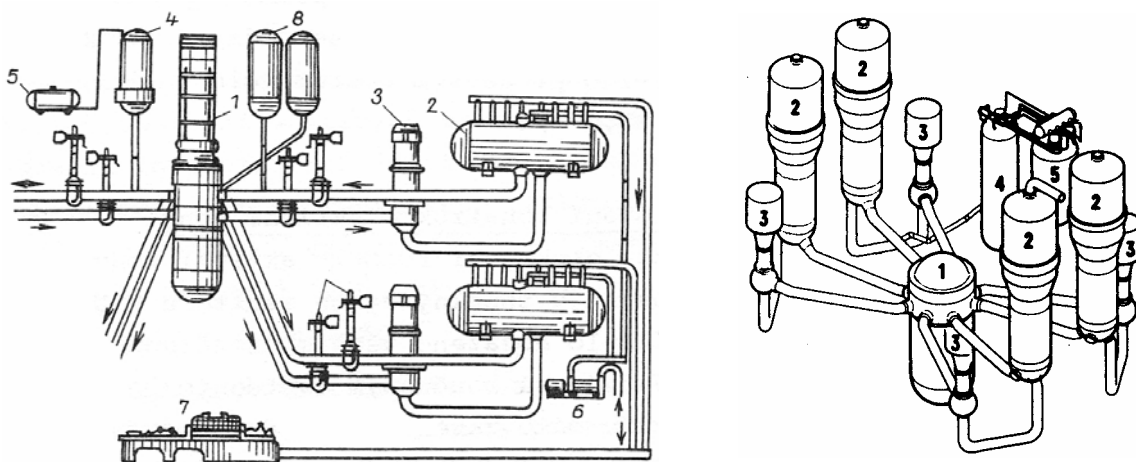
ván spuštěním jednoho či dvou moderních. Roční produkce elektřiny neustále stoupá, a to i v letech, kdy celkový instalovaný výkon stagnuje. Příčinou je skutečnost, že jaderné elektrárny prakticky soustavně zlepšují provozní výsledky.

V posledních letech se navíc také začíná stále silněji hovořit o další renesanci jaderné energetiky, coby jedné z variant řešení problémů s neustále stoupající poptávkou po elektrické energii na straně jedné, a obavami z nárůstu emisí skleníkových plynů a s tím souvisejícím rizikem globálního oteplování planety v důsledku skleníkového efektu na straně druhé. Jaderná energetika tak už není na pořadu dne pouze v Japonsku a Jižní Koreji, ale ambiciózní plán rozvoje začíná realizovat také Čína, nový jaderný blok se začíná stavět ve Finsku, uvažuje se o tom i ve Francii a konečně i v USA se intenzívně pracuje na vytipování vhodných typů reaktorů pro budoucí jaderné elektrárny a do roku 2020 se plánuje dokonce 50 GW výkonu v nových jaderných blocích.

## Elektrárny s tlakovodními reaktory

### ÚVOD

Již bylo uvedeno, že zdaleka nejrozšířenějším typem jaderného reaktoru je v současné době tlakovodní reaktor. Označení tlakovodní je odvozeno od skutečnosti, že chladivo (voda) je v primárním okruhu udržováno pod vysokým tlakem. Z fyziky víme, že teplota varu vody s rostoucím tlakem stoupá, a právě tohoto faktu bylo využito při konstrukci tlakovodního reaktoru. Chladivo je v reaktoru udržováno pod takovým tlakem proto, aby nedocházelo k jeho varu – odtud tedy název tlakovodní. Úkolem této kapitoly je poskytnout stručný popis jaderné elektrárny s tímto typem reaktoru.



1 – reaktor, 2 – parogenerátor, 3 – hlavní cirkulační čerpadlo, 4 – kompenzátor objemu, 5 - barbotážní nádrž, 6 – napájecí nádrž, 7 – parní turbína, 8 – hydroakumulátor

**Obrázek 4 Zjednodušené schéma jaderných elektráren typu VVER a PWR**

Současné tlakovodní reaktory dělíme do dvou základních skupin, a to podle oblasti jejich původu. První tlakovodní reaktory byly vyvinuty v USA a tento typ reaktoru se posléze s drobnými obměnami rozšířil do dalších zemí tehdejšího kapitalistického světa. V SSSR ovšem v té době probíhal paralelně vývoj vlastního tlakovodního reaktoru a v roce 1964 byl první takový reaktor připojen k síti v Novovoronežské jaderné elektrárně. Vývoj těchto reaktorů pak pokračoval dále a posléze se tyto reaktory rozšířily převážně do zemí tehdejšího socialistického tábora. I v současné době se tak používá rozdělení na tlakovodní reaktory typu VVER a tlakovodní reaktory západního typu označované jako PWR. Základní princip je u obou skupin shodný, ale

je zde řada konstrukčních odlišností. O těch hlavních se postupně zmíníme. Zjednodušená schémata obou typů jaderných elektráren jsou znázorněna na obrázku 4.

### ZÁKLADNÍ SOUČÁSTI TLAKOVODNÍHO JADERNÉHO REAKTORU

---

#### **Tlaková nádoba**

Stěžejní součástí tlakovodního jaderného reaktoru je tlaková nádoba. Je to silnostěnná ocelová válcová nádoba vyrobená ze svařených kovaných prstenců a zakončená eliptickým dnem. V horní části nádoby jsou takzvané hrdlové prstence obsahující hrdla pro připojení potrubí primárního okruhu. Na víku nádoby jsou nátrubky pro připojení pohonů regulačních tyčí. Vnitřní povrch tlakové nádoby je z důvodu lepší odolnosti vůči prostředí chráněn navařenou výstelkou z nerezové oceli. Tlaková nádoba je stěžejní součástí celé elektrárny, neboť ji nelze vyměnit ani nějakým zásadnějším způsobem opravovat, a tudíž se od životnosti tlakové nádoby odvíjí životnost celé jaderné elektrárny. Tlaková nádoba je nejen namáhána značným vnitřním přetlakem a teplotou, ale navíc je v oblasti aktivní zóny vystavena vysokému toku neutronů, které způsobují poruchy v krystalické mřížce a dochází tak k postupnému křehnutí materiálu. Kvalitě výroby musí proto být věnována maximální péče a stejně tak musí být stav nádoby pečlivě kontrolován po celou dobu provozu elektrárny. Tlakové nádoby reaktorů VVER i reaktorů západní koncepce nemají zásadní technické odlišnosti.

#### **Palivové články**

V současných jaderných reaktorech je nejvíce rozšířeno palivo na bázi oxidů uranu, konkrétně oxidu uraničitého  $\text{UO}_2$ . Oxid uranický je pevná keramickým materiálům podobná hmota s velmi vysokou teplotou tavení, která se pohybuje okolo  $2800\text{ }^\circ\text{C}$ . Palivo se v reaktoru nachází ve formě malých tablet. Jejich průměr činí u našich reaktorů  $7,55\text{ mm}$  a výška může být  $10\text{--}30\text{ mm}$  v závislosti na typu reaktoru a paliva. Vysoká tepelná odolnost je u jaderného paliva velmi důležitá, neboť pracovní teplota na povrchu tablet se pohybuje vysoko v řádu stovek stupňů a v centrální části tablet může běžně přesahovat i  $2000\text{ }^\circ\text{C}$ .

V reaktoru jsou palivové tablety uloženy ve speciální povlakové trubce, která je na koncích hermeticky uzavřena koncovkami a kterou označujeme jako palivovou tyč. Palivové tyče se většinou vyrábějí z vysoce kvalitních slitin na bázi zirkonia a tloušťka stěny se pohybuje okolo  $0,8\text{ mm}$ . V horní části tyče je umístěna distanční pružina, která tablety tlačí na sebe a tím pomáhá stabilizovat v pracovní poloze. Při výrobě se volné prostory uvnitř tyče plní heliem o tlaku do  $0,7\text{ MPa}$ . Helium se používá pro zlepšení přestupu tepla mezi povrchem palivové tablety a vnitřním povrchem palivové tyče. Během provozu reaktoru do tohoto prostoru postupně difundují plynné produkty štěpení a také ty produkty, které se nacházejí v plynném stavu díky vysokým teplotám.

Počet palivových tyčí se v našich reaktorech pohybuje mezi  $44$  až  $48$  tisíci. Kvůli snadnější manipulaci a lepší možnosti upevnění v reaktoru jsou tyče sestaveny do větších celků, které nazýváme palivové kazety či soubory. Počty palivových tyčí v kazetě se dost výrazně liší podle typu reaktoru,  $126$  u VVER 440 (Dukovany), resp.  $312$  u VVER 1000 (Temelín). Skelet palivové kazety fixuje palivové tyče ve správné pozici a snižuje riziko nežádoucích průhybů tyčí a vibrací v důsledku intenzivního proudění okolo nich. Podle typu reaktoru se liší i konstrukce kazet. Kazety VVER 440 mají vnější obálku, zatímco kazety VVER 1000 mají pouze skelet, takže chladivo se může promíchávat i mezi jednotlivými kazetami. Kazety výrazně zrychlují i manipulaci s palivem, neboť manipulovat a upevňovat každou tyč samostatně by nebylo technicky možné. Rozteč palivových tyčí v kazetě se u našich reaktorů pohybuje mezi  $12$  a  $13\text{ mm}$ . Palivové kazety jsou pak v reaktoru naskládány podle přesně definovaného kartogramu a tvoří aktivní zónu. Tak označujeme prostor, kde probíhá vlastní štěpná řetězová reakce.

U jaderného paliva najdeme mnohem výraznější odlišnosti mezi reaktory VVER a reaktory západní koncepce. Nejde přitom ani tak o odlišnosti v palivu samotném nebo v konstrukci palivových tyčí, ale o jejich uspořádání v reaktoru. Reaktory VVER mají palivové tyče v kazetě uspořádané tak, že osy tyčí tvoří vrcholy rovnostranného trojúhelníku. Toto uspořádání označujeme jako trojúhelníkovou palivovou mříž. Palivová mříž reaktorů západní koncepce je naproti tomu čtvercová. Kazety reaktorů VVER jsou pak šestihranné a u reaktorů západní koncepce čtyřhranné. To ovlivňuje i celkové uspořádání kazet v aktivní zóně reaktoru. Podrobnější rozbor vlivu těchto odlišností zde nebudeme provádět.

### Vnitřní části reaktoru

V jaderném reaktoru najdeme ještě další důležité vnitřní vestavby a komponenty, bez kterých by reaktor nemohl fungovat. Za zmínku stojí například: nosný válec aktivní zóny, ochranný plášť aktivní zóny, blok ochranných trub.

*Nosný válec aktivní zóny* je válcová skořepina s děrovaným eliptickým dnem, na němž jsou přivařeny podpory, do kterých se přesně usazují konce palivových kazet. Je zavěšen na vnitřním osazení hrdlového prstence nádoby a přitlačován víkem reaktoru. Dno nosného válce je opatřeno čepy, které zajistí nezbytný průtok chladiva i v případě, kdy by došlo k utržení nosného válce a dosednutí na dno nádoby. Děrované dno slouží k co nejpřesnějšímu rozdělení a usměrnění proudu chladiva pod aktivní zónou.

*Ochranný plášť aktivní zóny* slouží k vnějšímu ohraničení aktivní zóny, aby nedocházelo k nežádoucímu průtoku chladiva prostorem mezi palivovými kazetami a nosným válcem. Skládá se z ocelových prstenců vykováných tak, aby z vnějšku přesně dosedaly k nosnému válci a z vnitřku odpovídaly vnějšímu obrysu krajních palivových kazet v aktivní zóně, přičemž spodní díl je upevněn na dno nosného válce.

*Blok ochranných trub* je umístěn nad aktivní zónou. Snižuje vibrace konstrukčních částí uložených v horní části reaktoru a přitlačuje palivové kazety k podporám na spodku nosného válce. Další důležitá funkce bloku ochranných trub je vedení regulačních tyčí a vyvedení kabelů vnitroreaktorové instrumentace z prostoru reaktoru, přičemž zajišťuje jejich ochranu před účinky proudu chladiva.

### Systém řízení

Systém kontroly a řízení je další velmi důležitou součástí, na které závisí spolehlivý chod jaderného reaktoru a tedy i jeho bezpečnost. Systém sestává jednak z komponent vykonávajících vlastní regulaci, tzv. regulační tyče s jejich pohony, a poté z komponent, které zajišťují pro tuto regulaci nezbytné údaje, což je velké množství čidel, jako jsou měřiče rychlosti proudícího chladiva, termočlánky měřící teploty, detektory neutronů a záření gama, a další. Toto vybavení označujeme jako vnitroreaktorovou instrumentaci.

Vlastní regulaci zajišťují v aktivní zóně absorpční tyče, které jsou obvykle vyráběny z oceli s příměsí materiálů silně absorbujících neutrony, jako je například bór či kadmium. Zásuneme-li regulační tyče hlouběji do aktivní zóny, pohltí větší počet neutronů a ty se pak už neúčastní dalšího štěpení. Intenzita reakce se snižuje a s ní i výkon reaktoru. Při vysouvání regulačních tyčí z aktivní zóny naopak počet jimi pohlcených neutronů klesá, více neutronů se účastní štěpení a reaktor se rozbíhá. V případě, kdy je kupříkladu z bezpečnostních důvodů potřeba rychle odstavit reaktor, sjedou všechny regulační tyče do aktivní zóny a řetězová reakce se zastaví. Reaktory typu VVER mají navíc ještě takzvanou bórovou regulaci, která spočívá v dávkování bóru v podobě vodného roztoku kyseliny borité přímo do chladiva, což snižuje nároky na regulaci prostřednictvím tyčí. Tento systém navíc poskytuje i záložní možnost odstavení reaktoru v případě velmi nepravděpodobného selhání regulačních tyčí.

### HLAVNÍ SOUČÁSTI PRIMÁRNÍHO OKRUHU

---

*Kompenzátor objemu* je další důležitou součástí, kterou lze zpravidla vidět i na zjednodušeném schématu primárního okruhu. Z fyziky víme, že voda s narůstající teplotou zvětšuje svůj objem a tento nárůst je třeba nějakým způsobem kompenzovat. Například součástí běžného domácího teplovodního topení je proto expanzní nádrž umístěná na půdě či v nejvyšším patře domu, anebo modernější zařízení zvané expanzomat. Kompenzátor objemu na jaderné elektrárně si v podstatě lze představit jako větší a dokonalejší expanzní nádrž. Tato nádrž je ovšem uzavřená a doplněná o systémy, jejichž prostřednictvím je možné regulovat tlak v primárním okruhu. Kompenzátor objemu je připojený k jedné z tzv. horkých – tedy z reaktoru vystupujících – větví primárního potrubí a je do určité výšky naplněn vodou, nad jejíž hladinou je parní polštář. Je to jediné místo primárního okruhu, kde smí být volná hladina, jinak musí být celý okruh zaplněn vodou. Regulace tlaku v primárním okruhu se realizuje pomocí elektrických ohříváků a sprchových trysek umístěných v kompenzátoru objemu. Je-li třeba zvýšit tlak, zapnou se ohříváky, v důsledku čehož dojde v kompenzátoru k lokálnímu varu a narůstající množství páry v prostoru nad hladinou vede ke zvýšení tlaku. Je-li naopak potřeba dosáhnout snížení tlaku, zapnou se sprchové trysky, do kterých se přivádí voda ze studené větve primárního okruhu. Vstříkneme-li tuto o přibližně 30 stupňů chladnější vodu do prostoru parního polštáře nad hladinou, dojde k rychlé kondenzaci páry, a tím i k poklesu tlaku.

*Parogenerátory*, kde se vyrábí pára pohánějící turbínu, jsou dalším důležitým zařízením, o kterém jsme se již zmínili při popisu fungování jaderné elektrárny. Parogenerátor není ve své podstatě nic jiného nežli velký výměník tepla, kde uvnitř trubkových svazků proudí horké chladivo primárního okruhu a skrze ocelové stěny trubek ohřívá vodu sekundárního okruhu. Zde dochází k varu a produkovaná pára proudí do turbíny. Parogenerátory jsou další komponentou, u níž se výrazně liší primární okruhy typu VVER, které používají horizontální parogenerátory, a primární okruhy západního typu, které používají vertikální parogenerátory. Odlišná přitom pochopitelně není jen poloha parogenerátoru, ale i celá konstrukce parogenerátoru a zejména pak uspořádání trubkových svazků.

Teplosměnnou plochu horizontálního parogenerátoru tvoří horizontálně orientované nesy-metrické U-trubice, jejichž konce jsou zaústěny do stěn válcových kolektorů, které odspodu procházejí skrze parogenerátor a představují rozváděcí a sběrnou komoru primárního chladi-va. U vertikálního parogenerátoru pak teplosměnnou plochu tvoří vertikálně orientované sy-metrické U-trubice, které jsou na koncích zaústěny do tzv. trubkovnic. Trubkovnice jsou silné ocelové desky ve spodní části parogenerátoru a prostor pod nimi zde představuje rozváděcí komory. Součástí obou typů parogenerátorů jsou dále zařízení na rozvod sekundární napájecí vody a zařízení na separaci kapiček vody, strhávaných z hladiny vystupující párou.

Obě koncepce parogenerátorů mají své výhody i nevýhody, jež si zde stručně uvedeme. Vý-hodou horizontálních parogenerátorů je větší objem vody na sekundární straně, což znamená menší citlivost zařízení na případné provozní výkyvy a větší bezpečnost v případě, že je z něja-kého důvodu nedostatečná dodávka napájecí vody, neboť větší objem vody déle odolává vysu-šení. V případě ztráty nucené cirkulace v primárním okruhu, například v důsledku výpadku hlavních cirkulačních čerpadel, jsou horizontální parogenerátory schopné odvádět větší množ-ství zbytkového tepla v režimu přirozené cirkulace nežli vertikální, což znamená přínos z hle-diska bezpečnosti. Zbytkovým teplem nazýváme výkon, který se uvolňuje i v odstaveném reak-toru v důsledku samovolných radioaktivních přeměn probíhajících v použitém palivu.

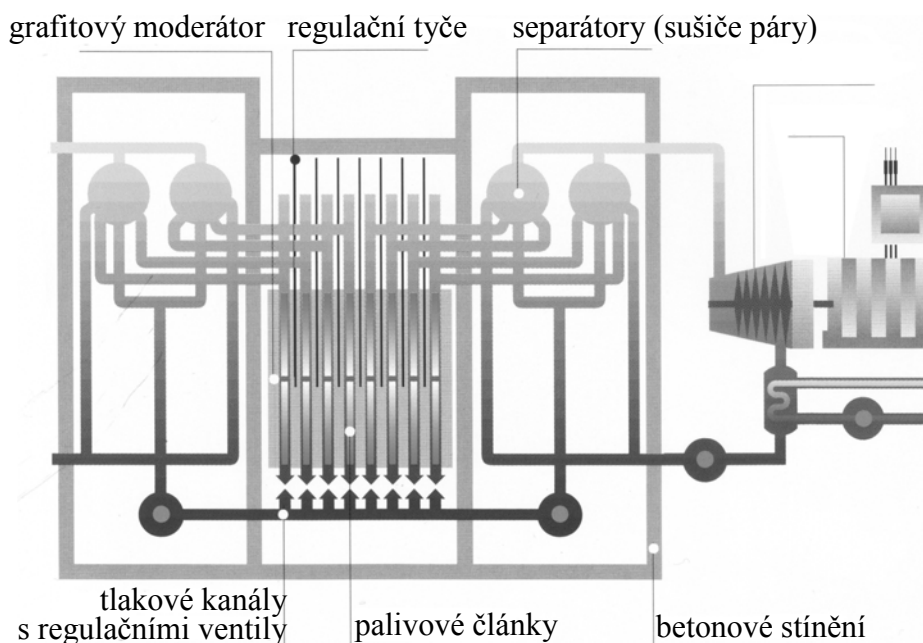
Další výhodou je velká plocha volné hladiny v parogenerátoru, která způsobuje, že pára vystupuje z hladiny relativně nízkou rychlostí, díky čemuž s sebou strhává jen malé množství vodních kapek a není potřeba věnovat takovou péči jejich separaci. Naopak nevýhodou hori-zontálních parogenerátorů je, že zabírají větší plochu, a protože celý primární okruh je z dů-vodu bezpečnosti a ochrany životního prostředí uzavřen v masivní hermetické ochranné obál-

ce – kontejnmentu, musí být tato obálka větší, což zvyšuje náklady na výstavbu. Další nevýhodou je o něco menší jednotkový výkon, což znamená, že na stejný výkon reaktoru je třeba více parogenerátorů. U vertikálních parogenerátorů jsou uvedené výhody a nevýhody prakticky obrácené.

*Ostatní součásti* primárního okruhu jaderné elektrárny si zde už nebudeme podrobněji popisovat. Patří sem například další komponenty, jako jsou cirkulační čerpadla, filtry a různá zařízení hlídající čistotu a správné chemické složení primárního chladiva, atd.

### Srovnání tlakovodního reaktoru a reaktoru RBMK

V období hysterické kampaně proti dostavbě a spuštění jaderné elektrárny Temelín často zaznívala i hesla proti stavbě „jihočeského Černobylu“, někteří na slovo vzatí „odborníci“ na jadernou energetiku dokonce mluvili cosi o reaktorech černobylského typu a bylo by možné vzpomenout ještě mnohé podobné dezinformační perličky. Z tohoto důvodu si v této kapitole uvedeme základní srovnání tlakovodního reaktoru a reaktoru typu RBMK. Jak je to tedy s podobností či odlišností obou typů jaderných reaktorů? Určité shodné rysy zde pochopitelně nalezneme, protože obě zařízení jsou jadernými reaktory, takže zcela logicky jisté obecné znaky musí být shodné. To ovšem bude platit třeba i v případě srovnání automobilů Mercedes a Trabant. A přesto ani laik patrně nepochybuje, že mezi oběma typy automobilů je propastný rozdíl. V našem případě je tlakovodní reaktor o mnoho blíže k onomu pomyslnému Mercedesu, nežli reaktor RBMK, a to zejména co se týče bezpečnosti a spolehlivosti.



**Obrázek 5 Schéma reaktoru RBMK**

Srovnáme-li schémata na obrázcích 2 a 5, je na první pohled patrné, že mezi oběma typy jsou diametrální konstrukční rozdíly. Charakteristickým znakem tlakovodních reaktorů je kompaktní aktivní zóna, ve které se nachází velmi hustě uspořádané palivové tyče. Mezi tyčemi proudí voda, která je zde zároveň chladivem i moderátorem. Celá aktivní zóna je pak uzavřena v ocelové tlakové nádobě. Takovéto uspořádání je však možné pouze v případě, kdy je moderátorem lehká voda. Ta je schopná brzdit neutrony velmi účinně, takže k jejich zpomalení stačí pouze krátká dráha. Poněkud odlišná je situace, pokud se jako moderátor používá grafit. Ten totiž zpomaluje neutrony mnohem méně, takže vzdálenosti mezi palivovými tyčemi musí být mnohem větší. V takovém případě však není možné použít klasickou konstrukci

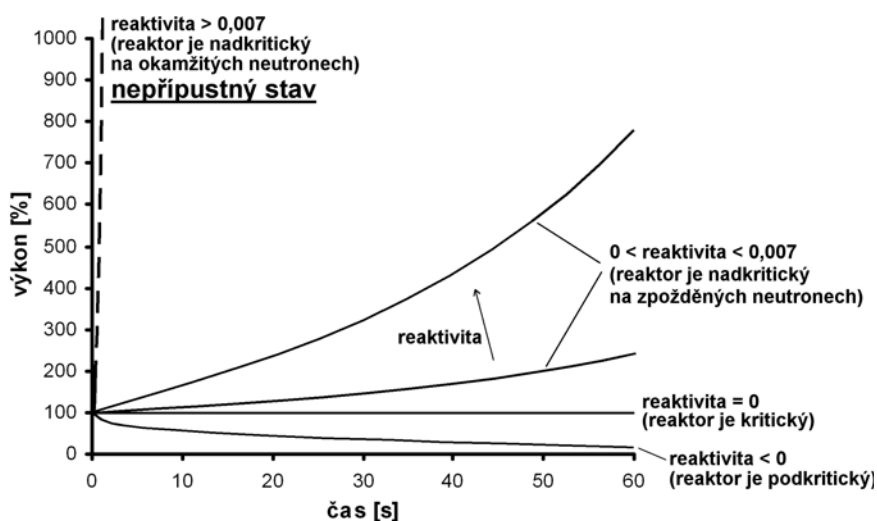
s tlakovou nádobou, neboť její průměr by vycházel příliš velký, a výroba takové nádoby by byla velmi obtížná či spíše nemožná. Zde se tedy používá odlišné konstrukční řešení s takzvanými tlakovými kanály. Toto řešení bylo využito i v případě reaktoru RBMK, jehož schéma je na obrázku 5.

Jako moderátor jsou zde použity grafitové bloky o rozměrech 250 mm x 250 mm x 600 mm. Grafitové bloky mají uprostřed válcový otvor o průměru 114 mm, vytvářející prostor pro palivové kanály nebo kanály s regulačními tyčemi. Vlastní tlakový kanál je tvořen trubkou ze zirkoniové slitiny o průměru 88 mm. Uvnitř tohoto kanálu se pak nachází vlastní palivové články tvořené nosnou centrální trubkou, okolo které je ve dvou koncentrických řadách rozmístěno 18 palivových tyčí. Chladivo je do kanálů přiváděno odspodu trubkami opatřenými regulačními ventily. Reaktor RBMK je koncipován jako reaktor varný, a tudíž z tlakových kanálů vystupuje parovodní směs, která se vede do bubnových separátorů nad reaktorem, kde dochází k separaci vody a páry. Voda se vrací zpět do reaktoru a pára se odvádí do turbíny.

Výhodou této konstrukce je, že odpadá technologicky náročná výroba tlakové nádoby, jejíž rozměry jsou navíc limitující pro výkon reaktoru. Počet tlakových kanálů lze zvyšovat mnohem snáze, což byl jeden z důvodů rozvoje těchto reaktorů v tehdejší SSSR. Kanálové reaktory také není nutné odstavovat kvůli výměně paliva, neboť pomocí speciálního zavážecího stroje je možné provádět v jednotlivých kanálech výměnu paliva za provozu. Použití grafitu, který méně pohlcuje neutrony, navíc umožňuje využívat méně obohacené palivo.

Grafitové reaktory tohoto typu mají ovšem také své nevýhody. Aktivní zóny těchto reaktorů jsou velmi rozměrné, což komplikuje regulaci, neboť regulační tyče mají jen omezený dosah. V takto velkých aktivních zónách navíc dochází k výkonovým oscilacím, které musí být kompenzovány pomocí přídavného regulačního systému. Bezpečnostní odstavení reaktoru je pomalejší nežli u tlakovodních, protože regulačním tyčím trvá delší dobu, nežli sjedou do aktivní zóny. Velmi závažným problémem je však to, že grafitem moderované a vařící se vodou chlazené reaktory typu RBMK vykazují v určitých provozních režimech kladnou výkonovou zpětnou vazbu. A to je v případě jaderného zařízení velký problém, protože v takovém zařízení může dojít i k nekontrolovatelnému růstu výkonu.

Problematiku zpětné vazby si lze zjednodušeně vysvětlit na regulaci běžného domácího kotle. U některých starších typů existovala jednoduchá regulace, která při nárůstu teploty vody na výstupu z kotle nad určitou hranici přivírala vzduchovou klapku. Tím došlo k omezení přívodu vzduchu a ke snížení výkonu kotle. To je příklad záporné zpětné vazby, která má ten-



Obrázek 6 Provozní stavy jaderného reaktoru

denci stabilizovat systém. Kladná zpětná vazba by naopak znamenala, že vzduchová klapka by se v takovém případě stále více otvírala a výkon kotle by dále narůstal. V důsledku toho by mohlo dojít až k poškození kotle nebo k havárii topného systému. U jaderných reaktorů je však tento problém složitější. V jaderné energetice zavádíme pojem reaktivita reaktoru, a můžeme ji definovat jako schopnost reaktoru udržovat, rozvíjet či tlumit štěpnou řetězovou reakci. Zjednodušeně lze říci, že reaktivitu můžeme chápat jako relativní přírůstek počtu neutronů mezi dvěma po sobě následujícími generacemi. Vztah reaktivity a základních provozních stavů reaktoru je znázorněn na obrázku 6.

Na obrázku 6 mimo jiné vidíme i to, že pokud zaslechneme termín, že reaktor dosáhl kritického stavu, tak to neznamena, že máme utíkat do sklepa. Naopak, kritickým stavem nazývá reaktorová fyzika stav, kdy je reaktivita rovna nule a výkon reaktoru je konstantní. Je to tedy stav, při kterém reaktor provozujeme. Při podkritickém stavu se reaktor zastavuje, při nadkritickém naopak rozbíhá. Na obrázku 6 však vidíme, že při rozběhu reaktoru je nutné dbát na to, aby reaktivita nepřekročila hodnotu přibližně 0,007, neboť poté by se reaktor stal takzvaně nadkritický na okamžitých neutronech, a to znamená nesmírně prudký a prakticky nekontrolovatelný nárůst výkonu. V čem spočívá tato hrozba?

Neutrony účastníci se štěpné řetězové reakce se dělí do dvou základních skupin. Zhruba 99,3 % neutronů představují takzvané okamžité neutrony, které se uvolňují přímo při rozpadu uranového jádra. Zbývající neutrony jsou se zpožděním od několika desetin sekundy po několik desítek sekund emitovány fragmenty, tedy jádru vzniklými při rozpadu uranu. Odtud také pochází jejich název – zpožděné neutrony. Okamžité neutrony se vyznačují velmi krátkou dobou života a během zhruba tisíce sekund způsobují štěpení dalších jader uranu a vznik nové generace neutronů. Provozovat reaktor pouze s těmito neutrony by však bylo prakticky nemožné, neboť by na sebemenší změnu podmínek či pohyb regulačních orgánů následovala velmi prudká odezva. Takový reaktor by byl silně nestabilní. Bezpečné řízení výkonu reaktoru nám tedy umožňují právě zpožděné neutrony.

Jde o to, že při konstantním výkonu musí být shodný počet neutronů ve dvou po sobě následujících generacích. A tato podmínka je splněna teprve tehdy, až doběhnou i zpožděné neutrony. Můžeme zjednodušeně říci, že reaktor na ně zkrátka musí „počkat“. Teprve pak je nová generace uzavřena. A právě díky této časové prodlevě jsme schopni reaktor řídit. Musíme ovšem dbát na to, aby reaktivita nepřekročila onu limitní hodnotu. V takovém případě je totiž přírůstek neutronů v nové generaci dost vysoký na to, aby na dosažení shodného počtu s tou předchozí stačily pouze okamžité neutrony. Reaktor se „vysmekne z otěží“ zpožděných neutronů a dojde k velmi prudkému vzrůstu výkonu.

Jak s touto hrozbou souvisí výše zmíněná kladná zpětná vazba od výkonu reaktoru? Jde o to, že u reaktoru RBMK může za určitých provozních režimů začít samovolně narůstat reaktivita. Jako kdybychom vytahovali regulační tyče. Na obrázku 6 je tento trend vyznačen šipkou. To je však velmi nebezpečné, neboť reaktor má tendenci sám od sebe a stále silněji urychlovat svůj rozjezd. Jak tato kladná zpětná vazba vzniká? Jádrem problému je to, že jako moderátor zde slouží grafitové bloky, ale chlazení obstarává vařící se voda. Obyčejná lehká voda je přitom sama dobrý moderátor, ale také má ve srovnání s grafitem poměrně velkou parazitní absorpci neutronů. A právě to může znamenat nebezpečí, pokud nastane v důsledku jakékoliv příčiny stav, kdy reaktor není dostatečně chlazen, takže se sníží množství vody v tlakových kanálech. Z hlediska reaktorové fyziky to znamená, že se z reaktoru ztrácí látka, která současně moderuje i absorbuje neutrony. Ztráta moderačního efektu vody je ovšem málo významná, neboť jako moderátor zde primárně slouží grafit a ten se pochopitelně nikam neztrácí. V důsledku toho převládá ztráta parazitní absorpce a začíná narůstat reaktivita.

Situaci zhoršuje fakt, že intenzita štěpné řetězové reakce v palivu není z hlediska neutronové fyziky prakticky omezena. V reaktorové praxi samozřejmě určité omezující faktory působí, ale přesto může výkon reaktoru v případě kritičnosti na okamžitých neutronech praktic-

ky skokově vzrůst do velmi vysokých hodnot. Odhady uvádějí, že v závěrečné fázi černobylské havárie reaktor RBMK během několika málo sekund doslova „ulétl“ na 100–150násobek nominálního projektového výkonu. Náhlému uvolnění tak obrovského množství energie pochopitelně nemůže odolat ani vlastní palivo ani další konstrukční materiály, takže v krátkém čase dojde k destrukci reaktoru, tak jako se to stalo v Černobylu. Zde ovšem zdůrazníme, že v případě této havárie nešlo o jaderný výbuch, jak by se někdo mohl mylně domnívat, ale o klasickou explozi v důsledku obrovského přetlaku způsobeného prudce se vyvíjející párou a celkového přehřátí reaktoru. Černobylský reaktor vybuchl tak, jako by vybuchl i klasický parní kotel, kdybychom během několika sekund zestonásobili jeho výkon.

Kladná zpětná vazba u reaktoru RBMK tedy představuje poměrně významné bezpečnostní riziko. Provoz reaktoru v tomto nebezpečném režimu byl sice přísně zakázán provozními předpisy, což se ovšem pro zajištění bezpečnosti ukázalo jako zcela nedostačující. Jedním z několika závažných pochybení, kterých se tehdy dopustila obsluha elektrárny, bylo i to, že navzdory předpisům provozovala reaktor v tomto nebezpečném režimu. Reaktor se do tohoto režimu dostal v rámci tehdy prováděného provozního experimentu, ale v takovém případě měl být odstaven a ne dále provozován.

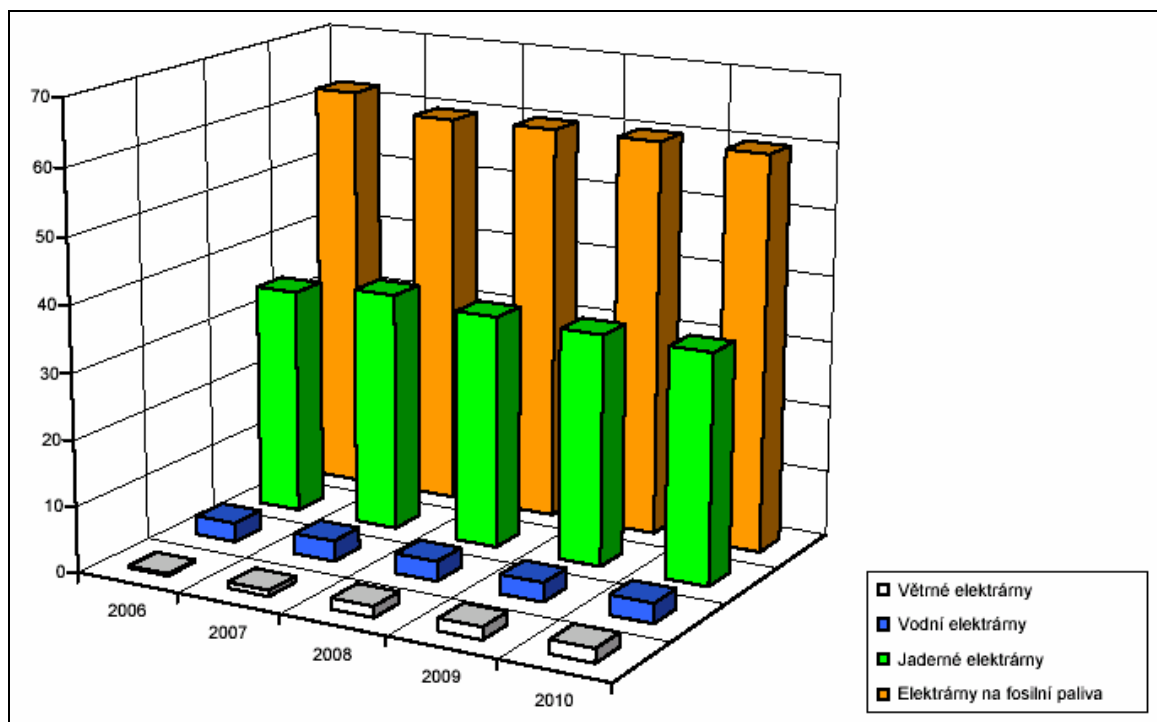
Závěrem je třeba zodpovědět otázku, zda hrozí toto nebezpečí také u tlakovodních reaktorů. Kategoricky lze říci, že nikoliv. A to hned z několika důvodů. Tlakovodní reaktory mají narozdíl od reaktorů RBMK zápornou zpětnou vazbu. S nárůstem teploty zde dochází naopak k poklesu reaktivity, takže reaktor má tendenci se brzdít a nikoli rozbíhat. Má tedy v sobě částečnou schopnost samoregulace. Zásadním důvodem je však sama koncepce reaktoru, kde voda je nejen chladivem ale i moderátorem. Takže pokud se z reaktoru začne ztrácet chladivo, ztrácí se zároveň i moderátor a reaktor se zastaví, neboť bez přítomnosti moderátoru nemůže probíhat štěpná řetězová reakce. Z toho plyne, že u tlakovodního reaktoru není nekontrolovaný nárůst výkonu možný už na základě zákonů reaktorové fyziky. Z hlediska jaderné bezpečnosti tedy lze tyto dva typy reaktorů jen těžko stavět na stejnou úroveň. A v žádném případě pak nelze hovořit o reaktorech černobylského typu či o riziku podobné havárie. Ta je u tlakovodních reaktorů na základě výše uvedených faktů principiálně nemožná.



## Energetická potřeba v ČR

Tomáš Dlouhý\*, Fakulta strojní, ČVUT v Praze

Současný životní styl lidské společnosti je nedílně spojen se spotřebou energie. V minulosti převažovala spotřeba energie tepelné především pro účely vytápění, které lze v určitých oblastech považovat za životní nutnost. Spotřeba tepla prudce vzrostla s rozmachem průmyslové výroby, kdy se teplo využívalo nejen ve vlastních výrobních procesech jako teplo technologické, ale sloužilo i k výrobě páry, která byla v 19. století hlavním zdrojem energie pro pohon strojů i dopravních prostředků. Postupem času byl parní pohon výrobních strojů nahrazován pohonem elektrickým, který měl proti parnímu nesporné výhody v jednoduchosti, vyšší pohotovosti, menší velikosti a možnosti dosažení větších jednotkových výkonů. Elektřina byla zprvu vyráběna jen v malých lokálních zdrojích, často v malých vodních elektrárnách. S rozmachem elektrifikace na přelomu 19. a 20. století, při níž docházelo k rozšiřování lokálních elektrických sítí a jejich propojování, rostla poptávka po elektřině a bylo zřejmé, že bez specializovaných výroben elektřiny další rozvoj nebude možný. V této době začaly vznikat první elektrárny, tedy zdroje, v nichž byla vyráběna elektřina s využitím energie získané spalováním paliva. Tyto zdroje označované jako tepelné elektrárny představují rozhodující základnu pro výrobu elektřiny i v dnešní době. V tepelných elektrárnách se teplo získané spálením paliva využije na výrobu vysokotlaké páry, která pak pohání parní turbínu, k níž je připojen elektrický generátor. Palivem pro ně může být zemní plyn, topný olej, nejčastěji však uhlí. Postupem času k elektrárnám tepelným přibýly elektrárny jaderné, které pracují na podobném principu, avšak teplo pro výrobu páry získávají ze štěpné reakce radioaktivního uranu v jaderném reaktoru. V poslední době se hodně hovoří o využití tzv. obnovitelných zdrojů energie pro výrobu elektřiny. Jedná se přede-

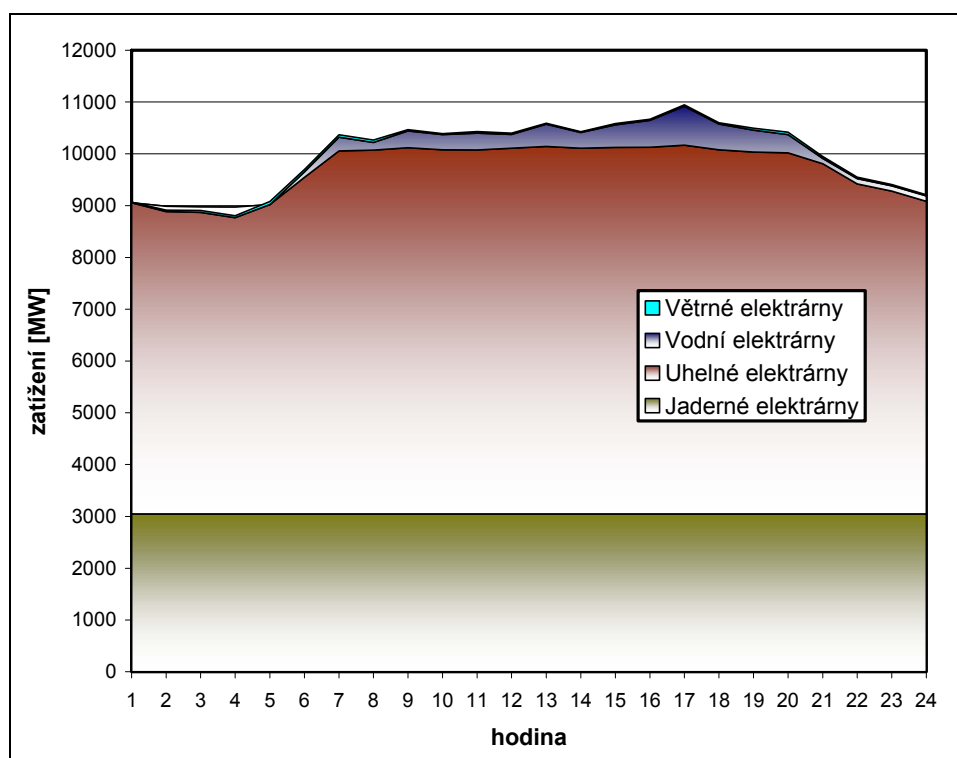


**Obr. 1** Procentní podíl jednotlivých skupin zdrojů na pokrytí očekávané spotřeby elektřiny v ČR (Zdroj: EGU Brno 2004)

\* Tomas.Dlouhy@fs.cvut.cz

vším o využití vodní energie ve vodních elektrárnách, dále pak o využití energie větru pro pohon větrných turbín a energie Slunce, jehož záření je přeměňováno přímo na energii elektrickou ve fotovoltaických článcích. Výhodou těchto zdrojů je jejich „nevyčerpatelnost“ a minimální negativní vliv na životní prostředí při jejich využívání. Hlavní nevýhodou je naopak nízká spolehlivost dodávky elektřiny z těchto zdrojů související se závislostí jejich výkonu na proměnlivých klimatických podmínkách. Již dnes je jasné, že přes snahu trvale zvyšovat podíl výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů nelze na jejich využívání budovat základ stabilní energetiky, který musí být tvořen spolehlivými tepelnými, resp. jadernými elektrárnami. Tuto skutečnost dokumentuje i obr. 1, kde je znázorněn poměrný podíl jednotlivých skupin zdrojů na pokrytí očekávané spotřeby elektřiny v ČR v příštích letech.

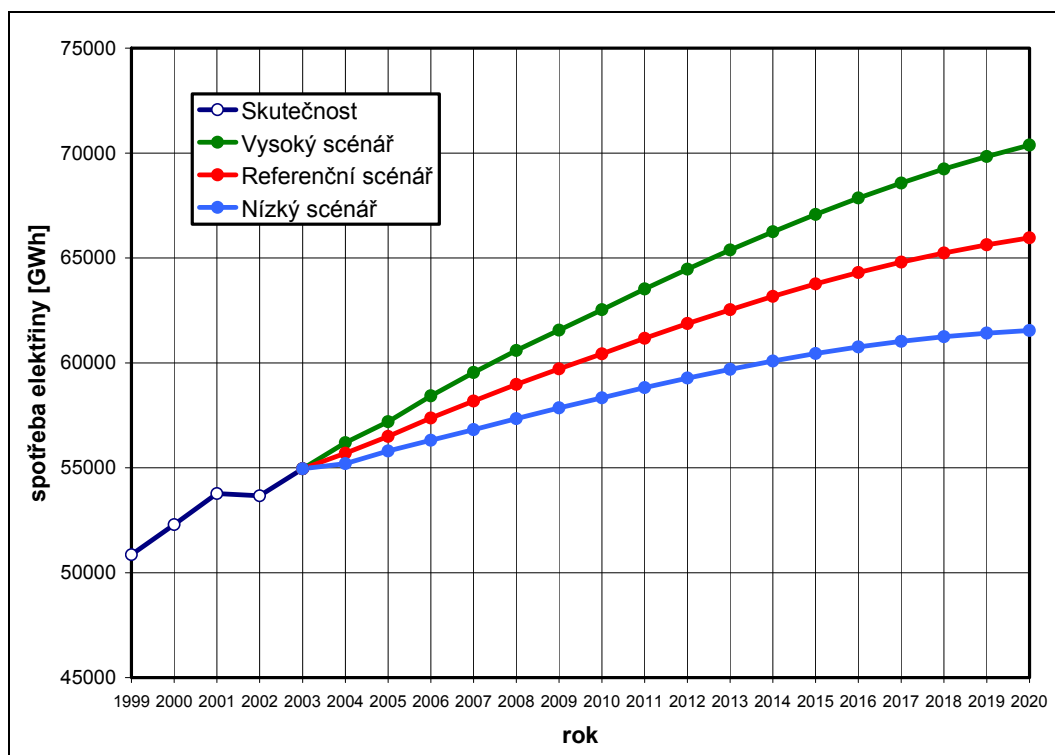
Dnes považujeme spotřebu elektřiny za naprostou samozřejmost. Těžko bychom si dokázali představit život bez ní a domyslet všechny důsledky, které by vyplývaly z přerušení její dodávky. Aby k tomu nedošlo, je třeba provoz energetické soustavy přesně řídit. Určitou nevýhodou elektřiny, jakož i jiných forem energie, je její obtížná „skladovatelnost“, které říkáme akumulace. V praxi to znamená, že okamžitá výroba elektřiny musí být v rovnováze s její okamžitou spotřebou. To klade mimořádné nároky na regulaci provozu energetických zdrojů, které musí do sítě dodávat právě takové množství elektřiny, které je současně odebráno. Odběr se při tom může dosti nahodile měnit. Charakteristický průběh denního zatížení sítě v zimním období u nás a podíl jednotlivých typů zdrojů na jeho krytí je znázorněn na obr. 2. Z obrázku je jasné parný rozhodující podíl elektřiny vyráběné v uhelných elektrárnách.



**Obr. 2 Krytí denního diagramu zatížení pro ČR – zimní období (zdola postupně jaderné, uhelné a vodní elektrárny; přínos větrných elektráren je zanedbatelný a není v grafu patrný)**

Dlouhodobé statistiky jednoznačně ukazují, že spotřeba elektřiny s růstem životní úrovně společnosti stoupá. S tímto faktem je třeba počítat při plánování obnovy stávajících a výstavby nových elektráren. Plán přitom musí být zpracován s dostatečným předstihem, neboť výstavba nové elektrárny trvá několik let. Elektrárenská společnost ČEZ, a.s., která je naším dominantním výrobcem elektřiny, věnuje tomuto problému velkou pozornost. Pravidelně si

nechává zpracovávat aktualizované prognózy očekávaného vývoje spotřeby elektřiny. U nás se touto problematikou zabývá společnost EGÚ Brno, a.s. Prognóza vývoje spotřeby elektřiny v ČR do roku 2020 je uvedena na obr. 3. Prognóza se obvykle zpracovává ve dvou variantách, pro tzv. nízký a vysoký scénář, které by měly pokrývat pásmo rozptylu skutečné budoucí spotřeby. Pro účely plánování se pak obvykle uvažuje střední varianta označená jako referenční scénář. Z porovnání předpokládaného vývoje spotřeby elektřiny s výrobní kapacitou zdrojů vyplývá potřeba na zvýšení jejich instalovaného výkonu. Přitom je třeba brát v úvahu stárnutí a dožívání stávajících elektráren, které bude třeba opravit nebo nahradit novými. Tímto způsobem je možné určit čas, kdy je třeba zahájit přípravu výstavby nových elektráren, aby budoucí spotřeba elektřiny mohla být plně pokryta.



Obr. 3 Očekávaný vývoj spotřeby elektřiny v ČR (Zdroj: EGÚ Brno 2004)

Česká energetika se nyní nachází v přelomovém období, kdy je otázka výstavby nových elektráren velmi aktuální. Většina našich uhelných elektráren byla postavena v sedmdesátých letech minulého století a blíží se konec jejich životnosti. Elektrárenská společnost ČEZ, a.s. proto zahájila přípravu jejich náhrady. Dle informací, které již byly zveřejněny, se připravuje výstavba dvou nových uhelných energetických bloků s výkonem 660 MW a některé stávající elektrárny budou modernizovány. Současně se hovoří i o výstavbě dalších jaderných zdrojů. Souběžně s tím se počítá s kontinuálním zvyšováním podílu výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů. Pouze tímto způsobem je možné zajistit soběstačnost ve výrobě elektřiny, která je důležitá pro ekonomickou nezávislost našeho hospodářství a mohla by být v případě dovozu většího množství elektřiny ze zahraničí ohrožena.

## Černobyl po dvaceti letech (postřehy z konference Černobylského fóra)

*Václav Hanus\* , prezident České nukleární společnosti*

Dne 6. 9. 2005 jsem se zúčastnil mezinárodní konference Černobylského fóra\*\* nazvané „Chernobyl: Looking Back to Go Forwards“, která se konala v sídle MAAE ve Vídni. Byl jsem velmi zvědav na výsledky výzkumu vlivu černobylské katastrofy na životní prostředí a na zdraví obyvatelstva postiženého touto událostí. Od katastrofy uběhlo již 20 let a je tedy možno seriózně vyhodnotit i dlouhodobé dopady na životní prostředí a zdraví obyvatel. Ve velkém zestručnění, za které se omlouvám, ale bez kterého to nejde, lze závěry vědeckých výzkumů shrnout do těchto bodů:

1. Radiací s vážnými zdravotními následky byli postiženi pouze záchranáři a dělníci bezprostředně se podílející na hašení požáru bloku. Počet úmrtí takto zasažených lidí lze počítat z minulosti do budoucnosti v desítkách.
2. Pro obyvatelstvo platí, že se nepotvrdilo žádné zvýšení počtu rakovin, leukémií, či nerakovinových onemocnění, které by způsobila radiační zátěž z Černobylu mimo rakoviny štítné žlázy, kde počet úmrtí dosáhl dosud počtu 9. Zdravotní rizika, plynoucí z kouření a nadměrného užívání alkoholu, jsou mnohonásobně vyšší, než rizika plynoucí z černobylské radiační zátěže. Na druhou stranu nikdo bohužel nekvantifikoval počet zachráněných životů, plynoucí z nadstandardní zdravotní péče, která byla zkoumané populaci po havárii věnována.
3. Černobyl byla více katastrofa sociální, než radiační. Sociální problémy spojené s evakuacemi, přesídlením a ztrátou zaměstnání v podmínkách rozpadlého Sovětského svazu jsou ty nejtěžší.
4. Dopady na životní prostředí mimo zakázané pásmo v okolí elektrárny (30 km) jsou vesměs neměřitelné. V zakázaném pásmu se situace s časem natolik zlepšila, že je možno provést jeho výrazné zmenšení. (Poznámka autora – vytvoření prostoru bez lidí kolem elektrárny znamenalo vytvoření prostoru pro nerušený vývoj biotopů a rozvoj panenské přírody včetně návratu největších predátorů, medvědů a vlků. Nádherný to experimentální prostor pro ekology.)

Je zřejmé, že nukleární katastrofa apokalyptických rozměrů, jak ji líčili Greenpeace a další zelení, se ve skutečnosti nekonala.

Pro mne byla z konference nejzajímavější závěrečná diskuse, která odrážela spíše problém mediální prezentace katastrofy, než že by se zabývala vlastním obsahem výzkumu. Například problém se objevil již s tiskovou zprávou s výsledky výzkumu, zveřejněnou těsně před konferencí. Z formulace zprávy vyplynulo pro většinu médií, že lze očekávat v budoucnu dalších 4 000 úmrtí. Toto číslo ale vzniklo tak, že na požadavek zadavatelů výzkumu měli vědci odpovédět na otázku, kolik lidí ještě na následky katastrofy zemře. Byl to teoreticky téměř neřešitelný problém. Proto vědci použili pro tento odhad srovnávací model plynoucí „z Hirošimy“. Při přednášce bylo několikrát podtrženo, že se jedná o odhad na základě modelu, který nemusí pro Černobyl vůbec platit a že se jedná o odhad s obrovskou nejistotou. Nicméně řetě-

\* vaclav.hanus@cez.cz

\*\* *Černobylské fórum je spojení agentur OSN (IAEA, WHO, UNPD, FAO, UNEP, UN-OCHA, UNSCEAR) a vlád Běloruska, Ruska a Ukrajiny a světové banky, zaměřené na hodnocení dopadů černobylské havárie a na koordinaci pomoci postiženým zemím.*

zec událostí vedl k tomu, že média napsala, že v Černobylu zemře ještě 4 000 lidí!?! Další ukázkou zmatků panujících kolem interpretace důsledků Černobylu byla vystoupení v diskusi. Jedním z nich bylo vystoupení členky britského parlamentu, která se dotazovala, jak má chápat to, že jim bylo vždy tvrzeno, že počet obětí byl jen v desítkách a nyní se mluví ještě o dalších 4 000 mrtvých? Následovalo nepřesvědčivé vysvětlování statistických metod a nejistot. Naproti tomu dotaz představitelky PR-agentury zněl v tom smyslu, jak má vysvětlit čtenářům to, že se nyní mluví jen o 4 000 obětí, když se dříve uváděly desetitisíce až statisíce obětí? Následovalo rozpačité mlčení. Pěkný chaos, že?! Dotýkám se tímto, jak čtenář jistě tuší, problému obecnějšího. Jak podat seriózní informaci o čemkoliv prostřednictvím „krvelačných“ médií veřejnosti tak, aby tomu rozuměla a byla to přitom pravda.

Na konferenci se zúčastnily také Greenpeace. Bylo zajímavé porovnat obsah konference s vyzněním jejich prezentace na posterech. Jejich expozice se skládala z velkých fotografií černobylylských dětí s rakovinnými nádory a leukémiemi. Emocionálně velmi silných obrazů. Výsledky výzkumů, prezentované ve vedlejší sále však říkají, že zhoubných onemocnění bylo a je v populaci zasažené černobylylskou havárií úplně stejně jako kdekoli jinde ve světě, vyjma rakoviny štítné žlázy?!? Mistři manipulace?!

Zdá se, že „memento Černobyl“, kterým odpůrci jaderné energie děsí laiky a straší politiky, je jen obrovská bublina. Jeho dopad na rozvoj jaderné energetiky však byl v některých zemích extrémně negativní. Vzpomeňme Itálii, či Německo. Jak se asi s „černobylylskou lží“ vypořádají zelení? Na druhé straně měl Černobyl i pozitivní dopad. Založení WANO a rozvíjení všech jeho programů považují za největší přínos černobylylské havárie. Posílila se pozice dozoru nad jadernou bezpečností. Bezpečnost jaderných elektráren se od té doby mnohonásobně zvýšila, a to jak po stránce technické, tak zejména po stránkách organizační a personální, a to i za podmínek zvyšujícího se tlaku na ekonomiku provozu.

**To je v podstatě vše, o čem jsem se chtěl s čtenářem podělit. Zbývá si jen přát, aby se pravda, byť až po dvaceti a více letech, přece jenom dostala na světlo světa. Někdy to holt hrozně dlouho trvá.**

## Kdo se bojí radiace?

Stanislav Kočvara\*, VF, a.s. Černá Hora

### ÚVOD

Od počátků lidského rodu platí, že máme strach především z neznámého. Lidé měli v minulosti strach z ohně, blesku, zatmění Slunce a dalších přírodních jevů, kterých se dnes už příliš nebojíme, protože jsme je dokázali poznat, využít a pochopit, že jsou součástí našeho každodenního života.

Neskromným cílem tohoto článku je napomoci tomu, aby se jeho čtenáři dověděli něco více o radiaci, dokázali ji pochopit a uvědomili si, že je součástí našeho každodenního života.

### CO JE RADIACE?

Encyklopedie <http://www.CoJeCo.cz>: *Radiace je šíření energie prostorem. Mechanické šíření energie je možné pouze v hmotném prostředí. Záření elektromagnetické a záření korpuskulární se šíří i vakuem. Prostor ovlivňuje jeho rychlost. V moderní fyzice jsou korpuskulární a vlnové záření dva ekvivalentní modely téhož jevu.*

Z výše uvedené definice vyplývá, že radiace je velmi široký pojem. Namísto *radiace* bychom také mohli použít český termín *záření*. Existuje tepelné záření, které se k nám šíří například od hořícího ohně, mikrovlnné záření, které nám zajistí během 2 minut teplou večeři, dále třeba optické záření, ať už je ze Slunce, žárovky nebo displeje mobilního telefonu, a různé další druhy záření. Pro čtenáře tohoto článku, učitele a studenty středních škol, zcela jistě známé pojmy.

Záření, o kterém si řekneme něco více, je **radioaktivní záření** a také kosmické a rentgenové záření. Tato se souhrnně označují jako **ionizující záření**.

V přírodě se vyskytují nuklidy (atomy s přesně definovaným počtem protonů a neutronů v jádře), které se přeměňují na jiné nuklidy. Tento jev lze také vyvolat uměle a nazývá se **radioaktivita**, přičemž ty nuklidy, které mají schopnost se přeměňovat na jiné, se nazývají **radionuklidy**. Při těchto přeměnách dochází k uvolňování radioaktivního záření. Díky tomu byla také radioaktivita v roce 1896 objevena Henrim Becquerelem. Ten pozoroval soli uranu, které vysílaly do té doby neznámé záření, které způsobilo zčernání fotografické emulze. Pierre a Marie Curie, kteří navázali na jeho výzkumy, nazvali tento jev radioaktivitou.

V první polovině našeho století byl tento jev intenzivně studován. Na konci třicátých let O. Hahn a F. Strassmann publikovali výsledky experimentů s ozařováním těžkých jader neutrony, což byl základ pro první řízenou štěpnou jadernou reakci provedenou Enricem Fermim v roce 1942 ve Spojených státech. Poté už se vývoj ubíral dvěma směry vedoucími na jedné straně k výrobě jaderných zbraní a na straně druhé k mírovému využití jaderné energie. Meče i zde předešly pluhu. První jaderná puma byla použita Spojenými státy v roce 1945 a první komerční jaderná elektrárna byla uvedena do provozu v roce 1954 v Sovětském svazu.

\* stanislav.kocvara@vf.cz

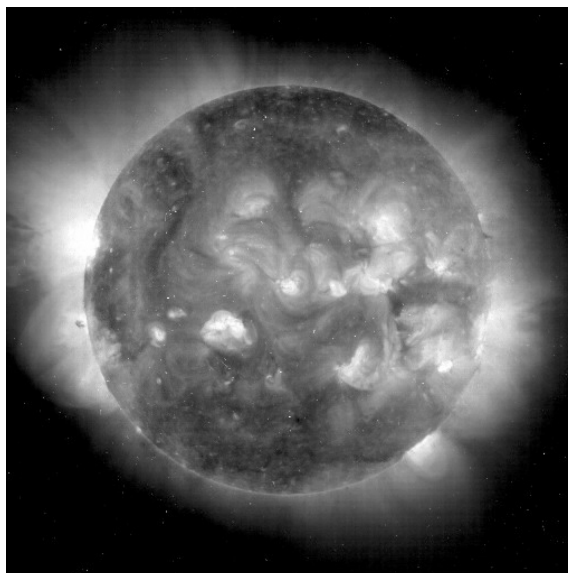
## ZDROJE ZÁŘENÍ

Zdroje ionizujícího záření je možné rozdělit na dvě hlavní skupiny: přirozené, se kterými žili lidé před 3 000 lety stejně tak jako dnes, a umělé, které vznikají jako důsledek lidské činnosti.

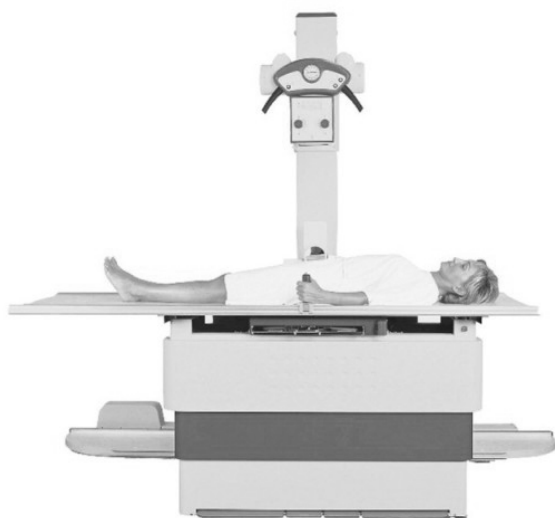
### Přirozené

Některé přirozené radionuklidy nacházející se na Zemi vznikly dříve než naše sluneční soustava. Vedle nich existují přirozené radionuklidy „obnovitelné“, například tritium a uhlík 14, které vznikají neustále v atmosféře působením kosmického záření. Hlavními zdroji záření ve volné přírodě, které tvoří takzvané přirozené radiační pozadí, jsou:

- kosmické záření, které k nám přichází ze vzdálených galaxií i z „blízkého“ Slunce,
- radon obsažený v půdě a produkty jeho přeměny, které v plynné formě prostupují z podloží do našich domovů,
- další přírodní radionuklidy, které se vyskytují ve všem kolem nás, v půdě a také v našem vlastním těle.



Obrázek 1 Sluneční záření



Obrázek 2 Rentgenový přístroj

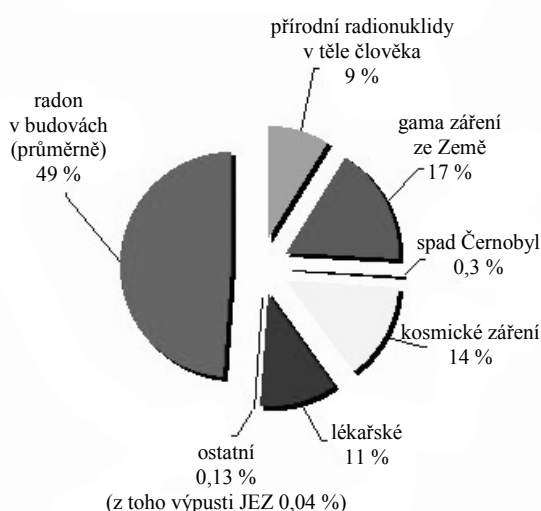
### Umělé

Hlavní umělé zdroje ozáření obyvatelstva, ty, které ovlivňuje člověk svojí činností, jsou:

- lékařské aplikace, jako radiodiagnostika (všeobecně známé rentgenové snímky) a radioterapie (známé především v souvislosti s léčbou rakoviny ozařováním).
- těžební průmysl,
- jaderné testy a jaderná energetika (výroba energie v jaderných elektrárnách).

Jako nejzajímavější otázka se v tuto chvíli jeví: **Jaký je podíl umělých zdrojů ozáření obyvatelstva v České Republice vůči přirozeným zdrojům?**

Pro posouzení vlivu na člověka se používá tzv. efektivní dávka, jejíž jednotkou je sievert (Sv). Tato veličina souvisí s energií, kterou předá ionizující záření v těle člověka, a zohledňuje také různou škodlivost různých druhů záření a různou odolnost různých lidských orgánů vůči záření. Průměrná dávka z ozáření z přírodních zdrojů pro člověka činí v ČR přibližně 3,5 mSv/rok. Průměrné ozáření z umělých zdrojů je o něco více než 0,3 mSv/rok.

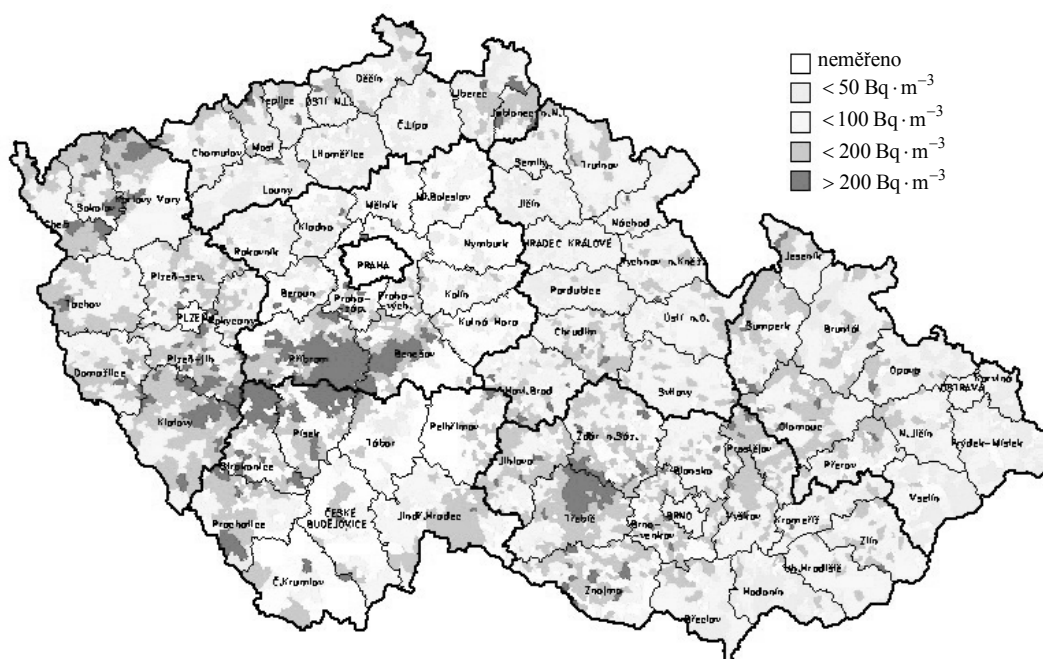


**Obrázek 3 Rozdělení dávek;** (zdroj Státní úřad radiální ochrany ČR)

Z grafu vyplývá několik důležitých a zajímavých skutečností. Podíl umělých zdrojů ozáření obyvatel je přibližně 12 %. Ovšem z toho celých 11 % pochází z lékařského ozáření, především z rentgenového snímkování. Tedy z toho ozáření, které se děje a je všeobecně přijímáno na základě principu, že jeho přínos je výrazně vyšší než jeho potenciálně škodlivé účinky.

Pouze necelé 1 % ozáření obyvatelstva vzniká v důsledku dalších lidských činností, mimo jiné jako důsledek testů jaderných zbraní a v mnohem menší míře také někdy tak obávaného využívání jaderné energie pro výrobu elektřiny.

Mezi přirozenými zdroji ozáření vyniká radon. Tomuto zdroji ozáření je v poslední době věnována velká pozornost. V České republice byla zavedena povinnost měřit před vydáním stavebního povolení tzv. radonový index pozemku, určující potenciální riziko pro dům postavený na takovém pozemku, a také povinnost měřit radon v postaveném objektu před kolaudací.



**Obrázek 4 Mapa průměrných hodnot výskytu radonu v obcích ČR**



Obecně lze říci, že příspěvek umělých zdrojů navyšuje přirozené každodenní ozáření velmi málo. Jeho vliv je výrazně nižší než například regionální rozdíly. Například v ČR existují oblasti, kde je přirozené ozáření (především z radonu) několikrát vyšší než je průměr. Existují oblasti na světě, kde je přirozené ozáření až 10krát nebo i 100krát vyšší, než je běžné v České Republice, tedy v řádu desítek mSv/rok.

Dovolená na některých oblíbených brazilských plážích přispěje k našemu ozáření řádově více, než například stanování v areálu jaderné elektrárny Dukovany v těsném sousedství skladu vyhořelého paliva.

Pro srovnání, limity stanovené Státním úřadem pro jadernou bezpečnost pro zajištění zdraví obyvatelstva stanovují, že celková dávka z umělých zdrojů může být maximálně 1 mSv/rok. Do těchto limitů se nezapočítávají přirozené zdroje ani lékařské ozáření. Pro zajišťovatelnost lze také uvést, že možné škodlivé účinky na člověka lze prokázat až v oblastech dávek 100krát vyšších, než jsou limity pro obyvatelstvo. Pro vyvolání nemoci z ozáření, kterou známe z filmů o Hirošimě a Nagasaki nebo ze zpráv o černobylské havárii, je třeba ozáření dávkami větších jak 1 Sv, tedy 1000krát větších, než jsou stanoveny limity pro zajištění zdraví. Z toho je zřejmé, že přístup k radiační ochraně v ČR i ve světě je velmi konzervativní a opatrný, především co se týče umělých zdrojů ozáření.

### OCHRANA PŘED ZÁŘENÍM

---

Lidské tělo je určité úrovni záření přivyklé a odolné. Existují i teorie říkající, že ionizující záření je v oblasti malých dávek lidskému zdraví prospěšné. To, před čím je třeba se chránit, je významně vyšší ozáření, než je běžné v každodenním životě.

Jsou tři základní způsoby ochrany před zářením:

- ochrana časem,
- ochrana vzdáleností,
- ochrana stíněním.

#### Ochrana časem

Čím méně času jsme vystaveni nějakému záření, tím méně jsme celkově ozáření. To je jednoduchá přímá úměra. Pokud absolvujeme dvě stejná zubní rentgenová vyšetření, jedno bude trvat 0,2 s a druhé 0,4 s, pak jsme ve druhém případě obdrželi dvojnásobnou dávku.

V praxi se to například na jaderné elektrárně projevuje tak, že si pracovníci předem natrénují některé nestandardní činnosti tak, aby je při práci naostro v prostředí, kde je zvýšená radiace, zvládli za co nejkratší možnou dobu.

#### Ochrana vzdáleností

Pokud jsme ve dvojnásobné vzdálenosti od zdroje záření, je naše ozáření 4krát menší. Proto je ochrana vzdáleností velmi důležitá.

V praxi se tento princip uplatňuje například tím, že pracovníci používají různé pinzety, manipulátory a nástavce pro manipulování a přemísťování zdrojů ionizujícího záření.

#### Ochrana stíněním

Ochrana stíněním je nejsložitější a liší se hodně podle druhu záření. Mezi zdroj záření a chráněnou osobu vložíme vrstvu, která část energie ionizujícího záření pohltí.

To, že existují různé druhy radioaktivního záření označované jako  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$ , je poměrně dobře známé. Všichni také víme o existenci dalšího druhu ionizujícího záření, záření rentgenového.

#### Záření alfa:

Záření alfa je tvořeno částicemi alfa, což není nic jiného než jádra helia se dvěma neutrony a dvěma protony bez elektronového obalu. Původní prvek se tedy při přeměně alfa mění na jiný, který má o dva protony méně.

Záření alfa má velmi malý dolet, jako stínící materiál slouží i samotný okolní vzduch a spolehlivě je zachytí pouhý list papíru.

### Záření beta:

Jedná se o elektrony ( $\beta^-$ ) nebo pozitrony ( $\beta^+$ ), které byly uvolněny z jádra. Například při nadbytku neutronů v jádře radionuklidu se přemění neutron na proton a z jádra se uvolní elektron. Je to nejrozšířenější typ přeměny a je třeba si uvědomit, že při ní nevzniká jiný prvek. Těmito reakcemi si radionuklidy upravují poměr protonů a neutronů v jádře na stabilnější.

Ani stínění záření beta nepředstavuje závažný problém. Používají se spíše lehčí materiály (aby se minimalizoval vznik sekundárního brzdného rentgenového záření) a za dostatečnou ochranu lze považovat například několikamilimetrový hliníkový plech.

### Záření gama:

Je častým průvodním jevem ostatních radioaktivních přeměn. Jedná se o elektromagnetické vlnění o velmi krátkých vlnových délkách a vysokých energiích. Nemění se tedy počet protonů nebo neutronů v jádře, které záření gama emitovalo.

Vzhledem ke své povaze má toto záření největší schopnost pronikat hmotou. Ke stínění se používají těžké materiály, jako například olovo nebo ochuzený uran, anebo silné vrstvy materiálů jako je beton, voda a další.

### Záření rentgenové (RTG, X)

Záření rentgenové má stejnou povahu jako záření gama. Liší se tím, že nevzniká v jádře atomu, ale v jeho elektronovém obalu a má obecně menší energii.

Pro ochranu před ním platí stejné principy. Až půjdete příště na celkový rentgenový snímek chrupu, neďte se, že vám bude oblečena speciální ochranná zástěra s límcem z olovnaté gumy za účelem ochrany především štítné žlázy, což je jeden z orgánů více citlivých na záření.



**Obrázek 5 Práce se zdroji ionizujícího záření, jako stínění je použita betonová zeď a průzor z olověného skla**

## MĚŘENÍ ZÁŘENÍ

Ionizující záření je neviditelné a nezachytitelné lidskými smysly. Proto je prvním úkolem při ochraně před ním jeho zjištění a změření pomocí přístrojů. Tyto přístroje využívají různé principy detekce záření, jako jsou vznik volného náboje v látce po průchodu záření, zčernání fotografické emulze a další.

V praxi je možné se setkat hodně s pojmy detektory a dozimetry. **Detektor** je obecný pojem, detektory umožňují určit přítomnost záření a odhadnout jeho intenzitu. Na různé druhy záření existují různé druhy detektorů.

Každý si umí představit, že místem s největším výskytem různých detektorů jsou jaderné elektrárny. Na jaderné elektrárně se měří radiace v pracovním prostředí, v areálu elektrárny, v plyných výpustech z ventilačních komínů, v kapalných výpustech z odpadních kanálů i v okolních vesnicích. Vše za účelem ochrany zdraví pracovníků a obyvatelstva.

Měří se také kontaminace osob a vozidel radioaktivními látkami na výstupu a výjezdu z elektrárny, ale i na vstupu a vjezdu do elektrárny. Paradoxně jsou známé případy, kdy nějaké vozidlo nebo osoba nebyly vpuštěny do elektrárny, protože byly příliš radioaktivní a ne-

splnily velice přísné limity používané na jaderných elektrárnách. Důvodem může být nějaká součástka se zvýšenou radioaktivitou. U osob to může být skutečnost, že v nedávné době absolvovali nějaké lékařské vyšetření na pracovišti nukleární medicíny, při kterém se používají radioaktivní látky aplikované do krevního oběhu, které po čase tělo samy opustí.



**Obrázek 6 Rámový detektor pro kontrolu kontaminace nákladních vozidel**

Co už není tak známé, je fakt, že pomocí různých detekčních zařízení je monitorovaná prakticky celá planeta. Existují různé národní i nadnárodní sítě detekčních zařízení, provozované různými institucemi za účelem monitorování přirozené radiace, včasného zjišťování případné zvýšené radiace, hlídání dodržování zákazu testů jaderných zbraní a podobně.

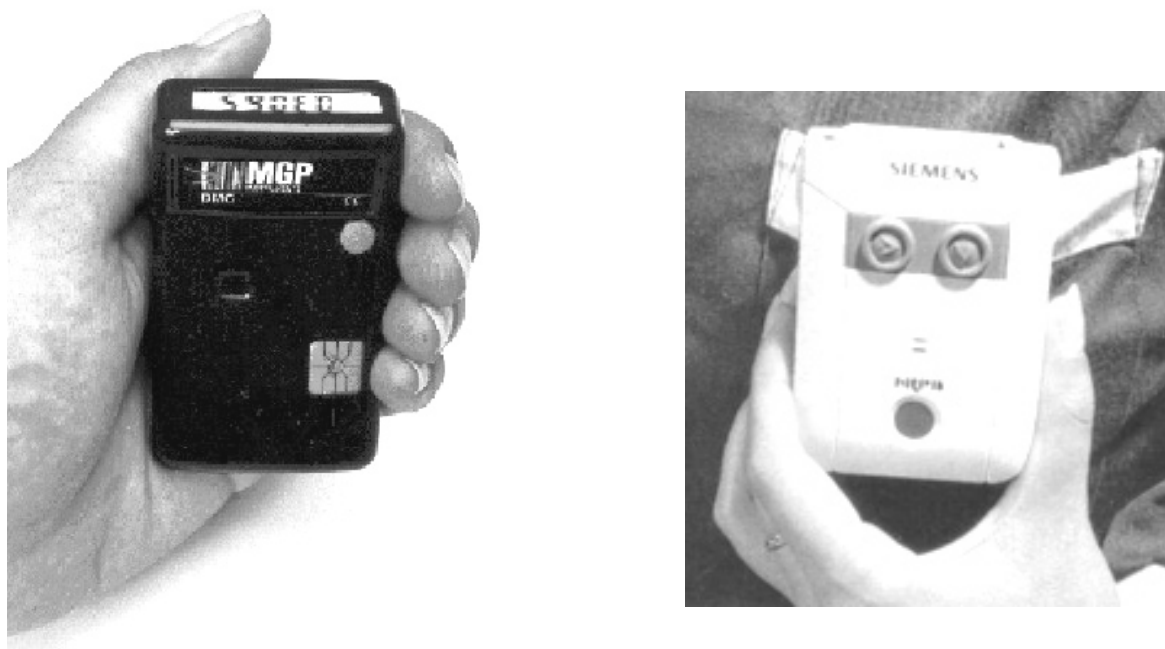
V České Republice provozuje celostátní radiační monitorovací síť Státní úřad radiační ochrany a s výsledky měření je možné se okamžitě seznámit na internetových stránkách <http://www.suro.cz/cz/rms/index.html>.

V okolí jaderných elektráren Dukovany a Temelín navíc existuje systém monitorování radiace provozovaný jadernými elektrárnami samými, ale také například nezávislé systémy provozované českými a rakouskými nezávislými organizacemi, jako jsou Hnutí Duha, Global 2000 a jiné (<http://www.hnutiduha.cz/ramos.html>).

V roce 2000 zavedla brněnská spalovna SAKO monitorování příchozích komunálních odpadů na přítomnost radioaktivních látek. Na vjezdu byly nainstalovány monitory vozidel. Byla uzavřena dohoda se společností VF, a.s. (<http://www.vf.cz>), která zajišťuje rychlý výjezd skupiny za účelem nalezení a bezpečné likvidace zářiče. Výjezdy se uskutečňují na základě hlášení pracovníků spalovny, že monitory na vjezdu ukazují zvýšenou míru radiace. Takových výjezdů se uskuteční přibližně 1–2 za měsíc. Mezi nejčastěji nalezené předměty s mírně zvýšenou radioaktivitou patří staré buzoly a výškoměry, jednorázové hygienické potřeby pacientů, kterým byly aplikovány radioaktivní látky, různé kovové odlitky, požární hlásiče a jiné. Tyto jsou následně odpovídajícím způsobem předány majiteli, anebo řádně uloženy na státních úložištích radioaktivních odpadů provozovaných Správou úložišť radioaktivních odpadů (<http://www.surao.cz>).

**Dozimetr** je název používaný především pro malé a citlivé přístroje k měření velikosti dávky, tzn. množství energie, kterou záření lidskému tělu předalo. V tomto významu se jedná o tzv. osobní dozimetry. Slouží k ochraně pracovníků, kteří mohou být vystaveni působení io-

nizujícího záření, zaměstnanců jaderných elektráren a dalších jaderných zařízení, lékařů na rentgenologických odděleních, vojáků, hasičů, pracovníků civilní ochrany, horníků, pilotů a podobně. Moderní elektronické osobní dozimetry dokáží okamžitě informovat pracovníka o dávkovém příkonu v prostředí (dávka, kterou obdrží za jednotku času), o celkové dávce, kterou obdržel při práci, a také upozornit automaticky včas na skutečnost, že obdržená dávka se blíží povoleným limitům.



**Obrázek 7 Elektronické osobní dozimetry**

### ZDROJE INFORMACÍ O IONIZUJÍCÍM ZÁŘENÍ

---

- Státní úřad radiační ochrany:  
<http://www.suro.cz/cz/index.html>
- Správa úložišť radioaktivních odpadů; virtuální informační centrum:  
[http://www.vidivici.cz/surao2/?r=virtualni\\_informacni\\_stredisko&Lang=CS](http://www.vidivici.cz/surao2/?r=virtualni_informacni_stredisko&Lang=CS)
- Článek o radiační ochraně:  
<http://astronuklfyzika.cz/RadiacniOchrana.htm>
- Článek o havárii v jaderné elektrárně Černobyl:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cernobylsk%C3%A1\\_hav%C3%A1rie](http://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cernobylsk%C3%A1_hav%C3%A1rie)
- VF, a.s., český výrobce přístrojů pro měření radiace:  
<http://www.vf.cz>

## Biologické účinky a zdravotní následky působení malých dávek ionizujícího záření

Vladislav Klener\*, Odborný konzultant SÚJB a SÚRO

Problematika biologických a zdravotních účinků malých dávek ionizujícího záření se netýká jenom úzkého oboru radiobiologie, ale je zajímavá a svými důsledky i citlivá pro širokou rodinu jaderných oborů. Otázka malých dávek je velmi členitá a lze ji pojmout z různých úhlů. Po formální stránce jde o hledání a popis průběhu funkce mezi dávkou záření jako nezávisle proměnnou a ukazateli účinku. Předmětem našeho zájmu bude obor dávek blížících se nule.

### METODY VÝZKUMU, ZDŮVODNĚNÍ VÝZNAMU NEJEN HUMÁNNÍCH ALE I EXPERIMENTÁLNÍCH STUDIÍ

Podkladem pro zjištění hledané závislosti jsou dvě kategorie primárních experimentálních dat. Jsou to na jedné straně výsledky pozorování v kolektivech lidí, kteří byli nadměrně ozářeni. Populační šetření tohoto typu jsou zaměřena na odkrývání chorobných změn a na sledování četnosti jejich výskytu v závislosti na dávce. Tyto studie se označují jako epidemiologické a je jim věnována celosvětově soustavná pozornost. Přínos těchto studií k problematice malých dávek je předmětem samostatného sdělení tohoto pracovního zasedání.

Data zjištěná studiem lidských populací však nestačí k pochopení obecných zákonitostí působení ionizujícího záření na živé systémy a zejména k nalezení odpovědi o účinku malých dávek záření. Je zapotřebí opřít se o poznatky získané na pokusných zvířatech, nižších organismech, na buněčných kulturách. Zákonitosti zde odkryté se potom aplikují na biologické děje v organismu člověka a z hlediska našeho zájmu i na poruchy vedoucí v důsledku ozáření k zdravotnímu poškození.

Už na tomto místě lze uvést příklad, který dokumentuje schůdnost a efektivnost takového teoretického, v našem případě biofyzikálního přístupu. Jedná se o vývoj odhadů dědičných následků ozáření u člověka. Analýzy provedené v polovině dvacátého století odhadovaly riziko dědičných poškození při celotělovém ozáření za srovnatelné, ne-li vyšší, než riziko vzniku zhoubných nádorů. Shromažďování a kritický rozbor nových biologických dat pokračoval dále zejména v rámci dvou nezávislých mezinárodních skupin expertů. V roce 1955 byl založen Vědecký výbor Spojených národů pro účinky atomového záření (United Nations Scientific Committee on the Effects of Ionizing Radiation – UNSCEAR) a v téže době obnovila svou činnost již ve třicátých letech založená Mezinárodní komise radiologické ochrany (International Commission on Radiological Protection – ICRP). V roce 1991 se promítly výsledky těchto analytických prací do hodnocení rizika dědičných poruch v dokumentu ICRP60. V té době už byly známy závěry z dlouhodobého pozorování potomků obětí jaderného bombardování japonských měst, které statisticky neprokázaly genetické poškození dětí narozených dříve ozářeným rodičům. Tento negativní nálezný je ve shodě s výsledky jiných humánních šetření, neznamená ovšem vyloučení genetických následků, neboť nálezy u zvířat v experimentech svědčí o možnosti dědičných poruch. Kvantitativní parametry nalezené u zvířat bylo možno použít za určitých předpokladů k odhadu rizika u člověka. V ICRP 60 činil tento odhad 100 případů na 10 000 osob, z nichž každá je ozářena individuální dávkou jednoho sievertu (Sv). Toto číslo představovalo asi 18 % zdravotní újmy očekávané za stejných podmínek ozáření. Zajímavý je však vývoj odhadů rizika v dalších 15 letech. V roce 2001 vydal zmíněný UNSCEAR novou zásadní zprávu o dědičných účincích ozáření, která vede k podstatně nižším hodnotám dědičného rizika. Na 10 000 osob ozářených po 1 Sv činí dnešní odhad 20 případů poškození, což odpovídá asi 3 až

\* stanislav.klener@sujb.cz

4 % celkové zdravotní újmy, na které se podílejí převážně nádorová onemocnění. Je třeba zdůraznit, že změna není výsledkem jakéhosi mechanického vyprecizování křivky dávky účinek cestou opakování dřívějších pokusů, ale o důsledky zohlednění nových poznatků týkajících se například genetických komponent chronických onemocnění a smrtnostimultigénových poruch, poznatků molekulární genetiky, metabolických regulací aj. Je to významnou ilustrací toho, že pokrok v otázce vztahu dávky a účinku – a to se pochopitelně týká i tzv. problematiky malých dávek – nespočívá jen v pátrání po nových výsledcích populačních studií, ale i v dalších objevech molekulárně biologických a biofyzikálních.

#### ZÁKLADNÍ TYPY VZTAHU DÁVKY A ÚČINKU, ÚČINKY DETERMINISTICKÉ A STOCHASTICKÉ

---

Vraťme se nyní po této odbočce k hlavní linii výkladu. Ukázali jsme, že těžištěm našeho zájmu je funkční vztah mezi dávkou a účinkem. Představíme-li nějaké experimentální uspořádání ke sledování tohoto vztahu, musí se nejprve objasnit, co myslíme dávkou a jaký účinek za jakých podmínek budeme sledovat. Původní veličina dávka vyjádřená jednotkou  $J \cdot kg^{-1}$  se zvláštním názvem gray (Gy) je definována v bodě terčového tělesa. Tato veličina však není pro všechny situace biologických pozorování vhodná, a proto postupně vznikla celá rodina veličin od dávky odvozených, od průměrné dávky v orgánu a tkáni a ekvivalentní dávky až k efektivní dávce vyjádřené zvláštní jednotkou sievert (Sv). Někdy je třeba přesně charakterizovat geometrii ozáření objektu, jindy časový faktor buď jako dávkový příkon nebo dávkový úvazek ve vymezeném časovém intervalu. Také na straně sledovaného účinku existuje široké spektrum alternativ, jak pokud jde o volbu pokusného biologického systému, tak o přesné stanovení kritéria účinku. Těchto několik poznámek by mělo jednak ukázat, že nelze mluvit jedním dechem o nějaké univerzální křivce vztahu dávky a účinku, a jednak, že interpretace jedné křivky bude tím zasvěcenější, čím více dalších křivek získaných v jiných uspořádáních umíme s interpretovanou křivkou konfrontovat.

Po tomto načrtnutí širšího rámce problematiky dávky a účinku je namístě rekapitulovat dvě známé křivky o vztahu dávky a zdravotních účinku u člověka a blíže je komentovat. Je užitečné nejprve schematicky popsat buněčný podklad patologických projevů. Zjednodušeně si lze představit, že primární změny na nitrobuněčných strukturách, především DNA, vedou ke dvěma možným důsledkům v buněčných populacích, z nichž se skládají tkáně a orgány těla. Buď jsou změny tak hrubé, že buňka není schopna dalšího dělení a celkový počet buněk v tkáni klesá, takže tkáň není schopna plnit svou funkci. Druhým případem je změna genetické informace v jádře buňky, tj. určitá buněčná atypie, která však nebrání dalšímu dělení buňky a přenosu atypie na potomstvo. K projevům prvního typu je třeba vyšší dávky záření, následky jsou bezprostřední a mohou vést k časně smrti. Druhý typ změn ohrožuje nositele vznikem zhoubného nádoru nebo s menší pravděpodobností zplozením potomka se zděděnou poruchou.

Pro správné pochopení obou typů vztahů je třeba si pamatovat, že kritériem zdravotního účinku je klinicky zjištěná porucha zdraví, tedy skutečné onemocnění, nikoli jen nějaká laboratorně nebo jinak zjištěná odchylka, která ovšem může onemocnění provázet. Na horizontální ose se vyznačuje dávka, na svislé ose pravděpodobnost postižení.

V prvním případě se onemocnění dostaví až po dosažení určité prahové dávky, kdy buněčné ztráty dosáhnou takového stupně, že nejsou zbývající tkáně funkčně kompenzovány. Při celotělovém ozáření je důsledkem akutní nemoc z ozáření, při lokalizovaném ozáření například zánět kůže. Tyto **účinky** se nazývají **deterministické**, neboť po dosažení určité dávky nastávají ve 100 % případech, tedy zákonitě, deterministicky. Vzhledem k existenci dávkového prahu při malých dávkách – pod jeho úrovní – deterministické účinky nenastávají. Otázka zvláštního významu malých dávek zde není tedy namístě.

V druhém případě atypie buněčných změn se přenáší na buněčné potomstvo a může zvyšovat pravděpodobnost výskytu dvou kategorií chorobných jevů, s nimiž se setkáváme jako se spontánními – na záření nezávislémi – projevy v každé lidské populaci, tj. nádorů a vrozených odchylek. Statistická povaha této indukce chorobných změn dala název této skupině poruch – **poruchy stochastické**. Z charakteru těchto poruch vyplývá, že průkaz o vlivu záření vyžaduje šetření na velkých skupinách. Pro experimentální body v oblasti zlomků Sv neodporuje jejich poloha zpravidla předpokladu linearity, tedy přímé úměrnosti výskytu jevu vzhledem k dávce. Co však říci o oblasti směrem k nižším dávkám, pro níž už žádné experimentální body nejsou k dispozici?

Ze statistických důvodů je zřejmé, že při klesajících dávkách by musela neproporcionálně růst velikost populace zahrnuté do šetření, aby se prokázal významný rozdíl sledovaného jevu proti očekávané spontánní frekvenci. Tak by při určitých dávkách nemohlo být riziko vůbec prokázáno, i kdyby reálně existovalo.

### HYPOTÉZA LINEARITY A BEZPRAHOVOSTI – LNT

---

Řada experimentálních přímků konstruovaných uvedeným postupem navozuje možnou extrapolaci přímky, platné pro vyšší dávky, k počátku souřadnic. Odtud je už jen krok k tomu, aby se hypotéza linearity rozšířila na hypotézu bezprahového lineárního vztahu mezi dávkou a účinkem (linear non-threshold hypothesis – LNT). Protože však pro bezprahový vztah nejsou přímé důkazy, je zde otevřena cesta ke spekulaci, zda linearita skutečné riziko nepřeceňuje, nebo co je významnější – zda skutečné riziko není linearitou podceňováno. Tato neurčitost nemusí radiobiologa nijak zneklidňovat, lze právem očekávat, že další výzkum bude tuto neurčitost dále upřesňovat – jak je tomu analogicky v jiných vědních oborech. Důsledky pro regulaci ozáření lidí jsou však významné, a tak se vynořuje problematika malých dávek jako otázka ne tolik radiobiologická, jako otázka managementu rizika a posléze jako otázka politická. O odpověď se zajímají ekologická hnutí, ale věcně je odpověď významná i pro provozovatele jaderných zařízení a regulační orgány. Přitom obě tyto zainteresované strany upínají svou pozornost na odlišné možné důsledky výše zmíněné neurčitosti. Protijaderná hnutí se odvolávají na možné podceňování skutečného rizika předpokladem linearity v oblasti nejnižších dávek. Uvítali by, kdyby další výzkum potvrdil a zobecnil dosud ojedinělá pozorování nevylučující možné podceňování linearitou. Na druhé straně protagonisté jaderné energetiky, čelící argumentům založeným na sčítání dávek z výpustí na úrovni nanosievertů, by měli svou úlohu podstatně usnadněnou, kdyby se prokázala existence prahové dávky, byť i na úrovni velmi nízké, například milisievertu či jeho zlomku.

### CO TO JSOU MALÉ DÁVKY?

---

Tím jsme se dostali k vlastnímu tématu – malým dávkám. Co jsou to vlastně malé dávky, jak je definovat? Před léty byl formulován názor kvantitativně nepřesný, ale biologicky celkem výstižný. Velké dávky jsou ty, které způsobují účinky deterministické, o malých se mluví v souvislosti s účinky stochastickými.

Praxe si však vyžádala přesnější vymezení. Požadavek stanovit určité číselné hodnoty vznikl zejména v souvislosti s poznatkem, že vysoké dávkové příkony a vysoké dávky jsou spojeny s vyšším rizikem také stochastických změn a že kvantitativní ukazatele (koeficienty rizika) získané za podmínek vysokých dávkových příkonů je třeba korigovat pro aplikaci na nízké dávkové příkony. Korekční faktor DDREF – dose and dose rate effectiveness factor – byl konvenčně stanoven na hodnotu 2, tj. vysoké dávky jsou dvojnásobně účinnější. Bylo potom třeba určit na jaké dávky a dávkové příkony se bude korekce vztahovat. Zpráva UN-

SCEAR 1993 uvádí pro tento účel jednorázovou dávku nad 200 mGy, nebo dávkový příkon nad  $0,006 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$  řídké ionizujícího záření, nebo 50 mSv hustě ionizujícího záření.

Nověji je uvedena kvantitativní hranice ve zprávě BEIR VII k problematice malých dávek z roku 2005. Je to zpráva skupiny expertů Akademie věd USA užívající označení Biological Effects of Ionizing Radiation. Ta stanovuje hodnoty výhradně pro záření s nízkým LET, a to tak, že malým dávkám přisuzuje interval od oblasti kolem nuly do přibližné hodnoty 100 mSv.

V dokumentu ICRP 2004 o nízkých dávkách (viz také níže) je projevuje zájem zejména o dávky pod úrovní ročních limitů pro radiační pracovníky (20 mSv) a obyvatelstvo (1 mSv). V rámci dokumentu se jednotlivé úrovně dávek označují sestupně v pořadí 1 Sv, 100 mSv, 10 mSv, 1 mSv, 0,1 mSv jako mírně vysoké (moderately high), mírné (moderate), nízké, velmi nízké a extrémně nízké.

#### PŘEHLED LITERÁRNÍCH PRAMENŮ Z POSLEDNÍHO OBDOBÍ.

---

Zmínka o dokumentu BEIR VII otvírá otázku, zda a jak se ve světové literatuře věnuje otázce malých dávek pozornost. Nejde zde o přehled původních experimentálních prací, ale spíše o souhrny, které původní práce relevantní pro otázky malých dávek citují, interpretují a komentují. Z časopiseckých publikací stojí za zmínku například příspěvek prof. J. Kiefera a spol. z roku 2004 v časopisu *Strahlenbiologie* (č. 2/2004, 3–11), nebo studie R. J. Prestona z roku 2005 v prestižním *Health Physics* (Vol.88, 545–556). Zvláštní význam mají souhrnné dokumenty, které jsou výsledkem soustavné práce skupiny expertů. Shodou okolností právě v současné době se dopracovávají dva dokumenty celosvětového významu a jsou již dostupné jejich předběžné verze. Jedním z nich je citovaný dokument BEIR VII s názvem *Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation*, jehož prepublikace má několik set stran. Také Mezinárodní komise radiologické ochrany ICRP ustavila pracovní skupinu k této otázce a jejím výsledkem je zatím pokročilá fáze konceptu z prosince roku 2004 s názvem *Low-dose Extrapolation of Radiation-Related Cancer Risk*.

#### NOVÉ POZNATKY Z BIOFYZIKÁLNÍCH STUDIÍ

---

Všechny zájemce o problematiku malých dávek zajímá, co nového tyto dokumenty přinesly a k jakým perspektivám ukazují. Než odpovíme na tyto otázky, je účelné prezentovat osnovu posledně uvedeného dokumentu (ICRP 2004) a na ní ukázat, jaké jsou cesty postupu vpřed.

Jednou cestou je další pokračování v epidemiologických studiích, tj. vyhledávání dalších nadměrně exponovaných skupin vhodných k zahájení studie, sběr dat a jejich analýza, interpretace a zobecnění. Tento směr je pokryt kapitolou 2 a 5 a bude o něm pojednáno samostatně. Druhou cestou je analýza biofyzikálních dat, tj. využití experimentů na úrovni zejména buněčné a molekulární. V dalším se pokusíme o stručný komentář k těmto radiobiologickým přístupům popsaným v kapitole 3 a 4. Konečně kapitola 6 obsahuje náročný matematický rozbor důsledků neurčitosti.

Mezi základními mechanismy poškození buněk jsou na prvním místě významné úplné zlomy dvojvlákna deoxyribonukleové kyseliny DNA, menší význam mají jednoduché zlomy (jediného vlákna) a změny dílčích složek DNA, např. poškození dusíkatých bází. Novější výzkumy přispěly k otázce, zda se liší typy poškození DNA způsobené běžnými faktory, např. reaktivními oxidanty, a ionizujícím zářením. Rozdíl je zřetelný a spočívá v tom, že se po ozáření objevují *především shluky zlomů DNA, popřípadě chybně opravených zlomů*, které nemají obdoby u běžně se vyskytujících narušení genetického aparátu. Další oblastí nových poznatků je objevení mechanismů, jimiž se v buňkách *identifikuje přítomnost poškození*, a dále



mechanismů, jimiž se realizuje *přenos signálu o poškození k efektorovým strukturám*. Jde o bílkovinné působky, které jsou produktem příslušných genů. Jsou získány mnohé detailní poznatky o mechanismech a biochemii těchto regulací. Smyslem dějů, které se potom odehrávají, je na jedné straně *zajistit přežití buněk, jejichž poškození bylo opraveno*, takže nehrozí z původního genetického poškození buňky žádné nebezpečí do budoucna. Nedokáže-li buňka poškození opravit, potom je třeba takovou *buňku z organismu vyřadit* zpravidla procesem zvaným apoptóza, což je jakýsi regulovaný – naprogramovaný – zánik buňky („sebevražda buňky“). Tímto očištným procesem je zajištěna v buňce *genomická rovnováha*.

Další nové poznatky, a to velmi významné pro otázku nízkých dávek, jsou poznatky týkající se důsledku těchto změn v buněčných populacích. Dosud existující základní představa o účincích ozáření spočívala v tom, že odezva na ozáření vychází jen z přímo zasažených buněk, ve kterých se energie ionizační deponovala. Nyní se studují zejména dva nové možné mechanismy odezvy, které ukazují, že i v buňkách přímo nezasažených se v návaznosti na ozáření projevují analogická poškození. Je o tzv. „*bystander efekt*“ (*efekt pozorovatele*), spočívající v tom, že i v buňkách v okolí zasaženého elementu lze příslušnými postupy dokázat přítomnost poruch. Druhý fenomén ukazuje, že vedle tohoto prostorového faktoru se mohou změny v neozářených buňkách objevit v závislosti na časovém faktoru – v příštích generacích. Jde o efekt *genomové nestability*. Oba tyto fenomény se v laboratorních pokusech podrobně studují, sledují se podmínky, za kterých se projevují. V důsledcích může existence těchto procesů znamenat, že některé křivky vztahy dávky a účinku získané v dřívějších pokusech podceňují odhad reálného rizika.

Jiná pozorování odkrývají „*příznivý efekt*“ malých dávek. Nejde o jev univerzální, projevuje se jen za určitých pokusných podmínek. Z možných vysvětlení je středem pozornosti především názor, že *malými dávkami jsou aktivovány reparační mechanismy* a ty pak ovlivňují konečný efekt. Do této kategorie efektů patří jednak tzv. *adaptivní odpověď*, kdy podmiňující dávka (priming dose) v úrovni 5–10 mGy způsobí po latenci asi 3–6 hodin snížený defekt útočné dávky (challenge dose) v oblasti nad 1 Gy. Společné mechanismy má snad i fenomén *hormese*, kdy malé dávky mají účinky opačného směru než dávky velké.

---

## KVANTITATIVNÍ ANALÝZA NEURČITOSTI

---

Zbývá nám ještě komentovat kapitulu o kvantitativní analýze neurčitosti a jejich důsledků. Tuto složitou problematiku lze shrnout v několika hutných větách:

Pozornost je věnována výsledné distribuci neurčitosti pro přídatné relativní riziko na 1 Gy (Excess Relative Risk – ERR/Gy) s uvážením a bez uvážení možného univerzálního prahu v oblasti malých dávek.

Hlavním zdrojem neurčitosti je statistická variabilita odhadu ERR/Gy pro populaci přežívající po atomovém bombardování – závisí na variabilitě hodnoty DDREF.

I když existence prahu v oblasti nízkých dávek pro radiogenní nádory určitých tkání se nezdá nepravděpodobná a nemůže být vyloučena pro souhrn všech nádorů, **fakta jako celek neupřednostňují existenci universálního prahu**.

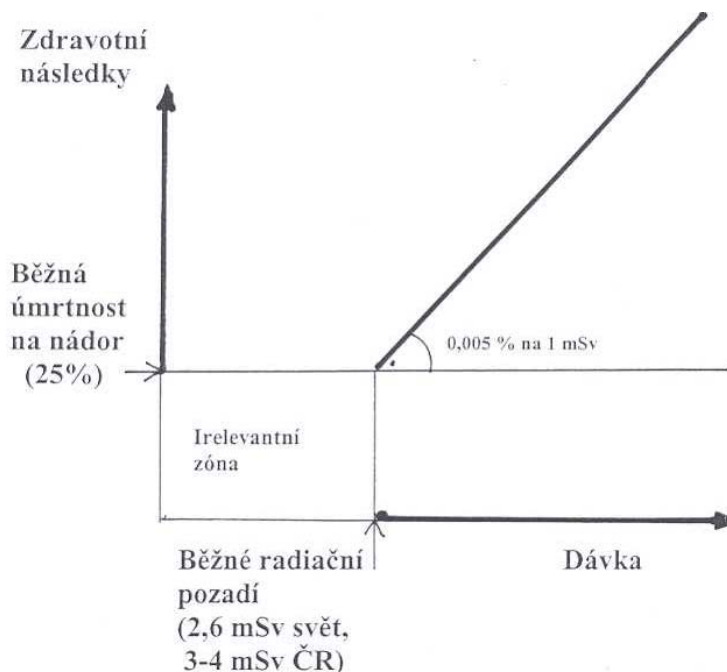
LNT hypotéza spojená s aplikací neurčité hodnoty DDREF pro extrapolaci z oblasti vysokých dávek zůstává rozumným (moudrým) základem pro radiační ochranu v oblasti malých dávek a malých dávkových příkonů.

Tímto stanoviskem je vlastně formulována část závěrů týkajících se existence či neexistence prahové dávky. Pokud jde o stanovisko k možnému podcenění reálného rizika aplikací hypotézy LNT, lze nalézt odpověď v závěrech dokumentu BEIR VII, kde se uvádí, že výsledky výzkumu ve svém celku nepotvrzují hypotézu o supralineárním odezvě v oblasti nejnižších dávek.

## PŘÍRODNÍ RADIAČNÍ POZADÍ A MALÉ DÁVKY

Blížíme se ke konci výkladu a dosud nebyla řeč o přírodním radiačním pozadí a jeho významu pro problematiku malých dávek. V této souvislosti bývá kladena řada otázek – často i kontroverzních. Jsou spontánní nádory důsledkem působení radiačního pozadí? Za jaké jejich procento přírodní pozadí odpovídá? Nebo naopak: Lze hodnotit mutagenní vliv přírodního pozadí jako příznivý díky jeho působení během sekulárního vývoje? Pomoc v hledání odpovědi na tyto otázky poskytuje graf v posledních dvou letech opakovaně prezentovaný. Ukazuje, že stochastické účinky mají svou úroveň spontánního výskytu a podobně má určitou úroveň i přírodní radiační pozadí. Lze sledovat, jak dávky nad úrovní přírodního pozadí zvyšují pravděpodobnost stochastických projevů. Pod úrovní obou pozadí lze vymezit irelevantní zónu, ve které je vlastně bezpředmětné zkoumat vztah dávky a účinku.

Takový pokus by byl vysoce spekulativní a otvíral by i filozofické otázky. Uvedený graf je dobrou pomůckou k zamyšlení, pro praktická řešení však nenabízí žádné obecně platné východisko, neboť spontánní výskyt nádorů a genetických změn i úroveň radiačního pozadí nabývají lokálně proměnlivých hodnot.



Závěrem je třeba odpovědět na otázku, co je důvodem stále aktuálního zájmu o problematiku malých dávek.

Malé dávky ionizujícího záření nejsou ani tak specifickou otázkou radiobiologickou, k odkrytí zákonitostí o jejich vlivu se přihlíží i k poznatkům z oblasti vysokých dávek. Existující mezery v poznacích a přetrvávající neurčitosti, které jsou charakterické i pro jiné vědní obory, jsou spíše výzvou k dalšímu výzkumu účinku záření.

Neexistence konečných odpovědí je však citlivou mezerou pro management rizika. Současný stav poznatků přitom nemůže zdůvodnit v praxi odklon od dosud aplikované lineární bezprahové hypotézy. Nelze potvrdit obavy některých skupin obyvatel, že malé dávky mohou způsobovat zdravotní poškození spíše vyšší, než lze odvodit z předpokladu linearity a bezprahovosti. Nelze však ani podpořit případné očekávání protagonistů jaderné energetiky, že by v dohledné době výzkumy potvrdily možnost vycházet při odhadu rizika malých dávek z existence dávkového prahu, pod jehož úrovní by žádné zdravotní poškození vůbec nehrozilo.

## Monitorování životního prostředí v okolí jaderné elektrárny Temelín pomocí bioindikátorů

Lenka Thinová\*, Tomáš Čechák\*, Jaroslav Kluson\*, Tomáš Trojek\*, *Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT v Praze*

Změny v životním prostředí probíhají přirozeně a jsou součástí nebo výsledkem mnohonásobných cyklů vzájemného působení jednotlivých složek. Mohou být však také způsobeny lidskou činností. Bez důkladného zajištění dat nejsme schopni odhadnout dlouhodobé i krátkodobé působení člověka na životní prostředí. Jenom dlouhodobým sledováním můžeme získat podrobnou znalost o jeho stavu a kontrolovat lidskou činnost. Současná úroveň vědy umožňuje kvalitní sledování parametrů životního prostředí od mikrosvětla po makrosvět. Nemalou úlohu ve vyhodnocování dat hraje statistika. Často není možné sledovat dané ukazatele v čase nepřetržitě, použijeme tedy interpolaci a extrapolaci dat.

Monitorování depozice radionuklidů v životním prostředí se často provádí pomocí bioindikátorů. Při biomonitorování se využívá ekologického principu, kdy změna kvality prostředí se projeví změnou kvality bioindikátoru. Biologickým indikátorem může být celý živý organismus, jeho části, jeho neživé části (kůra stromů, opadané listy) nebo přeměněná organická hmota.

Při sledování změn kvality složek životního prostředí se používané biomonitorovací techniky dělí následujícím způsobem:

- podle reakce bioindikátoru k faktoru prostředí  
citlivé (sensitivní) bioindikátory, odolné kumulativní bioindikátory
- podle ovlivňování faktoru prostředí bioindikátorem  
aktivní bioindikátory, pasivní bioindikátory
- podle přímého nebo zprostředkovaného vlivu na životní prostředí  
primární biomonitor, sekundární biomonitor
- podle stupně standardizace expozice bioindikátorů  
pasivní biomonitoring, aktivní biomonitoring

Chceme-li např. sledovat vliv jaderné elektrárny na životní prostředí, resp. nárůst radioaktivity v okolí elektrárny vlivem jejího provozu, je nezbytné vycházet z nulového stavu a zvolený bioindikátor(y) sledovat již před spuštěním elektrárny. Porovnání výsledků z následujících let by pak mělo ukázat, zda provoz jaderné elektrárny nevede k významnému zvýšení obsahu umělých radionuklidů v námi sledované části životního prostředí. Dále vybereme takový bioindikátor, u kterého je možné prokázat právě roční přírůstek. Kritériem při výběru může být ingesce bioindikátoru, neboť jeho proměření je možné stanovit případné vnitřní ozáření obyvatelstva.

K monitorování okolí Jaderné elektrárny Temelín (dále JETE) byly vybrány tyto bioindikátory: lesní humus, borová kůra, mech (Trávník Schreberův), hřib hnědý a lesní plody (borůvky, maliny, ostružiny). Odběr vzorků se provádí dvakrát ročně, u sezónních vzorků v době jejich vegetačního maxima [1]. Monitorované území obsahuje 29 odběrových míst situovaných na 8 profilech paprskovitě se rozbíhajících z místa JETE do vzdálenosti 20 km (měřicí body jsou vzdáleny 2 km, 5 km, 10 km a 20 km od elektrárny, vzdálenost 20 km je považována za srovnávací). Každoročně je odebráno kolem 220 vzorků.

Při prokazování významného úniku radionuklidů do životního prostředí uvažujeme dva modelové příklady. **Za prvé** je to možnost výrazného jednorázového úniku radionuklidů, ke kterému by mohl dojít při nehodě v jaderné elektrárně. Takováto událost by se při námi prováděných měřeních projevila zvýšením aktivit štěpných a aktivačních produktů v odebíraných vzorcích, kromě  $^{137}\text{Cs}$  by se ve vzorcích objevily také radionuklidy s kratším poločasem přeměny

\* thinova@fjfi.cvut.cz, cechak@fjfi.cvut.cz, kluson@fjfi.cvut.cz, trojek@fjfi.cvut.cz

(z ekologicky významných například  $^{131}\text{J}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ , resp.  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ). **Druhým** uvažovaným případem je kontinuální únik během běžného provozu, který by mohl vést k postupnému růstu aktivity radionuklidů v jednotlivých složkách životního prostředí, což by zvýšilo jejich obsah také v námi odebíraných vzorcích. Nárůst aktivity by se týkal radionuklidů vznikajících při jaderných reakcích v jaderném reaktoru, tj. hlavně aktivačních produktů.

Ke stanovení přítomnosti radionuklidů a jejich měrné aktivity ve vzorcích byla zvolena metoda gama-spektrometrie. Gama-spektrometrická analýza umožňuje stanovit přítomnost celé řady přirozených a umělých radionuklidů, emitujících záření gama ve vzorcích, s velmi dobrou citlivostí. Je to nedestruktivní metoda, vyžadující poměrně jednoduchou přípravu vzorků (vysušení, slisování, pomletí atd.). Je založena na úměrnosti mezi plochou píku stanoveného radionuklidu v měřeném spektru a jeho měrnou aktivitou. Pro ideální případ aktivity  $A$  bodového zdroje platí:

$$A = \frac{P_E}{t \cdot Y_E \cdot \eta},$$

kde  $P_E$  je plocha píku,  $t$  je doba měření,  $Y_E$  je výtěžek fotonů o energii  $E$ ,  $\eta$  je účinnost detektoru [2].

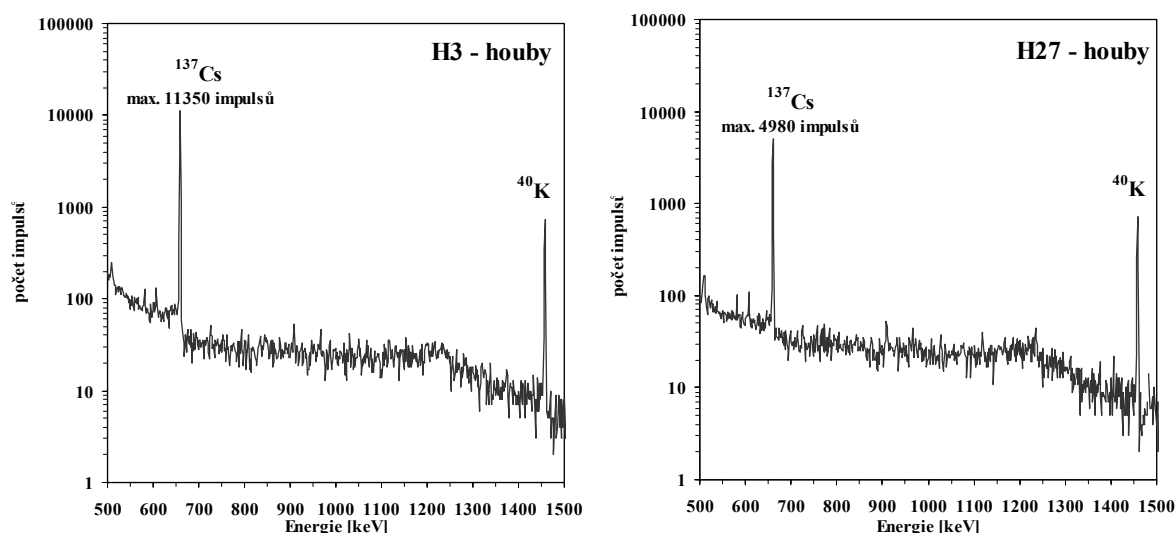
K detekci záření gama pro stanovení měrné aktivity radionuklidů se dnes používají výhradně polovodičové detektory. Pro měření byl použit koaxiální HPGE detektor se vzorky v geometrii tzv. Marinelliho nádoby. V této geometrii je měřený materiál uzavřen v Marinelliho nádobě o objemu 0,5 l, která obklopuje detektor. Tím je zajištěna maximální geometrická účinnost. Pro stanovení závislosti detekční účinnosti pro jednotlivé energie záření gama se využívá radionuklid  $^{152}\text{Eu}$  nebo směs několika radionuklidů. Elektronický řetězec umožňující zpracovat impulsy z detektoru se skládá z předzesilovače s chlazeným FET tranzistorem, lineárního spektroskopického zesilovače, mnohokanálového analyzátoru, počítače na záznam a zpracování naměřených spekter a napájecích obvodů. Jednotlivé díly laboratorních spektrometrů se v současné době dodávají i jako karty do počítače, což zvyšuje kompaktnost celého systému.

Zvláštní pozornost při měření nízkých měrných aktivit je třeba věnovat stínění detektoru. Je nutno maximálně odstínit jednak kosmické záření, jednak záření z konstrukčních materiálů a stěn laboratoře. Ke stínění se používají materiály s co nejvyšším protonovým číslem, důležitá je i izotopová čistota stínících materiálů. Z těchto důvodů se někdy používá místo olova, obsahujícího  $^{210}\text{Pb}$  a jeho dceřiný produkt  $^{210}\text{Bi}$ , železo. I to však může být znečištěno některými umělými radionuklidy, například  $^{60}\text{Co}$  nebo  $^{137}\text{Cs}$ . Použití starých materiálů, např. železa z pancéřování bitevních lodí z 1. světové války, je samozřejmě extrémně drahé. Olověné stínění je vhodné vyložit materiálem, který by absorboval charakteristické záření vybuzené ve vnitřních stěnách stínění kosmickým zářením nebo zářením radionuklidů obsažených v měřeném vzorku. K tomuto účelu se používá kadmia a mědi.

Pro stanovení měrné aktivity měřených radionuklidů je velmi důležité i zpracování získaných spekter. Je nutné identifikovat píky ve spektru, rozdělit multiplety, odečíst pozadí, přiřadit nalezené píky jednotlivým radionuklidům a vypočítat čistou plochu píku. V současné době se používá několik komerčních programů dodávaných často spolu se spektrometrickým systémem.



**Obr. 1 Měřicí sestava – vkládání vzorku do stínění**



**Obr. 2 Energetická spektra gama záření dvou vzorků sušených hub s různými měrnými aktivitami  $^{137}\text{Cs}$**

Zpracováním naměřených spekter roční sady vzorků získáme hodnoty měrných aktivit  $^{137}\text{Cs}$  v  $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Výskyt  $^{137}\text{Cs}$  lze spojit s testy jaderných zbraní prováděnými v atmosféře v 50. letech a s havárií jaderné elektrárny Černobyl v roce 1986. Ačkoliv k těmto událostem došlo dávno,  $^{137}\text{Cs}$  se v důsledku dlouhého poločasu přeměny (30 let) zachovalo v místech, kde došlo k jeho spadu, do dnešní doby. Ostatní prokázané radionuklidy jsou přírodního původu a jejich přítomnost nesouvisí s lidskou činností.

Zda došlo k významnému zvýšení měrné aktivity, resp. aktivit v jednotlivých bodech sledovaného území, posuzujeme pomocí trendové analýzy [3]. Budeme-li se snažit prokázat významný kontinuální únik radionuklidů, budeme předpokládat, že tento únik je co do velikosti časově neměnný a povede k růstu aktivity přímo úměrnému době provozu elektrárny. V takovém případě budou aktivity  $^{137}\text{Cs}$  daných vzorků, odebraných na jednom místě v různých letech, proloženy přímkou. K prokázání nárůstu aktivity musí nabývat směrnice přímky dostatečné hodnoty vzhledem k nejistotě stanovení této hodnoty. Nejistota směrnice přímky, stejně tak jako nejistoty samotných aktivit, mohou být poměrně značné, neboť se jedná o vzorky životního prostředí, jejichž vlastnosti mohou výrazně záviset například na místě, době a způsobu odběru. Ačkoliv byla odběrům vzorků věnována značná pozornost, zdroje nejistot se nedají nikdy zcela odstranit, neboť se jedná o přírodní materiál, měnící některé své vlastnosti spolu s vývojem celého biotopu, v našem případě lesních kultur. Nejistoty stanovení aktivity vzorků metodou spektrometrie gama jsou vůči nejistotám odběru a přípravy vzorků zanedbatelné.

Hodnoty aktivit z různých let jsou proloženy přímkou metodou nejmenších čtverců:

$$A_m = a_0 + a_1 \cdot t. \quad (1)$$

Vzorec (1) popisuje lineární nárůst, resp. pokles hmotnostní aktivity  $A_m$  u vybraného druhu vzorku a dané lokality v závislosti na čase ( $t$ ). Jelikož odběry vzorků se provádějí ročně, čas  $t$  bude udán rokem odběru. Nárůst hmotnostní aktivity za jeden rok vyjadřuje konstanta  $a_1$ .

Jelikož směrnice přímky  $a_1$  je náhodnou veličinou, neboť byla vypočtena z naměřených aktivit, nárůst aktivity vyjádřený touto směrnicí se bude lišit od skutečné hodnoty nárůstu aktivity, která je neznámá. Nárůst aktivity lze proto vyjádřit pouze pomocí konstanty  $a_1$  a její nejistoty  $s_{a_1}$  vypočtené z porovnání naměřených aktivit a prokladu těchto hodnot přímkou.

Čím více se liší naměřené body od přímky, tím větší bude hodnota nejistoty  $s_{a_1}$ . Směrnici přímky  $a_1$  a její nejistotu lze vypočítat z naměřených aktivit na základě teorie trendové analýzy.

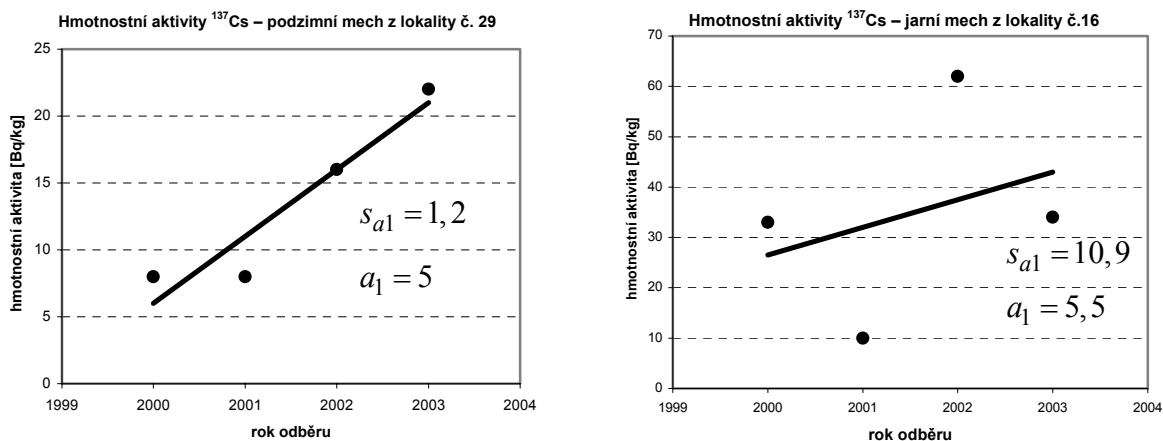
$$a_1 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n t_i \cdot A_i - \left( \sum_{i=1}^n t_i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^n A_i \right)}{n \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)^2} \quad (2)$$

$$s^2 = \frac{1}{n \cdot (n-2)} \cdot \left\{ n \cdot \sum_{i=1}^n A_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n A_i \right)^2 \cdot \frac{\left[ n \cdot \sum_{i=1}^n t_i \cdot A_i - \left( \sum_{i=1}^n t_i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^n A_i \right) \right]^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)^2} \right\} \quad (3)$$

$$s_{a_1} = \sqrt{\frac{n \cdot s^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)^2}} \quad (4)$$

Ve vzorcích (2), (3) a (4) vyjadřuje  $n$  počet měření,  $t_i$  je rok odběru vzorku a  $A_i$  je jeho hmotnostní aktivita.

K prokázání růstu musí být hodnota směrnice přímky dostatečně velká vůči její nejistotě. Velikost nejistoty směrnice charakterizuje, jak blízko prochází přímka od prokládaných naměřených hodnot. Pokud jsou vzdálenosti velké, je velká i nejistota, přímka nevhodně popisuje naměřené aktivity, a proto i prokazování růstu aktivity je obtížnější. Jako příklad mohou posloužit výsledky analýzy mečů zobrazené na obrázcích (3) a (4). Jak je z obrázků patrné, roční



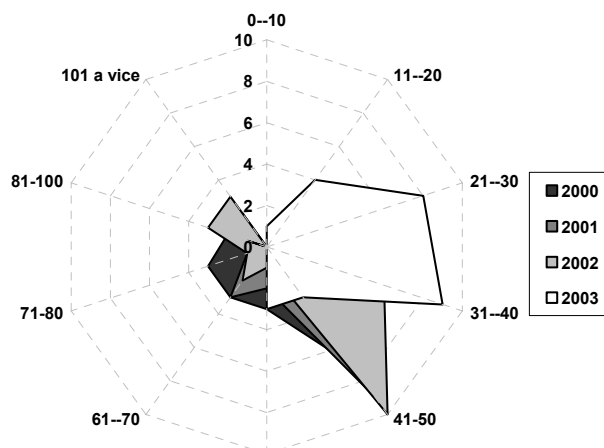
**Obr. 3 a 4 Hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  mechu ze dvou různých lokalit**

nárůst hmotnostních aktivit je v obou případech přibližně stejný (konkrétně  $5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$  u podzimního mechu z lokality č. 29 a  $5,5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$  u jarního mechu z lokality č. 16). Ačkoliv jsou roční nárůsty aktivit v obou případech přibližně stejné, u jarního mechu z místa 16 je nárůst jen těžko prokazatelný na rozdíl od podzimního mechu z lokality č. 29. Nejistota směrnice přímky ( $s_{a_1}$ ) tuto skutečnost dobře vystihuje.

Z matematického hlediska se jedná o testování statistických hypotéz. Náš test bude postaven na hypotéze, že hmotnostní aktivita  $^{137}\text{Cs}$  je konstantní (směrnice přímky je rovna 0). Tato hypotéza se bude testovat s alternativní hypotézou předpokládající nárůst aktivity (směrnice přímky je větší než 0). Základem pro přijetí nebo zamítnutí hypotézy bude poměr hodnoty směrnice prokládané přímky a její nejistoty. Podle teorie distribučních funkcí podléhá směrnice přímky  $a_1$  normálnímu rozdělení,  $s_{a_1}$  má rozdělení  $\chi^2$  a jejich poměr je popsán Studentovým rozdělením. Použijí-li se 4 naměřené hodnoty hmotnostních aktivit, bude se konkrétně jednat o Studentovo rozdělení se 2 stupni volnosti. Aby nebyla hypotéza o nulovém nárůstu hmotnostních aktivit statistickým testem pro zvolený interval spolehlivosti zamítnuta, nesmí poměr směrnice přímky a jejího nejistoty překročit příslušnou hodnotu Studentova rozdělení. Konkrétně pro Studentovo rozdělení o dvou stupních volnosti a 95% interval spolehlivosti musí pro nezamítnutí hypotézy platit:

$$\frac{a_1}{s_{a_1}} \leq 2,9. \quad (5)$$

Jak bylo zjištěno, měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  ve vzorcích mohou být také ovlivněny extrémními změnami klimatu. Z obr. 5 (četnostní graf) je zřejmý pokles měřených hodnot v roce 2003, který byl extrémně suchý.

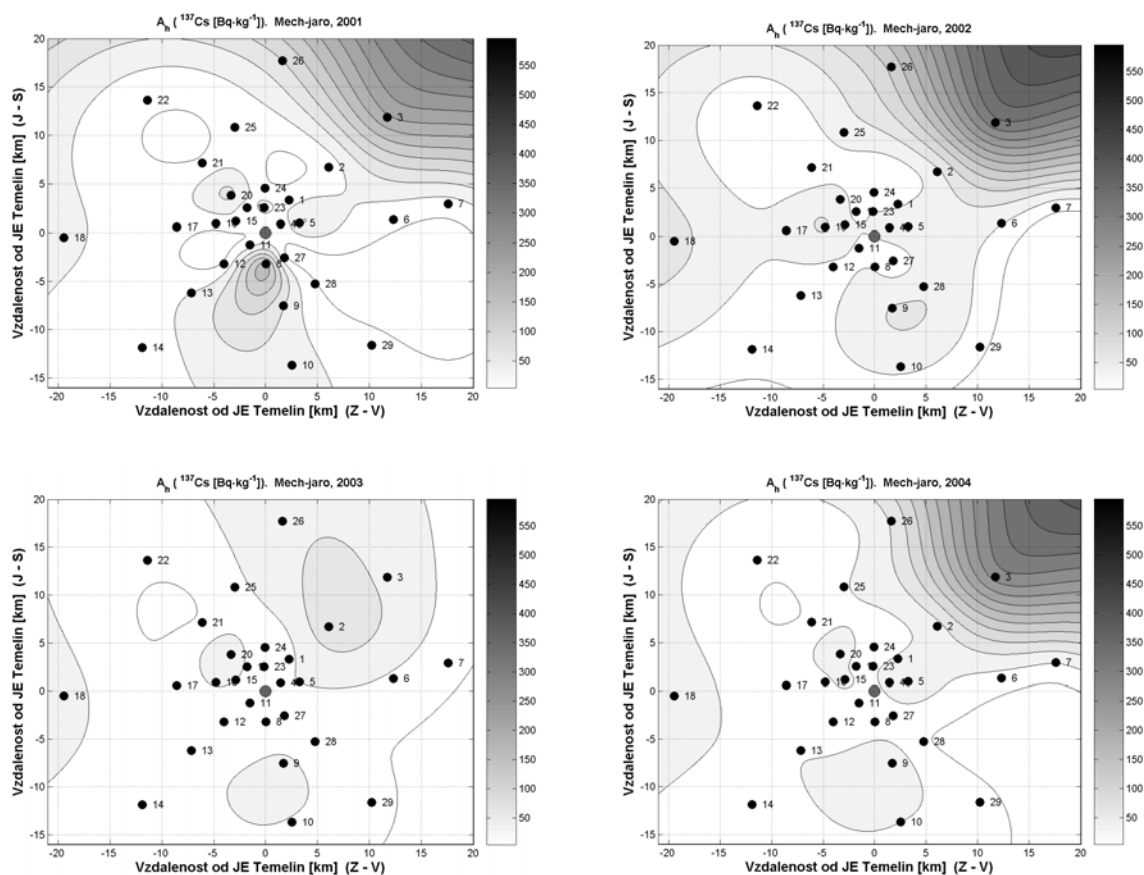


**Obr. 5 Četnosti měrných aktivit  $^{137}\text{Cs}$  ve vzorcích kůry z roku 2003, jarní odběr**

Naměřené hodnoty měrných aktivit  $^{137}\text{Cs}$  je možné použít např. pro konstrukci map izolinií, které také poměrně přehledně umožňují sledovat vývoj obsahů  $^{137}\text{Cs}$  v jednotlivých letech ve všech typech vzorků. Ukázka takových map následuje jako obr. 6 (také zde se projevilo extrémní sucho v roce 2003).

Kromě odběru vzorků probíhá v okolí JETE také gama-spektrometrické měření in situ. Cílem měření je stanovit dozimetrické a spektrometrické charakteristiky fotonových polí (tj. stanovení referenčního pozadí) v 15 vybraných bodech sítě referenčních bodů zvolených v okolí JETE pro biomonitoring a monitorování vlivů provozu JETE na životní prostředí. První série měření byla provedena ve dnech 11.–12. 7. 2000 v rámci předprovozního monitorování, další následuje vždy po dvou letech, dosud proběhlo v letech 2002 a 2004. Byly zvoleny dvě metodiky a provedeny odpovídající dva typy měření:

- stanovení příkonu kermu ve vzduchu (přímým měřením a výpočtem ze spektrometrických dat),
- měření fotonových spekter scintilačním spektrometrem.



**Obr. 6** Jedna z aplikací laboratorní spektrometrie gama: měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  v  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  (Trávník Schreberův, podzemní odběry v letech 2001, 2002, 2003, 2004)

Všechna měření byla provedena v referenční výšce 1 metr nad povrchem terénu. Tato metodika umožňuje citlivě identifikovat jednotlivé kontaminanty a jejich příspěvky/zastoupení (resp. změny těchto příspěvků/zastoupení), a to i v rámci běžných fluktuací normálního přírodního pozadí.

Naměřená spektra představují charakteristická spektra přírodního pozadí. Ve vypočtených energetických distribucích příkonu kermy ve vzduchu nelze identifikovat (s výjimkou již diskutovaného  $^{137}\text{Cs}$ ) významnější příspěvek žádného umělého radionuklidu.

#### LITERATURA:

- [1] Suchara I., Sucharová J.: *Výzkumná zpráva „Biomonitoring atmosférické depozice radionuklidů pomocí analýzy mechu, humusu a borové kůry*. VUOZ Praha 1999.
- [2] Gilmore G., Hemingway J.: *Practical Gamma ray Spectrometry*. John Wiley and Sons, Chichester 1995.
- [3] Čechák T., Gerndt J., Klusoň J., Thinová L., Trojek T.: *Biomonitoring atmosférické depozice radionuklidů v okolí Jaderné elektrárny Temelín v roce 2003*. Závěrečná zpráva ČVUT, Praha 2003.



## Bezpečnost Jaderné elektrárny Temelín se týká také odpadů

Radek Trtílek\*, Petr Zapletal\*, ALLDECO.CZ, a.s.

### JAK VZNIKÁ RADIOAKTIVNÍ ODPAD

Při většině lidských činností vznikají odpady. Nejinak je tomu i při výrobě elektrické energie. Je-li takovým podnikem elektrárna jaderná, přidružují se k běžným odpadům, které vznikají v neaktivních provozech elektrárny, odpady radioaktivní (RAO).

Čím se liší radioaktivní odpady od jiných každému běžně známých odpadů? Jde o takové látky, předměty nebo zařízení, pro něž se nepředpokládá další využití a které obsahují radionuklidy nebo jsou jimi kontaminované. Obecně řečeno jsou to tedy takové věci, které přestaly sloužit svému účelu a které se dostaly či mohly dostat do kontaktu s radioaktivními látkami.

Jak takové radioaktivní odpady vznikají? Místem vzniku radionuklidů v jaderné elektrárně je palivo a neutronový tok v reaktoru. Do technologických okruhů a do technologického prostředí se dostávají ze čtyř zdrojů:

- netěsnost paliva při vysoké teplotě,
- znečištění vnějšího povrchu palivem při výrobě s následnou aktivací tohoto znečištění,
- produkty aktivace chladiva,
- produkty aktivace konstrukčních materiálů a korozních produktů.

Zatímco první tři zdroje jsou pro kontaminaci odpadů relativně nevýznamné (vysoká integrita palivových článků, požadavky na jejich čistotu a udržování chemické i mechanické čistoty chladiva primárního okruhu), poslední zdroj má na následnou kontaminaci odpadů nejvyšší podíl. Takto vzniklé radionuklidy jsou zdrojem kontaminace technologických celků, materiálů či samotných odpadů.

Odpady zpravidla vznikají na místech, kde se kontaminace koncentruje, což je v čistících a filtračních stanicích, v prádelně, laboratořích, umývárkách a podobně. Podstatná část radioaktivních odpadů vzniká při dekontaminačních pracích spojených s odstraňováním kontaminace z různých technologických celků a zařízení při jejich údržbě.

Za samostatnou zvláštní kategorii RAO pokládáme vyhořelé nebo ozářené jaderné palivo, které není podle platné legislativy považováno za odpad, pokud je za něj jeho vlastník nebo Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB) neprohlásí. Zjednodušeně lze říci, že i vyhořelé palivo zůstává bohatým energetickým a surovinovým zdrojem. Proto také v běžné provozní praxi palivo za odpad nepovažujeme.

Z praktického technologického hlediska členíme radioaktivní odpady podle jejich skupenství na plynné, kapalné a pevné.

**Kapalné a plynné RAO** jsou vázány na technologické systémy a také jejich zpracování probíhá v uzavřených technologických okruzích s prakticky 100% podílem automatizace. Naopak **pevné odpady** vznikají zpravidla mimo technologické okruhy a s jejich zpracováním je spojen relativně vyšší podíl neautomatizované nebo i ruční práce. Tento rozdíl je dán tím, že toky kapalných a plyných médií (včetně jejich řízení a čištění) jsou součástí vlastního kontinuálního výrobního procesu, zatímco pevné odpady vznikají materiálově a časově nepravidelným způsobem velmi podobným tomu, který známe každý ze své domácnosti. Tuto svoji „nevýhodu“ nám ale pevné odpady kompenzují tím, že proti tekoucím médiím je jich podstatně méně (jak co do objemu, tak i hmotnosti) a jsou znečištěny jen malým podílem z radioaktivity, která v podobě odpadů opouští technologický proces.

\* trtilek@alldeco.cz, zaplep2.ete@mail.cez.cz

## KONCEPT BEZPEČNÉHO NAKLÁDÁNÍ

Základní koncept nakládání s odpady vznikající v jaderné části elektrárny lze shrnout do dvou bodů:

- Všechny odpady jsou od svého vzniku pokládány za radioaktivní až do okamžiku, než se prokáže, že radioaktivními nejsou.
- V průběhu nakládání s odpady se od sebe postupně oddělují aktivní a neaktivní složky. Neaktivní složky se buď vrací do technologie (nejčastěji jde o vodu) nebo se po radio-metrické a radiochemické kontrole toho, že obsah radionuklidů je pod stanovenými legisla-tivními limity, uvádějí do nejaderného (životního) prostředí. Radioaktivní složka je koncentrována a po vhodné úpravě převedena do podoby umožňující trvalé bezpečné uložení do úložiště radioaktivních odpadů.

**U kapalných odpadů** (technologických a jiných odpadních vod) se uvedený koncept realizuje rozsáhlým procesním řetězcem. Nejdříve vody procházejí odstředivací stanicí, kde se oddělí nerozpustná frakce (kaly). Potom se čistí na odparce, kde na jedné straně vznikne čistý kondenzát a na druhé straně zahuštěný koncentrát radioaktivních solí. Kondenzát se dále dočistí na iontoměničových filtrech na úroveň odpovídající demineralizované vodě a takto se znovu vrátí buď do technologie, nebo se po kontrole (jak v laboratoři tak přímo měřicími přístroji) vypouští do vodoteče. Zahuštěný solný koncentrát se zpracovává do bitumenové, asfaltu podobné matrice, ve které je po zatuhnutí ukládán do úložiště RAO.

Nově řešenou otázkou v řetězci nakládání s kapalnými RAO je efektivní zpracování kalů, které vznikají při odstředování odpadních vod. Jedná se o pastovité odpady s nestálými chemickými charakteristikami a s širokým rozmezím aktivity. Pro zpracování a úpravu těchto odpadů je v jaderných elektrárnách Temelín a Dukovany připravována perspektivní technologie – fixace do aluminosilikátové matrice SIAL\*. Jde o relativně jednoduchou, nízkoteplotní technologii, založenou na zabudování radionuklidů a kalových částic do prostorové struktury matrice. Skupina ALLDECO již tento způsob provozně aplikuje k fixaci kalů ve Slovenské republice. V České republice je produkt



**Obr. 2 Pohled do sudu s kalem ve fixačním zařízení před zpracováním do matrice SIAL**



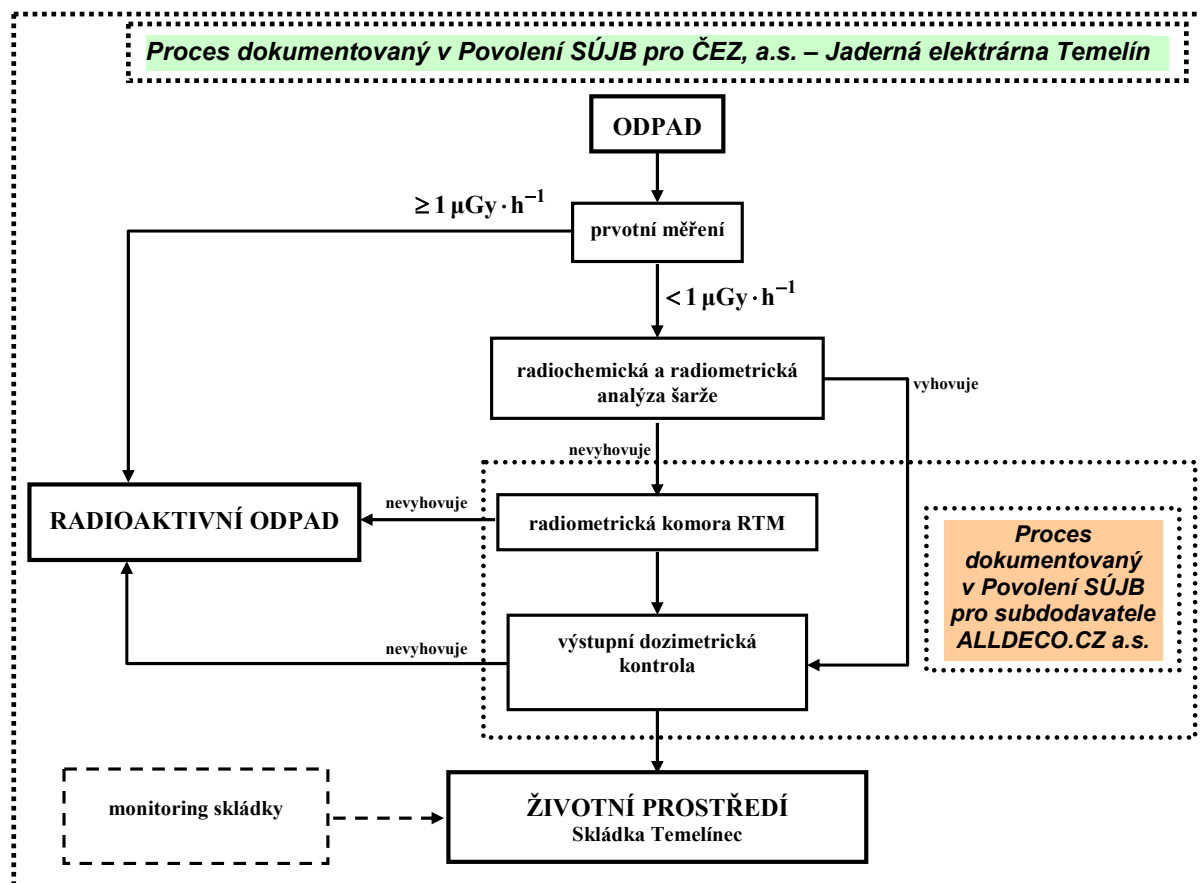
**Obr. 1 Vzorek produktu SIAL s fixovaným kalem s ionexy**

v závěrečné fázi licenčního řízení. Produkt SIAL má velmi dobré vlastnosti, téměř srovnatelné s bitumenem. Fixační matrice je v principu použitelná i pro jiné nebezpečné látky (například těžké kovy). Na obrázku č. 1 je ukázka vzorku produktu SIAL při testu loužitelnosti a na obrázku č. 2 je sud s kalem ve zpracovatelském zařízení před zahájením procesu fixace.

\* SIAL je registrovaná ochranná známka matrice vyvinuté skupinou ALLDECO.

**Plyny** nejdříve procházejí přes filtry, ve kterých jsou zachyceny aerosoly a pevné částice. Potom je plyn jímán do adsorpčních filtračních kolon. Protože plynné radioaktivní prvky mívají krátké poločasy přeměny, slouží tyto systémy ke zdržení plynů po dobu, než se část radionuklidů přemění tak, aby aktivita plynů klesla pod limitní hodnoty. Vyčištěný vzduch a plyny jsou poté při kontinuální radiometrické kontrole vypouštěny do atmosféry.

**Pevné odpady** jsou nejrůznorodější skupinou odpadů. Jsou to různé látky a předměty z provozních, revizních, údržbových a opravárenských činností, jako papír, textil, polyetylenové fólie, použité ochranné pomůcky, pryž, dřevo, sklo, plasty, izolace, náplně filtrů, kovový odpad, různé součásti zařízení, kusy zdiva a cihel, kabely a dráty, vyřazená elektronika, barvy apod. Část z nich vůbec nepřišla do kontaktu s radionuklidy a tedy je můžeme oprávněně považovat za neradioaktivní. Podle zkušeností lze říci, že neaktivní podíl představuje cca 40–50 % objemu těchto odpadů. Cesta k vytrídění a prokázání, že koncentrace radionuklidů v odpadech je pod legislativními uvolňovacími úrovněmi, a že je tudíž lze uvést do životního prostředí jako konvenční odpady (konkrétně v Jaderné elektrárně Temelín na skládku Temelínek), je poměrně složitá. Lépe než slovní popis tento proces vystihuje schéma na obrázku č. 3. Na obrázku č. 4 je potom fotografie radiometrické komory RTM 661/540 firmy Rados.



Obr. 3 Schéma procesu uvolňování pevných odpadů z kontrovaného pásma Jaderné elektrárny Temelín

Odpady, které nelze v záznamném procesu identifikovat jako neaktivní (podlimitní) a jsou tedy zařazeny jako radioaktivní, jsou dále objemově redukovány (fragmentací a lisováním) do sudů tak, aby mohly být uloženy do úložiště RAO.

Zvláštní kategorií jsou odpady pocházející z reaktoru (měřicí čidla, aktivované korozní produkty o vysoké aktivitě apod.), které jsou ukládány do stíněných pouzder a skladovány ve speciálních tubusových zařízeních v kontrovaném pásmu. U těchto odpadů se jejich zneškodnění a příprava k uložení do úložiště předpokládá až v procesu vyřazování elektrárny z provozu.

## BEZPEČNOST A KONTROLA NAKLÁDÁNÍ S RADIOAKTIVNÍMI ODPADY

---

Administrativní a technická opatření týkající se bezpečnosti nakládání s radioaktivními odpady stanovuje tzv. atomový zákon a navazující vyhlášky. Jedná se o činnost, která musí být povolena SÚJB. Každý právní subjekt, který při své činnosti nakládá s radioaktivními odpady, tedy i elektrárna, musí toto povolení mít. Aby povolení získal, je povinen doložit celou řadu dokumentů, ve kterých je detailně popsán způsob nakládání, monitorování pracoviště i odpadů, bezpečnostní rozbor, systém zajištění odborné způsobilosti zaměstnanců, systém zajištění jakosti apod. Způsob nakládání s radioaktivními odpady je pravidelně kontrolován inspektory SÚJB.

Tomu, aby se radioaktivní odpad dostal z jaderné části elektrárny do okolního životního prostředí, zabírá kombinace vhodných technologických a režimových opatření. Každá obalová jednotka s odpadem je na elektrárně evidována. Systém evidence zajišťuje, že každá obalová jednotka odpadu je jednoznačně identifikována, je nezaměnitelná a že v každém časovém okamžiku je dohledatelná její historie. Vzhledem k tomu, že na počátku evidence je každá jednotka odpadu považována za radioaktivní, zůstává v evidenčním systému trvalý záznam i o odpadech, které byly uvedeny do životního prostředí. Mimo



**Obr. 4 Radiometrická měřicí komora RTM 661/540**

jaderné objekty se RAO, resp. radioaktivní materiál obecně, dostává jen řízeným způsobem, například z důvodu přepravy do externí laboratoře ke specializované analýze nebo přepravy upraveného (zpracovaného) odpadu k uložení do úložiště. Pohyb takových látek v běžném (nejaderném) prostředí se přitom děje ve specifickém režimu podle pravidel odsouhlasených SÚJB a také v souladu s mezinárodní dohodou o přepravě nebezpečných věcí (ADR).

Podobně u plyných a kapalných výpustí jsou aktivity a množství těchto výpustí měřeny, monitorovány, zaznamenávány a vyhodnocovány podle tzv. Programu monitorování. Tento dokument, který schvaluje SÚJB, je jedním ze základních administrativních pilířů, bez nichž jaderná elektrárna nemůže dostat povolení k provozu.

Rovněž proces ukládání RAO do úložiště je řízen schvalovanými dokumenty, systémem limitů a podmínek a podléhá kontrolním mechanismům SÚJB.

## SLOVO NA ZÁVĚR

---

Radioaktivní odpady není třeba brát jako nutné zlo, ale jako doprovodný jev při výrobě elektrické energie v jaderné elektrárně. Nakládání s nimi se řídí podle přísných pravidel, jejichž dodržování je pravidelně kontrolováno SÚJB. V každém okamžiku je známo, kde se odpad nachází a co se s ním děje. Za normálních okolností se nemůže dostat mimo jadernou část elektrárny jinak, než řízeným způsobem. Vysoká bezpečnost procesu nakládání s RAO v Jaderné elektrárně Temelín je zajišťována společnými silami provozovatele ČEZ, a.s. a vysoce kvalifikovaného poskytovatele dodavatelských služeb – skupinou ALLDECO.

## Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí<sup>‡</sup>

Václav Bláha\*, Viceprezident České nukleární společnosti

Jedno české přísloví praví „Všechno zlé je pro něco dobré“. A stejně tak je možné se dívat na dopady velkých technických havárií, havárii černobylského reaktoru nevyjímaje. Každá havárie technického zařízení, nebo problém způsobený technickými prostředky, jsou vnímány veřejností v prvním okamžiku na základě způsobu a formy, jak je veřejnost informována. Informace by měla být rychlá a srozumitelná a měla by vystihovat závažnost nehody či problému. Když dnes v rozhlasovém zpravodajství slyšíme, že dopravní situace je na stupni 1 až 2, tak víme, že se ke svému cíli pravděpodobně dostaneme bez problémů, zatímco při oznámení stupně 4 až 5 máme jistotu, že na druhý konec města se nejlépe dostaneme tramvají, anebo pěšky.

Velmi zjednodušeně řečeno je na podobném principu založena Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí, kterou přijala Mezinárodní agentura pro atomovou energii v roce 1991. Z časového hlediska je zřetelné, že události v dubnu 1986 měly svůj podíl na jejím vzniku, a to zejména z pohledu, jak byla o havárii 4. bloku jaderné elektrárny v Černobylu informována veřejnost. Doba pěti let, která mezitím uplynula, se může zdát být velmi dlouhá, ale uvědomíme-li si, že cílem bylo sestavit stupnici sloužící k rychlému a srozumitelnému informování veřejnosti o závažnosti nehody, pak hledání kritérií, jejich jednoznačné formulování a dosažení konsensu na mezinárodní úrovni není úkol řešitelný v průběhu několika týdnů.

### HODNOCENÍ UDÁLOSTÍ

Stupnice hodnocení má 7 stupňů. Stupněm 1 se klasifikuje nejméně závažná událost a stupněm 7 se klasifikuje událost nejzávažnější. Jednotlivé události jsou hodnoceny podle tří hlavních kritérií, na jejichž základě je pak událost zařazena do příslušného stupně.

#### **První kritérium: Dopad na životní prostředí**

Podle tohoto kritéria se hodnotí především únik radioaktivních látek mimo elektrárnu. Jedná se tedy o nejhorší případy. Stupeň 7 znamená velkou jadernou havárii s vážnými následky pro zdraví a životní prostředí. Stupněm 3 se klasifikuje velmi malý únik radioaktivity, který by pro nejvíce poškozenou skupinu obyvatel znamenal dávku záření odpovídající zlomku předepsaného ročního limitu. (Například jedné desetiny průměrné roční dávky záření od přirozeného radiačního pozadí.)

#### **Druhé kritérium: Dopad na zařízení a prostředí uvnitř elektrárny**

Toto kritérium hodnotí především stav aktivní zóny a únik radioaktivity v rámci elektrárny. Rozsah je od stupně 3, který znamená velké zamoření elektrárny, až po stupeň 5, který představuje situaci těžkého poškození aktivní zóny jaderného reaktoru.

#### **Třetí kritérium: Dopad na bezpečnostní systémy**

Používá se pro události ohrožující soustavu bezpečnostních systémů elektrárny, které mají bránit nekontrolovatelnému uvolnění radioaktivity z reaktoru do elektrárny a jejího okolí. Klasifikují se stupni 1 až 3.

Každá událost je vždy zvažována podle všech kritérií a je jí přiřazen nejvyšší dosažený stupeň závažnosti.

<sup>‡</sup> Zpracováno na základě materiálů Public Relation ČEZ a SÚJB.

\* blahavac@quick.cz

STUPNICE

Stupeň	Název	Popis	Příklad
1	Odchyłka	Funkční nebo provozní odchyłky od úředně povolených limitů	
2	Porucha	Technické poruchy nebo odchyłky, které neovlivňují bezpečnost elektrárny přímo nebo bezprostředně	Mihama (Japonsko), 1991
3	Vážná porucha	Únik radioaktivity mimo elektrárnu nad povolené limity. Vně elektrárny nejsou nutná žádná zvláštní opatření Vysoká úroveň radioaktivity nebo zamoření uvnitř elektrárny Všechny poruchy, při kterých by další selhání bezpečnostních systémů mohlo vést k havárii	Vandelos (Španělsko), 1989
4	Havárie s účinky v jaderném zařízení	Malý únik radioaktivity mimo elektrárnu Havarijní opatření mimo elektrárnu nepravděpodobná – kontrola potravy nutná Aktivní zóna je částečně poškozena tavením nebo mechanicky. Ozáření pracovníků elektrárny může vést k zdravotnímu poškození	Jaslovské Bohunice (Československo), 1977 Saint Laurent – A2 (Francie), 1980
5	Havárie s účinky na okolí	Únik radioaktivních štěpných produktů (100 až 1 000 TBq jódu 131 nebo jiných biologicky významných radioizotopů) mimo elektrárnu Částečné zavedení opatření podle místních havarijních plánů Velká část aktivní zóny je poškozena tavením nebo mechanicky	Windscale (Velká Británie), 1957 Tree Mile Island (USA), 1979
6	Závažná havárie	Únik radioaktivity (1 000 až 10 000 TBq jódu 131 nebo jiných biologicky významných radioizotopů) mimo elektrárnu K omezení zdravotních následků je nutné úplné použití místních havarijních plánů	
7	Velká havárie	Únik velkého množství radioaktivních látek z aktivní zóny reaktoru mimo elektrárnu Možnost okamžitých zdravotních následků. Pozdní zdravotní důsledky se mohou objevit na velkém území Dlouhodobé následky pro životní prostředí	Černobyl (SSSR), 1986

## Mezinárodní agentura pro atomovou energii<sup>‡</sup>

*Václav Bláha<sup>\*</sup>, Viceprezident České nukleární společnosti*

Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) byla založena v roce 1957 v důsledku projevu amerického prezidenta Eisenhowera známého jako „Atoms for Peace“ adresovaného Organizaci spojených národů (OSN) v prosinci 1953. Hlavní návrh prezidenta Eisenhowera spočíval v apelu především na vlády USA a SSSR zpřístupnit zásoby uranu ostatním zemím pro mírové účely. Ideje vyjádřené v tomto projevu daly základ Statutu MAAE, který v roce 1956 jednomyslně přijalo 81 zakládajících států.

Statut MAAE vstoupil v platnost v červenci 1957 a vyzdvihuje 3 hlavní oblasti, na kterých spočívá úloha této organizace:

- verifikační činnost MAAE v oblasti záruk
- bezpečnost a ochrana lidí a životního prostředí před účinky ionizujícího záření
- vědecká a technická spolupráce při mírovém využívání jaderné energie

Aplikace záruk umožňuje MAAE ověřit, že stát plní své mezinárodní závazky nevyužívat své jaderné programy pro výrobu jaderných zbraní. Smlouva o nešíření jaderných zbraní (NPT), stejně jako jiné regionální smlouvy mající zabránit šíření jaderných zbraní, svědily MAAE roli jaderného inspektorátu.

Smlouva o nešíření jaderných zbraní vstoupila v platnost 5. března 1970 a byla publikována MAAE jako INFCIRC/140. Státy, které přistoupily k této smlouvě, se zavázaly uzavřít všeobecnou zárukovou dohodu s MAAE za účelem plnění závazků vyplývajících z této smlouvy s cílem zabránit neoprávněnému převodu jaderné energie z mírového využití na jaderné zbraně nebo jiná jaderná výbušná zařízení.

Smlouva zásadně zmrazila počet tzv. jaderných států (USA, SSSR, Velká Británie, Francie, Čína) a obsahuje závazek nepředávat výchozí, zvláštní štěpné materiály a zařízení nebo materiál speciálně určený pro zpracování, užití nebo výrobu zvláštního štěpného materiálu nejadernému státu pro mírové využití, pokud nemá uzavřenu zárukovou dohodu s MAAE. Záruky MAAE jsou založeny na ověření správnosti a úplnosti státem deklarovaných jaderných materiálů a činností v jaderné oblasti.

Mezinárodní agentura pro atomovou energii v zásadě provádí dva soubory opatření v závislosti na typu zárukových dohod uzavřených se státem

- *verifikace zpráv deklarovaných státem o jaderných materiálech a činnostech v jaderné oblasti.*  
Tato opatření jsou založena na ověřování vedení evidence jaderných materiálů a uplatňování kontejnmentu a dozorovacích systémů, instalovaných MAAE na jaderných zařízeních – všeobecná záruková dohoda s MAAE (modelový text INFCIRC/153).
- *posílení a zvýšení účinnosti zárukového systému MAAE přijetím Dodatkového protokolu (modelový text INFCIRC/540).*  
Tato opatření umožňují MAAE získat záruky o nepřítomnosti nedeklarovaných jaderných materiálů a nedeklarovaných činností v daném státě.

<sup>‡</sup> Zpracováno na základě materiálů SÚJB.

<sup>\*</sup> blahavac@quick.cz

Dodatkový protokol byl vypracován na základě zkušeností z války v Perském zálivu, které odhalily, že klasický zárukový systém MAAE nedokáže odhalit státem nedeklarované jaderné materiály a utajované činnosti související s jejich nelegálním využitím.

Nejdříve MAAE v roce 1993 vyhlásila Program 93+2, jehož cílem bylo využití nejnovějších technologií, získávání většího množství informací o veškerých činnostech souvisejících s jaderným programem v daném státě a možnost širšího přístupu ke všem lokalitám, kde se jaderné materiály nacházejí, nacházely nebo se mohou nacházet.

V květnu 1997 Rada Guvernérů MAAE přijala modelový text Dodatkového protokolu. Přijetím Dodatkového protokolu se stát zavazuje poskytovat informace vztahující se k celému jadernému palivovému cyklu, od údajů o těžbě a zpracování uranové a thoriové rudy, vývozu nebo dovozu příslušných jaderných technologií, nejaderném využití jaderných materiálů, případném zpracování vysoce a středně aktivních radioaktivních odpadů, až po údaje o plánech v oblasti jaderného palivového cyklu, včetně výzkumných a vývojových aktivit.



## Popularizace jaderné energetiky v České republice

*Václav Bláha\*, Viceprezident České nukleární společnosti*

V naší republice má dlouholetou tradici činnost dobrovolných odborných společností, ve kterých se sdružují lidé s cílem dozvědět se více o oboru, který je zajímavý, prohloubit si své vědomosti a v řadě případů i šířit „světlo“ vědomostí dále. Jaderná energetika patří mezi obory, které vzhledem ke své fyzikální podstatě patří do oblasti možného vojenského zneužití, a je tudíž často předmětem politických zájmů. Je proto nezbytně nutné u tohoto oboru cílevědomě a systematicky vysvětlovat principy, metody a informovat veřejnost přístupnou formou o všech souvislostech, aby si každý mohl udělat svůj vlastní úsudek o problému. V následujících řádcích bych chtěl představit organizaci a její sekce, u kterých můžete příslušné informace získat.

### ČESKÁ NUKLEÁRNÍ SPOLEČNOST

Česká nukleární společnost (ČNS) je dobrovolnou odbornou organizací, která je ve smyslu zákona č. 345/90 Sb o sdružování občanů právníkou osobou (občanským sdružením) s působností na celém území České republiky. Její činnost se řídí Stanovami společnosti, registrovanými u Ministerstva vnitra ČR.

Hlavním cílem je šíření objektivních informací z oblasti jaderné energetiky a souvisejících oborů v duchu trvale udržitelného rozvoje lidské společnosti. Všestrannou osvětou tak napomáhá vzdělávání veřejnosti v tomto oboru a oborech souvisejících. Snaží se zabránit tomu, aby se díky nevědomosti nestali z jedinců a skupin potencionální šířitelé „bludů“ o této problematice.

ČNS byla založena v roce 1990, kdy skupina předních odborníků Ústavu jaderného výzkumu v Řeži pocítila nutnost vzniku občanského sdružení jako protipól demagogických tendencí ekologických aktivistů. V té době se též utvářela nová struktura odborných společností v České republice a ČNS se stala zakládajícím členem Českého svazu vědeckotechnických společností. Současně se zapojila i do odborných struktur v rámci Evropy a stala se členem Evropské nukleární společnosti, která sdružuje 34 zemí. Ve středoevropském regionu dlouhodobě a úzce spolupracuje se Slovenskou nukleární společností (SNUS) a německou nukleární společností (KTG).

Výraznou aktivitu projevuje v ČNS od roku 1997 sekce mladé generace, která je jako Czech Young Generation zapojena do Young Generation Network Evropské nukleární společnosti. V roce 2000 vznikla při ČNS sekce žen, která sdružuje ženy ze všech oborů mírového využívání jaderné energie a ionizujícího záření. Sekce je registrována v mezinárodní organizaci WIN Global. Přínos a aktivita obou těchto sekcí je natolik významný, že není možné ji odbýt v několika řádcích a jejich představení věnujeme samostatné příspěvky.

#### **Činnost České nukleární společnosti je orientována na:**

- pracovní setkání odborníků zaměřená na specializovanou problematiku
- odborné konference, které představují rozsáhlejší setkání našich a zahraničních odborníků
- přednášky předních odborníků v rámci rozšiřování interdisciplinárních vědomostí svých členů
- osvětové semináře k vybraným oblastem jaderné energetiky
- publikační činnost
  - vydávání tištěného Zpravodaje (7–8 čísel ročně)
  - informace na www-stránkách společnosti

---

\* blahavac@quick.cz

- sborníky ze seminářů
- články v periodickém tisku a odborných časopisech
- překlady publikací o důležitých tématech jaderné energetiky
- spolupráci se středními a vysokými školami
  - podpora středoškolské odborné činnosti
  - podpora fyzikální olympiády
  - organizování soutěže o nejlepší diplomové a doktorské práce zaměřené na jadernou energetiku a související obory

### Publikace České nukleární společnosti

- [1] Bláha V. (red.): *Detektory (sborník prací ze semináře pořádaného v Plzni v květnu 2000)*. ČNS, Praha 2000.
- [2] Bláha V. (red.): *Kalorimetry (sborník prací ze semináře pořádaného v Plzni v květnu 2000)*. ČNS, Praha 2000.
- [3] Fleischhans J. (red.): *Ekonomická problematika výroby elektrické energie v jaderných elektrárnách (sborník prací ze semináře pořádaného v Praze v říjnu 2000)*. ČNS, Praha 2000.
- [4] Miasnikov A. (red.): *Seminář o bezpečnosti jaderných zařízení (sborník prací ze semináře pořádaného v Praze v květnu 2001)*. ČNS, Praha 2001.
- [5] Fleischhans J. (red.): *Konec palivového cyklu (sborník prací ze semináře pořádaného v říjnu 2001 v Praze)*. ČNS, Praha 2001.
- [6] Vespalec R. (red.): *KDO JE KDO v české a slovenské jaderné energetice*. ČNS, Praha 2001.
- [7] Mach K. (red.): *Havarijní připravenost jaderných zařízení (sborník prací ze semináře pořádaného v dubnu 2002 v Dukovanech)*. ČNS, Praha 2002.
- [8] Titelbach D. (red.): *Setkání pracovníků radiační ochrany a dozimetrie (sborník prací ze semináře pořádaného v dubnu 2002 v Temelíně)*. ČNS, Temelín 2002.
- [9] Hanus V. (red.): *Radioaktivní odpady – problém politický (sborník prací ze semináře pořádaného v dubnu 2003 v Praze)*. ČNS, Praha 2003.
- [10] Bláha V. (red.): *Jaderná energetika ve vědeckých pracích studentů a doktorandů technických škol (sborník prací ze semináře pořádaného v prosinci 2003 v Brně)*. ČNS, Praha 2004.
- [11] Bláha V. (red.): *Jaderná energetika ve vědeckých pracích mladé generace (sborník prací ze semináře pořádaného v prosinci 2004 v Brně)*. ČNS, Praha 2005.
- [12] Bláha V. (red.): *13<sup>th</sup> WIN GLOBAL ANNUAL MEETING (sborník prací z mezinárodní konference pořádané v dubnu 2005 v Českém Krumlově)*. ČNS, Praha 2005.
- [13] Bláha V. (red.): *Nízké dávky ionizačního záření (sborník prací ze semináře pořádaného v říjnu 2005 v Řeži)*. ČNS, Praha 2006.
- [14] Bláha V. (red.): *Jaderná energetika v pracích mladé generace – 2005 (sborník prací ze semináře pořádaného v prosinci 2005 v Brně)*. ČNS, Praha 2006.
- [15] Drábová D., Böck H.: *Případ Temelín*. ČNS, Praha 2006.
- [16] Kinley D. (red.): *Dědictví Černobylu: Zdravotní, ekologické a sociálně ekonomické dopady a Doporučení vládám Běloruska, Ruské federace a Ukrajiny*. ČNS, Praha 2006.

### **Diplomové práce oceněné Českou nukleární společností v období 2000 – 2005**

Od roku 2000 oceňuje Česká nukleární společnost nejlepší diplomové práce z oblasti jaderné energetiky a příbuzných oborů. Od roku 2001 probíhá slavnostní vyhlásování na semináři mladé generace ČNS, který se pravidelně koná v prosinci na VUT v Brně. Povinností oceněných je jednak prezentovat svoji práci na tomto semináři a jednak zpracovat základní teze a výsledky své práce ve formě článku pro Zpravodaj ČNS. Vítěznou práci pak autor prezentuje na mezinárodní konferenci NUSIM (Nuclear Societies Information Meeting), který organizuje ČNS ve spolupráci se Slovenskou a Německou nukleární společností a který se koná střídavě na území jednotlivých států.

#### **Rok 2000**

1. Bláha Petr, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní  
*Analýza míšení tekutiny při jednofázovém podélném proudění kolem palivových tyčí tlakovodního reaktoru*
2. Hakl Václav, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní  
*Analýza chování hladiny v paragenerátoru jaderné elektrárny Temelín*
3. Křepel Jiří, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská  
*Kinetika podkritického reaktoru s proudícím palivem a vnějším zdrojem neutronů*
4. Kneslík Tomáš, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní  
*Analýza pravděpodobnosti pádu malého letadla na vybrané části budov jaderné elektrárny Dukovany a jeho možné důsledky*

#### **Rok 2001**

1. Jan Rataj, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská  
*Experimentální studie neutronově-fyzikálních parametrů vývojových blanketů ADS na reaktoru VR-1*
2. Miloš Zelený, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní  
*Zhodnocení bezpečnosti jaderných elektráren pomocí provozních indikátorů*
3. Tomáš Jahoda, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní  
*Analýza proudění parovzdušné směsi do barbotážní věže jaderné elektrárny*

#### **Rok 2002**

1. Ladislav Vyskočil, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní  
*Analýza teplotního a rychlostního pole na vstupu do aktivní zóny reaktoru VVER-100*
2. Josef Káňa, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd  
*Modelování vibrací rekombinátoru vodíku kontejnmentu elektrárny buzeného podlahovými spektry odevzy*
3. Pavel Frajtág, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská  
*Výpočetní stanovení podmínek ozařování sondou Choucca*

**Rok 2003**

1. Ladislav Sipl, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní  
*Analýza integrity tlakové nádoby*
2. Karel Matějka, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská  
*Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti školního reaktoru*
3. Lukáš Nesvadba, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní  
*Parní generátor vyhříváný heliem*
3. Martin Prosický, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní  
*Rozložení teplotního a rychlostního pole na vstupu do aktivní zóny*

**Rok 2004**

1. Hugo Šen, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní  
*Uzávěr potrubí s tuhnutím pracovní látky;*
2. Libor Klečka, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská  
*Možnosti optimalizace palivové kazety VVER-1000 s Gd a MOX palivem z hlediska jejich neutronově fyzikálních charakteristik*
3. Aleš Macálka, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní  
*Teplotní a rychlostní pole na vstupu do aktivní zóny reaktoru;*
3. Jaroslav Hort, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní  
*Integrace primárního okruhu do tlakové nádoby reaktoru VVER-1000.*

**Rok 2005**

1. Aleš Musil, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd  
*Vyšetřování seizmické odezvy pohonu regulační tyče reaktoru VVER 440/V213,*
2. Markéta Somolová, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní  
*Studie možností výroby vodíku ve vztahu k jaderné energetice*
3. Michaela Stixová, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská  
*Strategie dozorného orgánu v systému zvládnání těžkých havárií a omezení jejich následků*

## CYG 1997–2004

*Daneš Burket\*, ČEZ, a.s., Jaderná elektrárna Dukovany*

Klasik by řekl, že končí jedna etapa v historii sekce mladých při ČNS (CYG – Czech Young Generation). Zakládající členové pomalu opouští řady mladých a na jejich místa nastupuje další generace. Už jen opravdoví pamětníci si dnes vzpomenou, jak jsme pod dohledem Jiřího Fleischhause v létě roku 1997 zakládali v Českých Budějovicích CYG jako odpověď na sílící protesty „ekologických“ aktivistů proti dostavbě Jaderné elektrárny Temelín. Připomenu zde prvního předsedu CYG Tomáše Štěpánka, který se spolu s Laco Horváthem nejvíce zasloužil o úspěšný rozjezd sekce mladých.

Stál jsem v čele CYG bezmála šest let, letos jsem pochopil, že nástup mladé generace nezastavím a s její dravostí nemohu soupeřit. Za svůj přínos sekci mladých se v žádném případě nemusím stydět, a proto jsem bez výčitek předal žezlo mladším. Na Mikulášském setkání (podrobněji o něm pojednává jiný článek v tomto zpravodaji) jsem nabídl funkci a novým předsedou byl zvolen Martin Přeček z FJFI ČVUT. Martin patří k neaktivnějším členům sekce mladých, takže věřím, že se mu podaří udržet vysokou laťku, a je jistě zárukou toho, že CYG bude i nadále bezkonkurenčně nejúspěšnější sekci v rámci ČNS. Mně nezbyvá než už jen shrnout úspěchy, které se nám podařilo dosáhnout, a k tomu bych rád využil tento článek.



**Obr. 1 Z ustavující valné hromady CYG**

Hlavními cíli, které jsme si na ustavující valné hromadě CYG vytkli, byly: snažit se o získávání a vzdělávání mladých inženýrů, techniků a ostatního kvalifikovaného personálu pro práci v oblastech využívání jaderné technologie, usilovat o vytváření prostoru pro navazování a udržování kontaktů mezi mladými inženýry, techniky a studenty jaderných oborů, jakož i o budování kontaktů a intenzivní výměnu zkušeností mezi starší a mladou generací, zasazovat se o pořádání odborně orientovaných seminářů, konferencí a setkání odborníků se zaměřením především na mladou generaci, kde mají mladí lidé možnost prezentovat své názory a stanoviska, podporovat aktivní zapojení mladých lidí do práce České nukleární společnosti, včetně jejich zapojení do vedoucích funkcí, snažit se o vytváření prostoru pro společnou komunikaci a setkávání členů jednotlivých „Young Generation“ na evropské úrovni a rozšiřovat mezinárodní kontakty mladé generace. Pojďme podívat, jak se nám podařilo tyto cíle naplňovat.

Sekce mladých dnes registruje více než 60 mladých odborníků z výzkumných ústavů, elektráren, škol, projektových organizací a dalších institucí. Je členem Young Generation Network při Evropské nukleární společnosti a International Youth Nuclear Network. Na mezinárodním poli patříme, díky podpoře ČNS, k neaktivnějším zemím. Již v roce 1998 se nám po-

\* danes.burket@cez.cz

dařilo na Temelíně zorganizovat kurz VVER 1000 pro mladé evropské odborníky, kterého se zúčastnilo 35 specialistů z celé Evropy. Spolupracujeme se Studentskou unií FJFI ČVUT, kde se jako lektori zúčastňujeme letních táborů pro studenty středních škol, zajímající se o fyziku. K rozšiřování kontaktů mezi mladými odborníky přispívají pravidelné semináře, které pořádáme na FJFI nebo na VUT v Brně. Semináře jsme pořádali i v Třebíči, v Českých Budějovicích, na Hlavní správě ČEZ a dalších místech. Mezi nejúspěšnější akce, kde mají mladí možnost vyzkoušet si prezentovat výsledky své práce, patří Mikulášské setkání na VUT v Brně, které letos proběhlo již počtvrté. Zde bych rád poděkoval profesorovi Matalovi, který jako odborný garant přispěl významnou měrou k úspěchu těchto setkání.



**Obr. 2 Mikulášské setkání**

Pokud jde o zapojování členů sekce mladých do práce ČNS, je naším úspěchem fakt, že čtyři bývalí členové CYG byli zvoleni do výboru ČNS, další je členem revizní komise.

CYG úzce spolupracuje se sekcemi mladých v rámci ENS. Nejčastěji se setkáváme s našimi slovenskými kolegy – nejen při Valných shromážděních SNUS, na konferencích NUSIM, ale zúčastňujeme se vzájemně i seminářů, které pořádají sekce mladých v Čechách a na Slovensku. Podařilo se nám prosadit do programu konference NUSIM zařazení sekce, kde mladí odborníci prezentují své diplomové práce (vždy po jedné z ČR, Slovenska a Německa).



**Obr. 3 Delegace CYG na NUSIMu 1999**

Členové sekce mladých se pravidelně zúčastňují Mezinárodního jaderného kongresu mladých (2000 Bratislava, 2002 Daejeon, 2004 Toronto), kde jsme úspěšně prezentovali odborné práce, ale i činnost CYG a ČNS. V roce 2002 jsme u příležitosti konference PIME zorganizovali v Praze zasedání výboru Young Generation Network při Evropské nukleární společnosti.



**Obr. 4 Česká výprava na loňském Mezinárodním jaderném kongresu mladých**

Aktivně spolupracujeme i se sekcemi mladých při Ruské a Ukrajinské nukleární společnosti. V roce 2002 navštívili naši ruští přátelé Jadernou elektrárnu Dukovany a na kolech se potom za našeho doprovodu vydali na cestu do Temelína. My jsme se potom na jejich pozvání zúčastnili konference mladých v Petrohradu. Naši zástupci zavítali i na výroční konferenci Ukrajinské nukleární společnosti.



**Obr. 5 Členové sekce mladých při Ruské nukleární společnosti na EDU**

Nesmíme opomenout naši spolupráci s občanským sdružením Jihočestí taťkové. Lektorsky se s nimi podílíme na přednáškách „Temelín – nic netajíme“ pro studenty středních škol. Měli jsme společný stánek na výstavě Země živitelka v Českých Budějovicích. Naší nejúspěšnější společnou akcí byla „blokáda“ hraničního přechodu Dolní Dvořiště dětskými autíčky v roce 2001. Byla to současně mediálně nejvýraznější akce v historii České nukleární společnosti. Pronikli jsme do zpravodajství celoplošných televizních stanic a rádií, články s fotografiemi z této akce byly otištěny ve všech významných denících. Jak prohlásil nejmenovaný odborník

na mediální problematiku – „Nikoho nezabít a dostat se na druhou stránku Blesku je výjimečný úspěch“.



Obr. 6 CYG, Jihočeští tatkové a jejich děti v Blesku

Významné jsou i aktivity sekce mladých na mediálním poli. Mnohokrát se nám podařilo prosadit s našimi názory na stránkách tisku. Prezident republiky Václav Havel ocenil osobním dopisem náš přínos ke konstruktivní debatě o dostavbě Jaderné elektrárny Temelín. CYG v roce 1997 spustila web stránky České nukleární společnosti, které dnes patří k nejlepším v rámci ENS.

Z výše uvedeného je patrné, že se nám dařilo a daří naplňovat cíle, které jsme si na začátku vytkli. Věřím, že se to bude dařit i nadále a že se novému vedení CYG podaří nadále upevňovat naši pozici i v mezinárodním měřítku. K tomu jim přeji hodně zdaru!



## Women in Nuclear Global

*Larisa Dubská\*, předsedkyně WIN ČR*

Mezinárodní organizace WIN Global je nezávislé celosvětové sdružení žen pracujících v jaderné energetice a oborech souvisejících s využíváním radionuklidů a ionizujícího záření. Tato organizace vznikla v lednu 1993 na konferenci „jaderných komunikátorů“ v Karlových Varech. Zde proběhlo zakládající shromáždění, kterého se zúčastnilo 40 žen z 22 zemí. Sekretariát WIN Global se nachází v Londýně v sídle World Nuclear Association (WNA). Dnes v rámci WIN pracují národní skupiny v asi 70 zemích světa, které sdružují desetitisíce odbornic z průmyslu, výzkumu, lékařství, školství a jiných odvětví. WIN má svůj status, který stanoví cíle organizace. Hlavním posláním „žen v jádře“ (jak by se dal název volně přeložit) je přispívat k objektivnímu informování veřejnosti, zejména žen, o jaderné energetice, ionizujícím záření a jeho využití a napomáhat tak ke zvýšení úrovně znalostí veřejnosti.

Nejméně polovinu obyvatelstva planety tvoří ženy. Podle průzkumů veřejného mínění v různých zemích mají ženy odmítavější postoj k jaderné energii než muži. Ženy-matky se instinktivně obávají o bezpečí své rodiny. Tyto obavy jsou často záměrně vyvolávány a živeny různými protijadernými iniciativami. Na druhou stranu ženy umějí lépe komunikovat s veřejností o technických a odborných problémech a jsou laickými posluchači lépe přijímány než muži, kteří obvykle hovoří příliš „technickým jazykem“. To je důvod, proč je WIN organizací sdružující ženy-profesionálky v jaderných oborech, které chtějí přiblížit svou profesi dalším a napomoci k lepšímu porozumění takovým pojmům, jako jsou radioaktivita, záření, jaderná elektrárna atd.

WIN Česká republika vznikla pod křídly České nukleární společnosti v květnu 2000 u příležitosti oslav 15 let úspěšného provozu Jaderné elektrárny Dukovany. Svou činností navázala na práci dřívějšího Sdružení žen pro čistší energii. České „winky“ se aktivně podílejí na budování pozitivního vztahu veřejnosti k jádru. Zúčastňují se besed a přednášek na základních a středních školách, pořádají zajímavé semináře a exkurze na pracoviště, kde se k mírovým účelům využívá jaderná energie a ionizující záření.

V letošním roce jsme se staly hostitelskou organizací pro celosvětovou výroční konferenci WIN Global. Tato konference má již třináctiletou tradici, pořádá se každoročně střídavě na různých kontinentech a letos ji na základě pověření světové Rady WIN Global hostila poprvé země bývalého „východního bloku“. Konference, kterou za významné finanční podpory řady domácích firem a organizací pořádala Česká nukleární společnost a WIN ČR, se zúčastnilo na 130 odborníků z 19 zemí světa.



**Účastníci konference v Českém Krumlově, duben 2005**

Více informací najdete na [www.world-nuclear.org/win-global](http://www.world-nuclear.org/win-global) a [www.csvts.cz/cns/win](http://www.csvts.cz/cns/win).

\* [larisa.dubska@cez.cz](mailto:larisa.dubska@cez.cz)

## **Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze**

*Jaroslav Zeman\*, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT v Praze*

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská (FJFI) oslavila v loňském roce 50. výročí svého založení. V roce 1955 bylo zahájeno období nástupu mírového využívání jaderné energie v mezinárodním měřítku. První mezinárodní konference o jaderné energii byla svolána OSN do Ženevy v roce 1955 a českoslovenští odborníci se jí aktivně účastnili. Využívat jadernou energii v naší zemi se jevílo velmi lákavé, zejména pro nedostatek a nevýhody jiných energetických zdrojů, z hledisek ekonomických i ekologických, a také pro naše značné zásoby uranových rud. Vždyť přece radioaktivita byla poprvé zjištěna u jáchymovského smolince.

V roce 1955 vznikla u nás Komise pro atomovou energii, byl založen Ústav jaderného výzkumu v Řeži u Prahy vybavený reaktorem a cyklotronem a další jaderné instituce. Pro přípravu odborníků v této oblasti bylo rozhodnuto zřídit na Karlově univerzitě zvláštní jadernou fakultu, středně technické kádry začaly být připravovány na jaderné průmyslovce. Fakulta pod názvem Fakulta technické a jaderné fyziky (FTJF) byla ustavena vládním usnesením z 25. srpna 1955 a 6. září byla na ní slavnostně zahájena výuka.

Brzy se ukázalo, že jaderná technika není jen záležitost jaderných oborů, ale že vyžaduje úzké propojení přírodovědných oborů, matematiky, fyziky a chemie s technickou praxí a také novou, vyšší úroveň inženýrské práce ve strojních, elektrotechnických a stavebních oborech. Tak se fakulta dostala na rozhraní našich dvou tradičních vysokých škol, univerzity a techniky, jako fakulta fyzikálně inženýrského charakteru. Vládním nařízením z 12. srpna 1959 byla fakulta převedena z Karlovy univerzity na České vysoké učení technické jako jeho čtvrtá fakulta. Stalo se tak v době, kdy první studenti fakulty ještě neabsolvovali, takže při prvních promociích na fakultě byly již udělovány tituly inženýrské. Fakulta sama byla pak záhy přejmenována na Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou (FJFI).

Postupně se na fakultě vyhranily tři zkladní směry výuky: matematické inženýrství včetně softwarového, jaderné inženýrství zaměřené na fyziku a techniku jaderných reaktorů a na dozimetrii a dále fyzikální inženýrství se specializací na fyzikální elektroniku, inženýrství pevných látek a studium vlastností materiálů. Od samého počátku se fakulta podílela na postgraduální výchově, dnes doktorském studiu, a na rozšiřování kvalifikace klasických inženýrů, kteří pracují v moderních oblastech výzkumu a praxe.

Fakulta se postupně profilovala podle vzoru zahraničních fyzikálně inženýrských škol a fakult a stavěla výuku na širokém přírodovědném, matematicko-fyzikálním a chemickém základě. To umožnilo absolventům fakulty dobře se orientovat v nově vznikajících oblastech inženýrské práce, kde se fyzikální poznatky teprve začínají uplatňovat. Fakulta tak připravuje inženýry pro práci v oborech, které vlastně ještě neexistují.

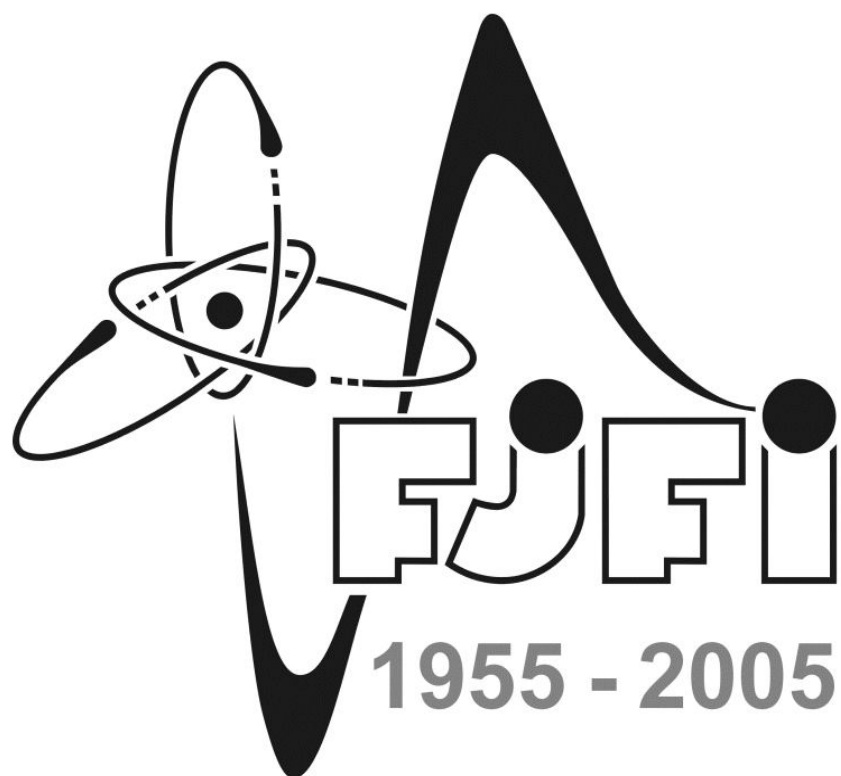
Počty studentů fakulty a jejich absolventů sice v minulosti mírně kolísaly, ale poslední dobou je zájem o studium vysoký. Obecně je studium na fakultě poměrně náročné a studentům je věnována v podstatě individuální péče. Po zvládnutí základů matematiky a fyziky jsou uváděni do samostatné vědeckovýzkumné práce. Spojení výuky s aktivní tvůrčí prací studentů bylo vždy jedním z charakteristických rysů fakulty. V dnešní době k tomu přispívá pro studenty i možnost seznamovat se s výukou a výzkumem v zahraničí v rámci rozsáhlých kontaktů a spoluprací, které fakulta se zahraničními školami a institucemi udržuje.

---

\* jaroslav.zeman@fjfi.cvut.cz

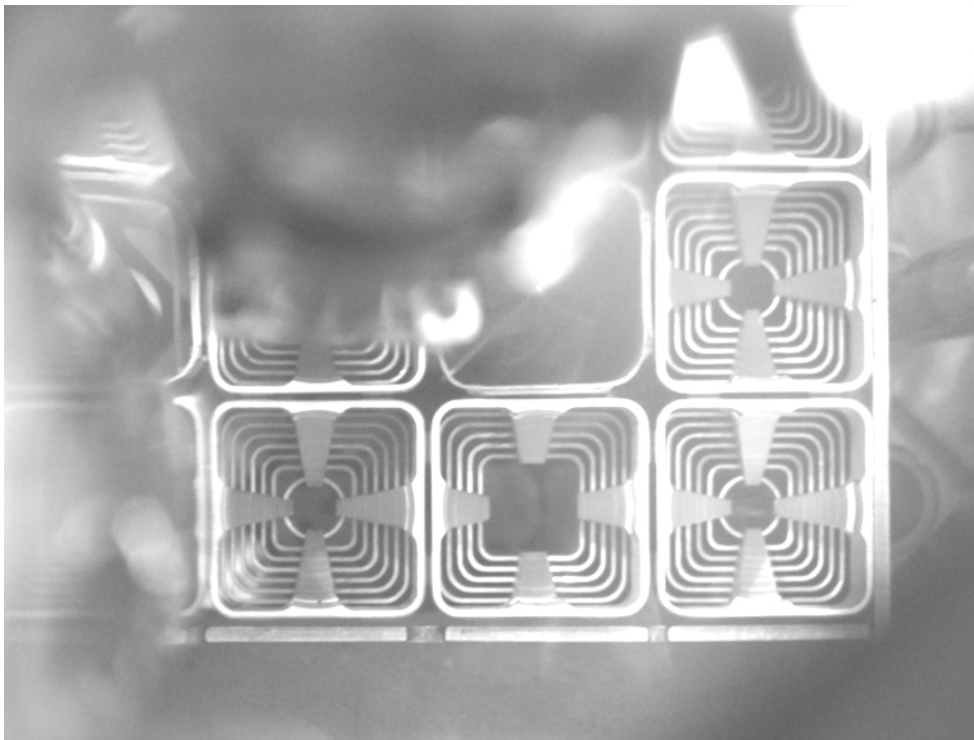
Podíl vědeckovýzkumné práce fakulty byl vždy značný a fakulta představovala vlastně i výzkumný ústav. Spolupracovala s inženýrskou praxí jednak při matematickém řešení technických problémů, vývoji nových fyzikálních metod měření, kontroly a modelování, rozvoji nových technologií, například laserových, polovodičových, fyzikálně chemických a materiálových, v oblasti kosmického výzkumu, biomedicíny aj. Školní jaderný reaktor uvedený do provozu v roce 1990 představuje unikátní zařízení umožňující sledovat fyzikální procesy v aktivní zóně a provádět experimenty v neutronové fyzice. Je využíván jak pro přípravu odborníků v jaderné energetice, tak k seznamování veřejnosti a mládeže s touto dnes tolik sledovanou oblastí techniky.

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze je kolektivním členem České nukleární společnosti.



## Záměna vysoce obohaceného paliva na školním reaktoru VR-1 Vrabec

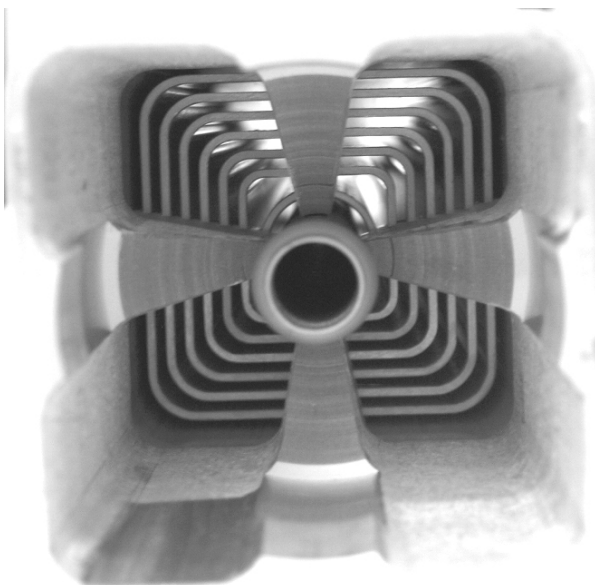
Karel Matějka\*, Antonín Kolros\*, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT v Praze



Obr. 1 Aktivní zóna C1 reaktoru VR-1 VRABEC s palivem IRT-4M

### MEZINÁRODNÍ PROGRAM RERTR

Na přelomu září a října roku 2005 došlo na školním reaktoru k záměně paliva. Palivo s obohacením 36 %  $^{235}\text{U}$ , kategorizované jako vysoce obohacené (HEU) bylo zaměněno palivem s obohacením pod 20 %  $^{235}\text{U}$ , kategorizovaným jako nízko obohacené (LEU). Záměna je v plném souladu s mezinárodním programem RERTR (Reduced Enrichment for Research and Test Reactors – snížení obohacení pro výzkumné a zkušební reaktory) a uskutečnila se ve spolupráci s U.S. Department of Energy (DoE), IAEA, společností SOSNY, Korporací TVEL a jejím výrobním závodem NZCHK v Novosibirsku, společností ALTA a.s., ÚJV Řež, a.s., SÚJB a Fakultou jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze.



Obr. 2 Palivo IR-4M

\* karel.matejka@fjfi.cvut.cz, antonin.kolros@fjfi.cvut.cz

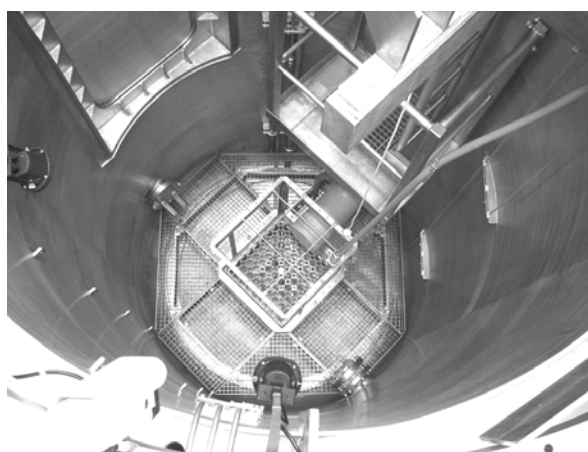
Projekt RERTR dosud byl úspěšně aplikován na více než 40 výzkumných reaktorech ve světě. **Reaktor VR-1 VRABEC je první reaktor s ruským palivem typu IRT, u kterého byla výměna za palivo s nižším obohacením provedena.** Celkové náklady na výměnu paliva přesáhly 2 mil. US\$ a plně byly hrazeny U.S. DoE. V celkových souvislostech se jedná o mimořádně významnou a odbornou veřejností pečlivě sledovanou událost.

### CO JE ŠKOLNÍ REAKTOR VR-1 VRABEC

Školní reaktor VR-1, familiárně pojmenovaný VRABEC, je výzkumné jaderné zařízení, určené především pro výuku posluchačů našich vysokých škol. Jedná se o lehkovodní jaderný reaktor bazénového typu, kde aktivní zóna reaktoru je umístěna a provozována v nerezové nádobě – bazénu – a který vyžaduje k provozu jako palivo obohacený uran. Moderátorem neutronů i chladivem je vysoce čistá tzv. demineralizovaná voda ( $H_2O$ ). Výkon reaktoru VRABEC je velmi malý – 1 kW, krátkodobě lze zvýšit do 5 kW, Roční „spotřeba“ uranu je méně než 0,1 g  $^{235}U$ . Reaktor VRABEC byl uveden do provozu 3. 12. 1990, jeho životnost je plánovaná minimálně do roku 2020.



**Obr. 3 Výroba nového paliva IRT-4M pro reaktor VR-1 v Novosibirsku**

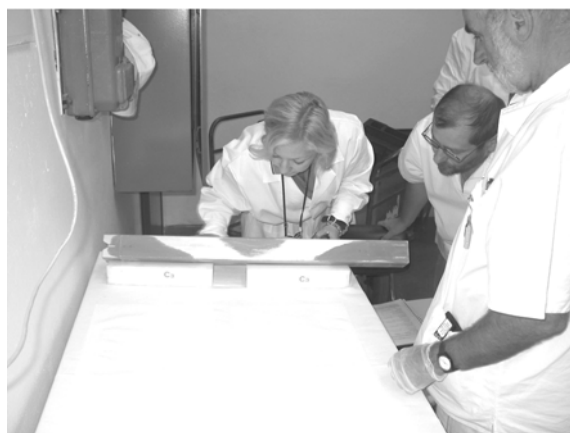


**Obr. 4 Reaktor VR-1 v očekávání nového paliva**



**Obr. 5 Připravenost personálu reaktoru VR-1 k balení**

Původní palivo typu IRT-2M (SSSR) s obohacením 36 %  $^{235}U$  bylo v roce 1997 zaměněno palivem typu IRT-3M (Rusko) se stejným obohacením.



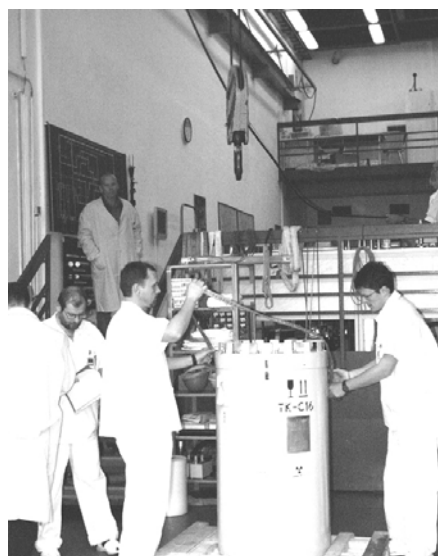
Obr. 6 a 7 Měření paliva IRT-3M s 36%  $^{235}\text{U}$  inspektory IAEA před jeho transportem



Obr. 8 Balení starého paliva IRT-3M na reaktoru VR-1



Obr. 9 Inspektori IAEA při pečetění transportních kontejnerů se starým palivem IRT-3M



Obr. 10 Transport nového paliva do haly reaktoru



Obr. 11 Dozimetrická kontrola transportního kontejneru

Reaktor VR-1 VRABEC je široce a efektivně využíván pro výuku posluchačů technických univerzit z České republiky i ze zahraničí, pro přípravu odborníků pro český jaderný program, zahraniční spolupráci v oblasti jaderného inženýrství, v informačních programech o zásadách bezpečného využívání jaderné energie a při šíření „jaderné“ gramotnosti.



**Obr. 12 a 13 Pečlivá přejímka nového paliva IRT-4M na reaktoru VR-1**



**Obr. 14 Kontrola paliva IRT-4M kalibrem**



**Obr. 15 Zakládání detektorů neutronů PMV pro měření výkonu**

#### O CO ŠLO A JAK TO PROBĚHLO

---

Záměna vysoce obohaceného paliva (HEU) nízko obohaceným palivem LEU (hranící je 20 % obsahu  $^{235}\text{U}$ ) se uskutečnila po pečlivé přípravě a souhlasu všech zainteresovaných stran. Termíny odvozu stávajícího paliva typu IRT-3M do Ruské federace a dovoz nového paliva z výrobního závodu v Novosibirsku (opět Ruská federace) podléhaly z bezpečnostních důvodů přísnému utajení.



Palivo HEU bylo odvezeno 27. září 2005, nové palivo bylo dopraveno na naše pracoviště 10. října 2005 a převzato 12. října 2005. Transport paliva se uskutečnil v souladu s platnými předpisy pro přepravu včetně policejní ochrany.



**Obr. 17 Sestavování aktivní zóny reaktoru**



**Obr. 16 Zakládání palivového článku IRT-4M do aktivní zóny**



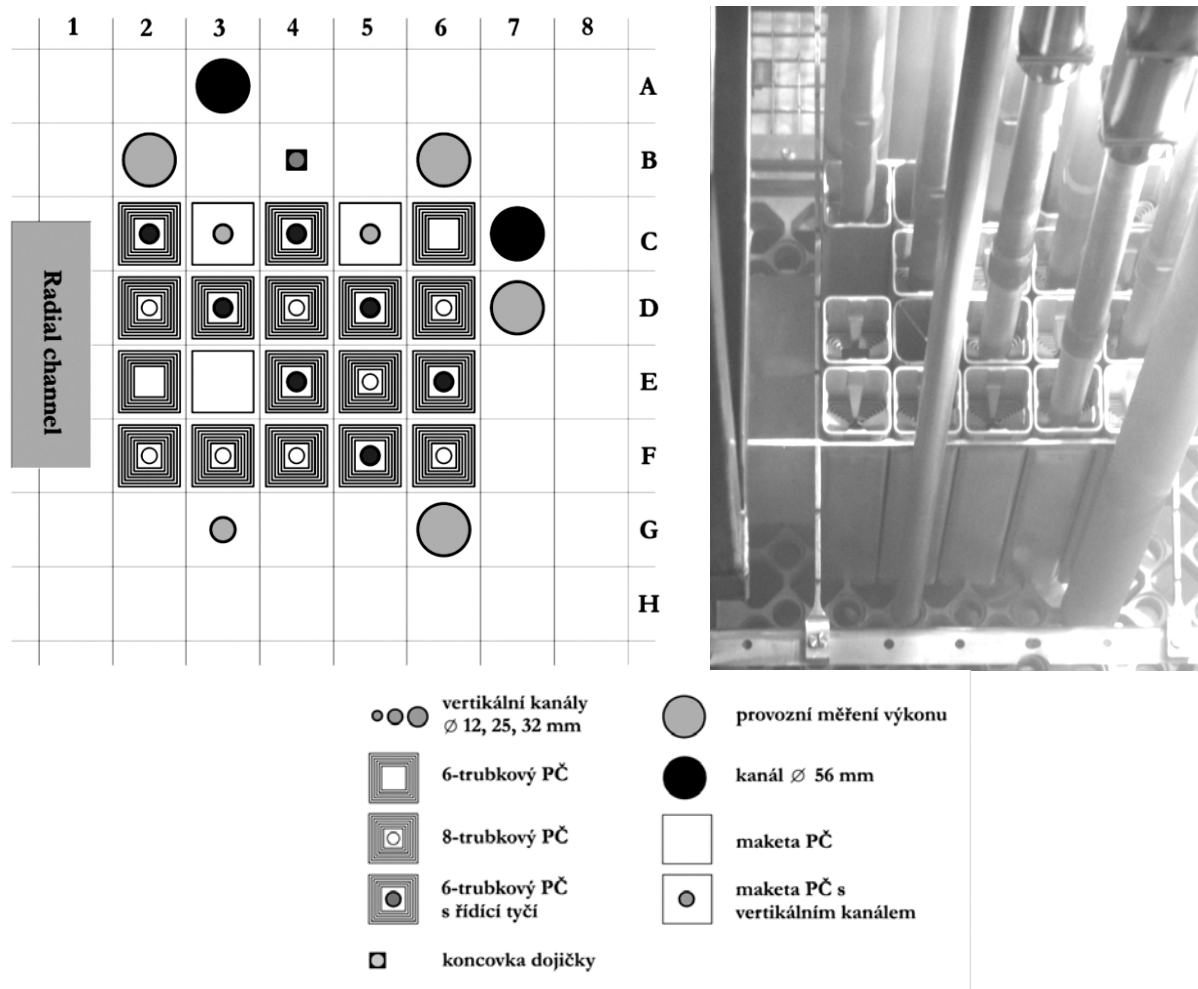
**Obr. 18 Měření a výpočty**

#### JAK SE S TÍM VYPOŘÁDÁ PROVOZ REAKTORU

---

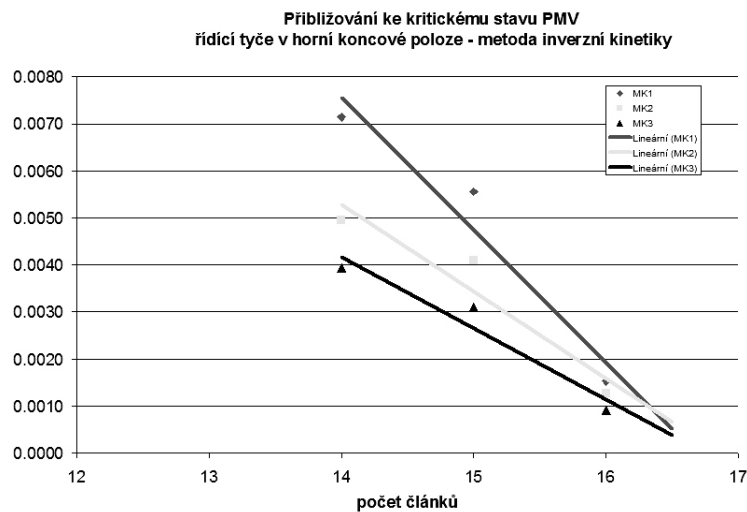
Než jsme se do záměny paliva pustili, provedli jsme všechny potřebné výpočty. Jednalo se především o neutronově fyzikální, termohydraulické, bezpečnostní analýzy. Byl připraven program základního kritického experimentu s konfigurací aktivní zóny označenou C1. To vše bylo nutno provést předem, aby byl řádně oceněn vliv změny paliva na provoz reaktoru a určena optimální a zároveň i bezpečná konfigurace. Nezávislé výpočty se paralelně uskutečnily i v ANL (Argonne National Laboratory) v USA a shoda výsledků byla pozoruhodná.





**Obr. 19 Konečná konfigurace aktivní zóny C1 – a opravdu chybí založit jen ten poslední 17. článek**

Na základě souhlasu SÚJB jsme 14. října 2005 zahájili tzv. základní kritický experiment. Zvolená konfigurace aktivní zóny C1 reaktoru VR-1 a postupné přibližování ke kritickému stavu jsou na dolním obrázku.



**Obr. 20 Přibližování ke kritickému stavu – experiment potvrzuje výpočty**

**Kritický stav byl dosažen 18. října 2005 v 16.10.**



**Obr. 21** *Studenti KJR při vyhodnocování experimentálních dat*



**Obr. 22** *Velín reaktoru v průběhu základního kritického experimentu*

Experimentálně se potvrdila dobrá shoda s výpočty – v reaktoru VR-1 se tak dnes nachází 17 palivových článků IRT-4M. Rozhodně se tedy nepotvrdily škarohlídkové představy, že reaktor VR-1 VRABEC nebude s nízkou obohaceným palivem schopen provozu.



**Obr. 23** *Napětí ve velínu reaktoru těsně před dosažením 1. kritického stavu s palivem IRT-4M*

## PODĚKOVÁNÍ

Chceme upřímně poděkovat všem zainteresovaným organizacím a jejich pracovníkům, kteří se na záměně paliva podíleli. Společně si přejeme, aby náš školní reaktor VR-1 VRABEC byl i nadále bezpečně a spolehlivě provozován.

*Katedra jaderných reaktorů sponzoruje chov lenochodů v pražské ZOO. Lenochodí aktivita stěží vyvažuje naši do zdravého průměru.*



## Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s. – portrét společnosti

*Zdeněk Kříž\*, Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s.*

Ústav jaderného výzkumu v Řeži byl založen v červnu 1955 v rámci Československé akademie věd (ČSAV) a oslavil tedy loni 50 let své činnosti.

V roce 1972 se původní ústav rozdělil na dvě části: Ústav jaderné fyziky (ÚJF), který zůstal v rámci ČSAV, a Ústav jaderného výzkumu (ÚJV), který přešel pod gesci bývalé Československé komise pro atomovou energii (ČsKAE).

Na počátku roku 1993 byl ústav privatizován a je akciovou společností vlastněnou ČEZ, a.s. a Škoda JS.



Hlavními úkoly ÚJV Řež a.s. jsou nyní výzkum a vývoj a uplatňování výsledků výzkumu včetně manipulace s radioaktivními odpady s důrazem na:

- podporu státních orgánů, zejména MPO a SÚJB
- výzkum a služby pro jaderné elektrárny ČEZ, a.s., zaměřený na efektivnost a bezpečnost provozu
- rozvoj oborového informačního systému
- využití aplikací ionizujícího záření a ozařovacích služeb pro výzkum, průmysl a lékařství
- koordinace řešení zadní části palivového cyklu
- výzkum a služby v oblasti nakládání s jadernými odpady
- radiační chemie a výroba radiofarmak
- ochrana životního prostředí v návaznosti na využívání jaderných technologií
- příprava a výcvik odborníků pro jadernou oblast
- poskytování konzultací

Ústav je lokalizován v Řeži, přibližně 20 km severně od Prahy, a má detašovaná pracoviště na řadě dalších míst (Praha, Brno, Ostrava, Plzeň, Dukovany, Temelín). Ústav má celkem šest dceřiných společností, které poskytují speciální služby. V ústavu nyní pracuje asi 850 pracovníků, kteří jsou rozděleni do pěti hlavních technických divizí:

- divize jaderné energetiky a bezpečnosti
- divize integrity a technického inženýringu
- divize Energoprojekt Praha
- divize reaktorových služeb
- divize radiofarmak

V průběhu své existence se ústav podílel na výzkumu a vývoji různých typů reaktorů: plynového chlazeného CO<sub>2</sub>, rychlého chlazeného sodíkem a vodovodního typu VVER. V současné době se ústav zapojil do vývoje nových typů reaktorů tzv. čtvrté generace (VHTR, SCWR a MSR).

V oblasti hodnocení bezpečnosti nabízí ústav celou škálu analytických metod pro hodnocení bezpečnosti jaderných elektráren.

Dále ústav prováděl výzkum v oblasti zkoumání změn vlastností materiálů pod vlivem záření a zvyšování jejich odolnosti proti různým jevům.

---

\* kriz@ujv.cz

Ústav provozuje dva experimentální reaktory: LR-0 a LVR-15 zejména pro provádění fyzikálního a materiálového výzkumu a pro výrobu radioizotopů.

Ústav dlouhodobě provádí výzkum a vývoj metod v oblasti radioaktivních odpadů, a to zpevňování odpadů metodami bitumenace, cementace a vitrifikace, a dále skladování a ukládání radioaktivních odpadů.

Řada výzkumných činností nachází využití i v dalších průmyslových oblastech, jako je klasická energetika, chemický průmysl a dále letecký a ochranný průmysl.

Ústav má velmi aktivní kontakty s řadou předních výzkumných institucí v Evropě i ve světě (GRS, IRSN, CEA, NRC, IAE Kurčatova) a je zapojen do řady mezinárodních programů MAAE, OECD/NEA a Evropské unie (JRC).

Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s. reprezentuje v současné době moderní firmu s velkým know-how, silným lidským a technickým potenciálem, která dokáže pružně reagovat na potřeby svých zákazníků a nabízí jim celou škálu služeb na vysoké technické úrovni.

Ústav jaderného výzkumu v Řeži je kolektivním členem České nukleární společnosti.

adresa společnosti: ÚJV Řež, a.s.  
Husinec-Řež č. 130  
250 68 – Řež

Pokud se chcete o ústavu dozvědět více, informace naleznete na webové stránce [www.ujv.cz](http://www.ujv.cz).



## Perspektivy společnosti ŠKODA JS a.s.

Josef Říha\*, ŠKODA JS a.s.

Společnost ŠKODA JS, a.s. se již padesát let zabývá inženýringem a dodávkami pro jadernou energetiku. Písmena JS v názvu společnosti označují jaderné strojírenství. V letech 2001 a 2002 prošla restrukturalizací, během níž byly opuštěny ztrátové obory podnikání a počet oborů byl zúžen na pět jaderných a jeden nejaderný v oblasti petrochemie a plynárenství. Zároveň byl snížen počet pracovníků ve firmě z původních 1 200 v roce 2000 na dnešních 730. Dvě třetiny z tohoto počtu představují odborné technické a administrativní profese (projektanti, konstruktéři, výpočtáři, pracovníci laboratoří a zkušeben, prodejci, ekonomové), třetinu tvoří dělnické profese. V roce 2004 do společnosti vstoupil nový vlastník – ruská strojírenská skupina OMZ, která je zárukou perspektivního rozvoje nosného oboru jaderné energetiky ve firmě.

Rok 2004 byl již pátým v pořadí, který společnost ŠKODA JS, a.s. ukončila se ziskem. Tržby za dodané výrobky a služby činily více než 2,5 miliardy Kč. Poměr jaderných a nejaderných zakázek, vztažený na několik posledních let, je přibližně 2:1.

K hlavním současným projektům společnosti patří **Obnova systému kontroly a řízení jaderné elektrárny Dukovany**. Akce v hodnotě několika miliard Kč je zároveň největším českým jaderným projektem v tomto desetiletí. ŠKODA JS v roli generálního dodavatele při plánovaných odstávkách postupně do roku 2009 nahradí zastaralý systém řízení novým digitálním. Druhým významným programem je **výroba pohonů řídicích tyčí pro regulaci výkonu reaktoru typu VVER**. Toto zařízení spolu s moderním řídicím systémem dodává ŠKODA JS hlavně na velký ukrajinský trh, analogické zařízení ale potřebují i české, slovenské a maďarské jaderné elektrárny. Třetí skupinou, která představuje významný podíl na tržbách společnosti, je **výroba kontejnerů pro transport a skladování vyhořelého jaderného paliva**. ŠKODA JS ve spolupráci s německým partnerem tyto kontejnery dodává společnosti ČEZ, a.s. a rovněž na trh v západní Evropě a v Litvě. Dosud bylo vyrobeno více než dvě stě kontejnerů.

K referencím z poslední doby patří výstavba závodu na úpravu zemního plynu v ruském Sosnogorsku. Tento nejaderný projekt „na klíč“ v hodnotě více než 100 milionů euro, byl uveden do provozu a předán zákazníkovi v prosinci 2004.

Významný je nárůst nových zakázek v oblasti servisu pro jaderné elektrárny, jejichž zařízení je potřeba pravidelně kontrolovat a v závislosti na délce provozu modernizovat. Pozornost se obrací na celý trh reaktorů VVER ve východní Evropě. Příkladem průniku do nového teritoria je podepsání kontraktu na provozní prohlídky tlakové nádoby reaktoru na jaderné elektrárně Metsamor v Arménii, které tým ŠKODA JS již také uskutečnil.

ŠKODA JS opírá své strategické záměry o dobrou znalost trhu, který potřebuje obnovit své jaderné kapacity. Po období útlumu v devadesátých letech minulého století se Evropa i americký kontinent vracejí k jaderné energetice. Důkazem je objednávka nového bloku pro Finsko nebo desítky nových žádostí o prodloužení licence k provozu amerických reaktorů. Obecně známé jsou rozsáhlé investiční záměry Číny, výstavbu jedenácti nových bloků v příštích 25 letech nyní oznámila Ukrajina.

Inženýrský a výrobní potenciál zůstal ve společnosti zachován i v nelehkém období, které nebylo jaderné energetice příznivě nakloněné, a ŠKODA JS je dnes schopna jít do soutěže o nové investiční projekty a dodávky zařízení. Evidentním projevem důvěry ve schopnosti firmy je nedávno uzavřený kontrakt na dodávku vnitřních částí reaktoru EPR pro již zmiňovaný nový jaderný blok ve finské lokalitě Olkiluoto.

---

\* josef.riha@skopda-js.cz

Po úspěšné závěrečné komplexní zkoušce v délce trvání 144 hodin byl 20. května 2005 mezi generálním kontraktorem ŠKODA JS, a.s. a zákazníkem ČEZ, a.s. podepsán protokol o převzetí nového modernizovaného systému kontroly a řízení SKŘ na třetím bloku Jaderné elektrárny Dukovany.



**Obr. 1 Modernizovaný lineární krokový pohon řídicích tyčí LKP-M pro reaktory VVER 1000 – montáž bloku elektromagnetů**



**Obr. 2**



Obr. 3



Obr. 4

Pro mezisklad vyhořelého paliva v Dukovanech bylo vyrobeno šedesát kontejnerů typu CASTOR<sup>®</sup> 440/84 (obr. 3). Na obr. 4 je sekce kompaktní mříže na skladování vyhořelého paliva pro Záporožskou jadernou elektrárnu.



Obr. 5

Obrázek 5 znázorňuje hlavice a patice pro čerstvé palivo VVER 440 finské JE Loviisa (zákazník f. BNFL).



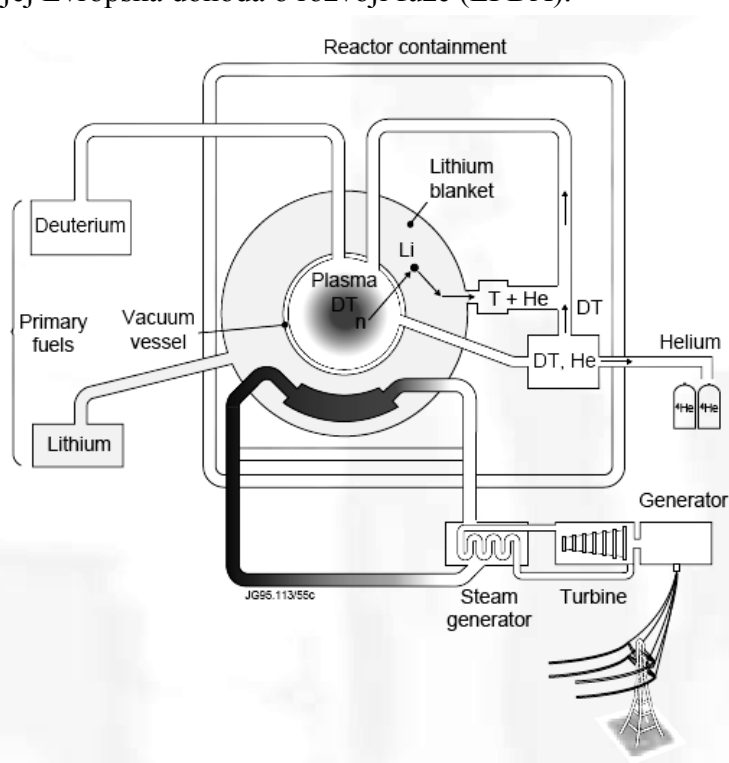
## Výzkumné zařízení JET

Martin Přeček\*, *Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT v Praze*

V říjnu 2005 jsem měl možnost navštívit v britském Culhamu nedaleko Oxfordu středisko se zatím největším zařízením pro výzkum řízené termojaderné fúze na světě – JET. Na následujících řádcích stručně popíšu hlavní technické aspekty tohoto zařízení, ale jinak všem čtenářům doporučuji stránky [www.jet.efda.org](http://www.jet.efda.org), na kterých se dozví mnohem více. Zkratka JET označuje Joint European Torus, tedy v překladu Sdružený evropský torus. Nejdůležitějším prvkem zařízení je totiž „tokamak“ – nádoba tvaru toroidu (či jinak anuloidu nebo laicky pneumatiky) obmotaná cívkami, které vytváří magnetické pole sloužící k udržení vysokoteplotního plazmatu (plynu kladných iontů a elektronů). Výzkumné středisko spravuje Komise pro atomovou energii Spojeného království (UKAEA), nicméně výzkumu zde se účastní vědci z celé Evropy (i z Česka) a zastřešuje jej Evropská dohoda o rozvoji fúze (EFDA).

Výzkum termojaderné fúze směřuje k mírovému využití jaderné energie, která se uvolňuje při slučování (fúzi) lehkých atomových jader (prozatím do úvahy připadají lehký vodík – protium  $^1\text{H}$ , těžký vodík – deuterium  $^2\text{H}$  označované D, velmi těžký vodík – tritium  $^3\text{H}$  značený jako T, lehké helium  $^3\text{He}$ , izotopy lithia  $^6\text{Li}$  a boru  $^{11}\text{B}$ ). Technologicky nejnázemněji dosažitelnou je tzv. D-T fúze, kterou popisuje termojaderná reakce:  $\text{D} + \text{T} \rightarrow ^4\text{He} + \text{n}$ . Asi 80 % energie z této reakce odnáší nenabitý neutron. Jedná se o velmi energetickou reakci, energie reakce 1 kilogramu směsi D+T je rovna teplu uvolněného spálením 8 milionů litrů kvalitního benzínu. Zatímco deuteria je v přírodě velmi hojně (asi 1 kg deuteria je v každých 60 tunách obyčejné vody, což je množství, jež proteče za necelou sekundu řekou Vltavou v Praze), tritium je radioaktivní o poločasu 12,3 let, a tudíž se vyskytuje v přírodě jen ve stopových koncentracích. Proto jej fúzní elektrárna bude muset sama vyrábět reakcí vzniklých neutronů s lithiem:  $\text{n} + ^6\text{Li} \rightarrow \text{T} + ^4\text{He}$ , jehož zásoby jsou dostatečně hojné.

Přestože termojaderná puma byla funkčně otestována již v roce 1952, pouhých sedm let po vyzkoušení (a použití) první štěpné jaderné zbraně, nestojí zatím žádné fúzní elektrárny, zatímco štěpné elektrárny již fungují přes půl století. Příčinou tohoto rozdílného stavu jsou odlišné fyzikální podmínky, za kterých je možné tyto rozdílné jaderné reakce provozovat. Zatímco štěpné reakce probíhají v relativně širokém rozsahu teplot a tlaků zahrnujících normální pozemské podmínky, k fúzním reakcím dochází pouze při extrémně vysokých teplotách anebo tlacích (hustotách). V přírodě probíhají fúzní reakce například ve středu hvězd a v případě



Přestože termojaderná puma byla funkčně otestována již v roce 1952, pouhých sedm let po vyzkoušení (a použití) první štěpné jaderné zbraně, nestojí zatím žádné fúzní elektrárny, zatímco štěpné elektrárny již fungují přes půl století. Příčinou tohoto rozdílného stavu jsou odlišné fyzikální podmínky, za kterých je možné tyto rozdílné jaderné reakce provozovat. Zatímco štěpné reakce probíhají v relativně širokém rozsahu teplot a tlaků zahrnujících normální pozemské podmínky, k fúzním reakcím dochází pouze při extrémně vysokých teplotách anebo tlacích (hustotách). V přírodě probíhají fúzní reakce například ve středu hvězd a v případě

\* MARTIN@PRECEK.cz

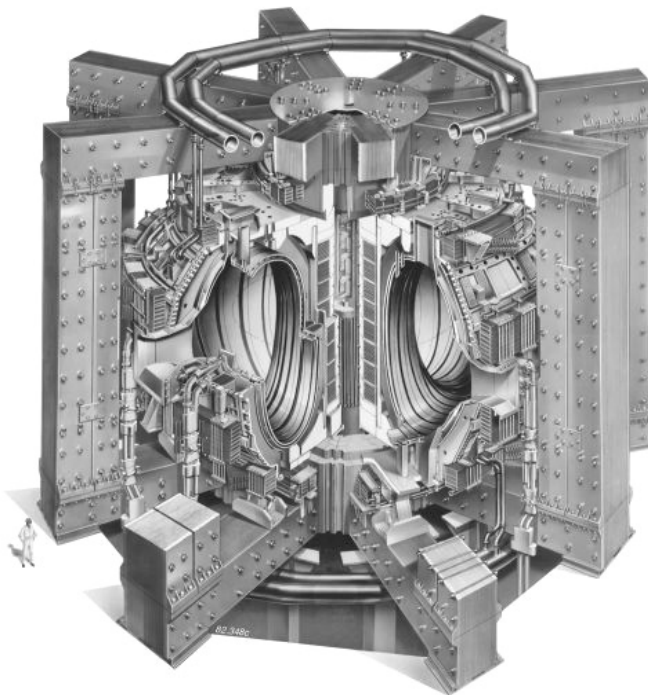


našeho Slunce je jeho vnitřní teplota asi 15 milionů kelvinů při hustotě 130 kilogramů na jeden litr. Naše civilizace zatím není schopna účinně reprodukovat tyto podmínky po dobu dostatečně dlouhou k zužitkování energie, jež se z hmoty v tomto stavu uvolňuje. Nicméně během posledního půlstoletí byl učiněn velký pokrok při vývoji fúzní technologie.

Udržení podmínek po dobu dostatečnou k účinnému průběhu reakce je klíčovým problémem ve výzkumu termojaderné fúze. Byly přijaty dva druhy přístupu k této problematice. První přístup spočívá v tzv. inerciálním (setrvačném) udržení plazmatu. Ten dosahuje termojaderné fúze pomocí prudkého stlačení a zahřátí malého množství deuteria a tritia rázovou vlnou výbuchu obálky, v níž jsou oba izotopy vodíku umístěny. Výbuch je vytvořen intenzivním impulzem energie (většinou využívány vysokovýkonové laserové svazky) soustředěným ze všech stran na malou kapsli s termojaderným palivem. Tento přístup dosahuje velmi vysokých teplot a hustot, které v nejnovějších experimentech postačují ke „spálení“ několika procent původně přítomného deuteria a tritia. Přestože v relativní části spáleného paliva je tento přístup úspěšný, není příliš spojován s budoucím využitím v energetice.

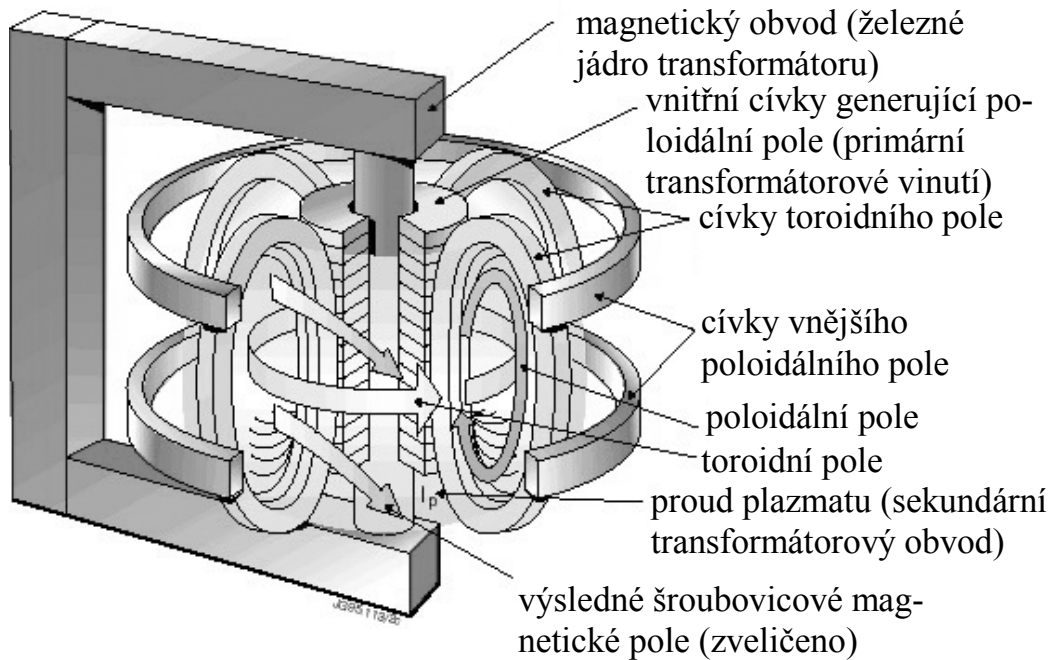
Druhý způsob využívá tzv. magnetického udržení. Plazma je složeno z nabitých částic, jež díky svému náboji nemohou prostupovat kolmo na siločáry dostatečně intenzivního magnetického pole. Jeden z nevhodnějších tvarů magnetického pole pro takové udržení je právě toroid či jeho mírně deformované podoby. V tomto uspořádání jsou totiž všechny siločáry magnetického pole uzavřené, a pokud by nedocházelo k dalším jevům (ono k nim totiž bohužel dochází), plazma by z magnetické „nádoby“ nemohlo uniknout. Kromě původně ruského „tokamaku“ (v překladu z ruštiny „toroidální komora v magnetických cívkách“) existuje ještě „stelarátor“ původem z USA. Přes některé výhody stelarátorů jsou však pro výzkum fúzní energetiky uvažovány zatím spíše tokamaky kvůli své větší flexibilitě. V tokamaku lze principiálně dosáhnout udržení stálé kontrolovatelné termojaderné reakce, čímž se pravděpodobně hodí pro energetiku více než impulzní metody, které jsou však o něco napřed na cestě k procesu, ze kterého se uvolní více energie, než se spotřebuje.

Hlavní parametry, kterými je možné popsat tokamak JET, jsou jeho rozměry. Toroidální nádoba je 4,2 metrů vysoká a má 6 metrů v průměru, přičemž průřez tubusem není kruhový, ale ve tvaru D – tzv. poloidální (půlměsíčkový), o svislém průřezu 4,2 metry a vodorovném 2,5 metru. Nádobu vodorovně obepíná 32 měděných cívek tvaru D, vytvářejících základní toroidální pole. Strukturu však dominuje 8 ohromných sružených železných rámu, v nichž je jako v kleci uvězněna nádoba i s cívkami. Rámy tvoří transformátorové jádro pro první ze systémů pro ohřev plazmatu. Cívka primárního vinutí je obtočená okolo sružené „nohy“ rámu, kterou prochází svíslá středová osa celého zařízení. Sekundárním vinutím transformátoru je vodivé plazma samotné. Indukované proudy produkované tímto systémem vytváří tzv. poloidální magnetické pole a dosahují několika milionů ampér, kdy se začne citelně projevovat tepelná energie produkovaná ohmickým odporem plazmatu. Poslední skupina šesti cívek vodorovně obtáčí nádobu a slouží k úpravě a stabilizaci tvaru výsledného helikálního (šroubovitého) pole.



toroidální pole. Strukturu však dominuje 8 ohromných sružených železných rámu, v nichž je jako v kleci uvězněna nádoba i s cívkami. Rámy tvoří transformátorové jádro pro první ze systémů pro ohřev plazmatu. Cívka primárního vinutí je obtočená okolo sružené „nohy“ rámu, kterou prochází svíslá středová osa celého zařízení. Sekundárním vinutím transformátoru je vodivé plazma samotné. Indukované proudy produkované tímto systémem vytváří tzv. poloidální magnetické pole a dosahují několika milionů ampér, kdy se začne citelně projevovat tepelná energie produkovaná ohmickým odporem plazmatu. Poslední skupina šesti cívek vodorovně obtáčí nádobu a slouží k úpravě a stabilizaci tvaru výsledného helikálního (šroubovitého) pole.

Na dně nádoby se nachází nejzajímavější část JET – tzv. divertor, který slouží k odběru „spalin“ termojaderné reakce, které by ji jinak „uhasily“, a tudíž je pro vývoj kontinuálně pracující termojaderné elektrárny nepostradatelný.



Kovová vakuová nádoba je zevnitř pokrytá zvláštními bloky tvořenými převážně uhlíkem, které však na povrchu v kontaktu s plazmatem mají vrstvičku berylia. Berylium je prvek s nejnižším protonovým číslem, který již je jako kov použitelný pro konstrukční účely. Právě berylium a uhlík se vyznačují nízkými protonovými čísly ( $Z = 4$ , resp.  $6$ ), což je nesmírně důležité pro snadné udržování plazmatického výboje po delší dobu. Kontaktem plazmatu se stěnami nádoby se povrchové části zplyní, ionizují, a stávají se tak jeho součástí. Atomová jádra s vysokým protonovým číslem však plazma výrazně ochlazují, proto je přítomnost jim příslušných chemických prvků ve vnitřním pokrytí nádoby nežádoucí. Berylium je navíc důležité pro množení počtu neutronů vzniklých termojadernými reakcemi. Jadernou reakcí berylia s rychlým neutronem ( ${}^9\text{Be} + n \rightarrow 2\,{}^4\text{He} + 2n$ ) vznikají kromě dvou jader helia dva rychlé neutrony. V budoucnosti uvažované termojaderné elektrárně bude tedy docházet ke zvyšování neutronového toku procházejícího beryliem, aby množství neutrony vyprodukovaného tritia bylo stejné jako množství, které se spotřebuje v termojaderných reakcích s deuteriem (pokud totiž uvažujeme ztráty neutronů absorpcí, pak by byla produkce tritia v lithiovém blanketu bez berylia nedostatečná, v současnosti mimochodem tritium v dostatečném množství pro pokusy s fúzí i pro jiné účely produkují kanadské těžkovodní štěpné jaderné reaktory CANDU zachytem neutronů na deuteriu v těžké vodě  $\text{D}_2\text{O}$ ). Protože berylium je velmi toxický prvek a v průběhu fúzní reakce dochází k aktivaci komponent zařízení, byl vyvinut dálkově ovládaný robotický systém pro manipulaci s komponentami uvnitř nádoby.

Plazma uvnitř nádoby je třeba zahřívat na velmi vysoké teploty. K tomu slouží celkem tři systémy. Prvním je již zmíněný ohřev transformátorovým proudem, druhým je ohřev pomocí mikrovln generovaných radiofrekvenčním rezonátorem (jako v mikrovlnné troubě) a třetí spočívá v bombardování plazmatu urychlenými neutrálními atomy (kladné protony z urychlovače se neutralizují zachytem elektronu při průchodu neutrálním plynem a jsou vstřelovány přímo do nádoby). Kinetická energie vodíkových atomů je vyšší než střední energie nabitých

částic v plazmatu, takže následnými srážkami zvyšují teplotu plazmatu. Chlazení celého zařízení zajišťuje voda.

Všechny systémy zařízení JET spotřebují velké množství energie. Při průběhu jednoho pulzu – jednoho nejvýše minutového pokusu s plazmatem – je potřeba elektrický příkon asi 500 MW (špičkově až 1 000 MW, což je výkon jednoho bloku v jaderné elektrárně Temelín). Z toho asi polovinu spotřebují měděné cívky toroidálního pole, okolo 100 MW je třeba na poloidální pole (ohmický ohřev a tvarování plazmatu) a dalších 150 MW vyžadují dodatečné ohřívací systémy (urychlené neutrální atomy a radiofrekvenční ohřev). Velká část areálu výzkumného střediska je proto pokryta zařízeními umožňujícími kumulaci, distribuci a transformaci elektrické energie. Je zde velká budova se dvěma elektromechanickými setrvačníky, ohromnými devítimetrovými železnými kolesy o hmotnosti 775 tun, které při „nabitém“ stavu rotují 225krát za minutu. Dále je zde budova s kapacitory – skladovači rozdělených nábojů – a navíc dvě transformátorové stanice pro příjem proudu z národní elektrické sítě (5 kilometrů od JET se nachází obří uhelno-plynová elektrárna Didcot o souhrnném výkonu 3 200 MW). V JET bylo v roce 1997 dosaženo zatím rekordních 16 MW fúzního výkonu, což v poměru k přímému energetickému příkonu do plazmatu 25 MW tvoří 64 % a naznačuje budoucí dosažení bodu soběstačnosti, kdy již plazma vyprodukuje více energie, než se do něj vloží. Většina obřích energetické nároků je však nepřímá a nesouvisí přímo s plazmatem, především je způsobuje užití měděných cívek s relativně velkým odporem. Ve francouzském tokamaku Tore Supra jsou cívky supravodivé a celkové energetické nároky tudíž řádově nižší.

V současnosti směřuje mezinárodní výzkum ke stavbě experimentálního reaktoru ITER ve francouzské Cadarache. V tomto reaktoru budou sloučeny špičkové technologie z předních fúzních experimentů jako Tore Supra (supravodivé cívky, aktivní chlazení stěn nádoby) i z britského JET (divertor, systémy ohřevu, dálková manipulace). Podle plánů dosáhne fúzní výkon v plazmatu 500 tepelných MW při asi 100 MW příkonu, takže vyprodukuje 5krát více energie, než se do něj vloží. Dobu udržení plazmatu zatím odhadují konstruktéři až na desítky minut (v poměru k současné 1 minutě v zařízení JET). Nicméně ani ITER ještě nebude fúzní elektrárnou, tou bude až demonstrační projekt s pracovním názvem DEMO a jeho první prototypový komerční následník PROTO. Odhadovaný časový horizont pro zprovoznění komerční fúzní energetiky je tedy rok 2050. Ještě asi půl století tedy fúzní energetika potřebuje ke svému zprovoznění a právě experimentální zařízení JET odvedlo a ještě odvede velký kus práce vedoucí k tomuto okamžiku.

## Informace o jaderné energetice

Václav Bláha\*, Viceprezident České nukleární společnosti

### ČASOPISECKÁ LITERATURA

- 
- [1] Duda V.: *Systém nakládání s radioaktivními odpady*. Energetika **55**, č. 2 (2005) 60.
  - [2] Vaněk V.: *Bez jádra to nepůjde*. Energetika **55**, č. 2 (2005) 62.
  - [3] Komárek A.: *Jaderná energetika v globalizujícím se světě. Část 1 – Nabídka jaderné energetiky*. Česká energetika, č. 2 (2002) 13.
  - [4] Fleischhans J.: *Radioaktivní odpady z jaderných elektráren*. Česká energetika, č. 3 (2002) 6.
  - [5] Spilka P.: *Energetické potřeby lidstva*. Česká energetika, č. 3 (2002) 10.
  - [6] Komárek A.: *Jaderná energetika v globalizujícím se světě. Část 2 – Poptávka po jaderné energetice*. Česká energetika, č. 4 (2002) 4.
  - [7] Nachmilner L.: *Ukládání vyhořelého paliva doma a ve světě*. Česká energetika, č. 4 (2002) 12.
  - [8] Matějka K.: *Evropské jaderné vzdělávání*. Česká energetika, č. 4 (2003) 4.
  - [9] Šemberová V.: *SÚRAO připravuje geologické práce na šesti lokalitách*. Česká energetika, č. 3 (2003) 5.
  - [10] Čechák T.: *Ionizující záření a radioaktivní prvky kolem nás*. Česká energetika, č. 4 (2003) 10.
  - [11] Grunda Z., Spilka P.: *Nulová varianta, jaderný šrot a trpaslíci*. Česká energetika, č. 4 (2003) 14.
  - [12] Spilka P.: *Potřebuje Česká republika další jadernou elektrárnu?*. Česká energetika, č. 1 (2004) 12.
  - [13] Burket D., Rataj J.: *Vývoj palivového cyklu JE Dukovany*. Česká energetika, č. 1 (2004) 14.
  - [14] Rataj J.: *OBNINSK 1954 – první jaderná elektrárna na světě*. Česká energetika a elektrotechnika, č. 3 + 4 (2004) 8.
  - [15] Sviták F.: *Jaderná energie a problematika vyhořelého paliva*. Energie kolem nás, č. 5 (2005) 3.
  - [16] Matějka K.: *Je jaderná energetika dosud něčím výjimečná?* Energie kolem nás, č. 6 (2005) 4.
  - [17] Komárek A.: *Jaderná energetika a nové ideje. Část 1 – Výchozí nové ideje*. Energie kolem nás, č. 4 (2004) 3.
  - [18] Komárek A.: *Jaderná energetika a nové ideje. Část 2 – Nové ideje při narůstající ekologické a sociální krizi*. Energie kolem nás, č. 5–6 (2004) 3.
  - [19] Kubín M.: *Otevřené problémy klimatu, emise CO<sub>2</sub> a energetika*. Energie kolem nás, č. 5–6 (2004) 14.
  - [20] Matějka K., Sklenka L.: *Školní reaktor VR-1 již dvanáct let připravuje odborníky pro českou jadernou energetiku*. Bezpečnost jaderné energie **11**, č. 5/6 (2003) 170.

---

\* blahavac@quick.cz

KNIŽNÍ LITERATURA (VČETNĚ SKRIPT A SBORNÍKŮ)

---

- [1] Bachor P.: *Energie pro 21. století*. Agentura KRIGL, Praha 2003.
- [2] Curieová E.: *Paní Curieová*. Mladá fronta, Praha 1964.
- [3] Jungk R.: *Jasnější než tisíc sluncí (Osudy atomových vědců)*. Mladá fronta, Praha 1965.
- [4] Běhounek F.: *Atomový věk*. Mladá fronta, Praha 1956.
- [5] Prášil Z. a kol.: *Užitečné záření*. ČSKAE Zbraslav 1991.
- [6] Porritt J.: *Zachraňme Zemi*. Zemědělské nakladatelství Brázda, Praha 1992.
- [7] Kuča L., Zběhlík J.: *50 let Ústavu jaderného výzkumu v Řeži 1955–2005*. Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s., Řež 2005.
- [8] Klik F.: *Úspěchy a milníky – 50 let Ústavu jaderného výzkumu*. Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s., Řež 2005.
- [9] Kříž Z.: *Vstupujeme do 21. století*. Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s., Řež 2005.

## Jaderně energetická zařízení v České republice

*Václav Bláha\*, Viceprezident České nukleární společnosti*

V České republice máme v současné době v provozu pět jaderně energetických zařízení: dvě jaderné elektrárny v Dukovanech a na Temelíně, výzkumné reaktory LR-0 a VVR-S (dnes LVR-15) v Ústavu jaderného výzkumu Řež a školní reaktor VR-1 na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské v Praze.

### JADERNÁ ELEKTRÁRNA DUKOVANY

#### Historie

Pro Jadernou elektrárnu Dukovany bylo vybráno místo v blízkosti jihomoravského Třebíče na pravém břehu řeky Jihlavy. Výběr místa podléhá mnoha kritériím podle předpisů Mezinárodní komise pro atomovou energii (MAAE). Mezi hlavní kritéria patří vhodné geologické podmínky, kterým tato lokalita bezesbýtku vyhovuje.

Historie této jaderné elektrárny začíná v roce 1970, kdy Československo a Sovětský svaz podepsaly mezivládní dohodu o výstavbě dvou jaderných elektráren, každá o výkonu 1760 MW. První byla vybudována v Jaslovských Bohunicích na Slovensku a druhá v Dukovanech. Výstavba v Dukovanech byla zahájena v dubnu roku 1974, v letech 1976–1978 byly práce přerušeny z důvodu přepracování projektu na modernější typ jaderného reaktoru VVER 440 – V 213. Práce byly obnoveny v červenci 1978 a o čtyři roky později, v listopadu 1982, byla do 1. bloku usazena tlaková nádoba reaktoru. V únoru 1985 proběhla poprvé řízená řetězová štěpná reakce, na plný výkon najel blok 26. března a od 3. května 1985 byl zahájen zkušební provoz. Postupně v letech 1986 a 1987 byly spuštěny další tři bloky a v červenci 1987 dosáhla elektrárna svého maximálního projektového výkonu 1 760 MW.

#### Základní parametry elektrárny

Počet bloků	4
Výkon reaktorového bloku	440 MW (elektrických)
Celkový instalovaný výkon	1 760 MW (elektrických)

#### Reaktor

Typ reaktoru	VVER 440 V 213
Tepelný výkon	1 375 MWt
Počet palivových kazet	312
Počet regulačních kazet	37

#### Parogenerátor

Počet parogenerátorů na 1 blok	6
Tlak páry	4,61 MPa
Teplota páry	260 °C
Teplosměnná plocha	2 510 m <sup>2</sup>
Parní výkon	452 t páry za hodinu

#### Turbogenerátor

Počet turbogenerátorů na blok	2
-------------------------------	---

#### Turbína

Jmenovitý výkon	220 MWe
-----------------	---------

\* blahavac@quick.cz

Otáčky 3 000 za minutu

## Generátor

Jmenovitý výkon 220 MWe  
Výstupní napětí 15,75 kV

## Provoz jaderné elektrárny

Od roku 1987, kdy začala Jaderná elektrárna Dukovany pracovat na plný výkon, dodává do rozvodné sítě každoročně více než 12 miliard kilowatthodin elektrické energie. Po celou dobu jejího provozu (1. blok je v plném provozu již 21 let) se vyznačuje spolehlivostí, nízkou poruchovostí a vysokou provozní bezpečností. Provoz elektrárny ušetří životní prostředí od zátěže 17 milionů tun oxidu uhlíku za rok, které by se uvolnily při spálení 11 milionů tun uhlí v uhelných elektrárnách.

Z technických a ekonomických důvodů jsou reaktorové bloky elektrárny provozovány dlouhodobě na plný výkon. Reaktorové bloky jsou plánovitě odstavovány jedenkrát za rok k provedení překládky paliva a nezbytných kontrolních a údržbářských prací. Vždy je odstaven pouze jeden reaktorový blok.

Provoz každého ze čtyř bloků elektrárny je automatický. Na správnou činnost automatických systémů dohlíží provozní personál na blokové dozorně, která je řídicím centrem každého bloku. Tato činnost je na každém bloku zajišťována šesti směnami, které se pravidelně střídají v nepřetržitém provozu. Pracovní doba jedné směny je 8 hodin. Směna je složena z vedoucího reaktorového bloku (VRB), operátora primární části, operátora sekundární části a manipulátora elektrozařízení. Fyzickou kontrolu provádí obsluhy jednotlivých zařízení, které spolupracují s personálem blokové dozorny při provádění veškerých kontrol a manipulací. Na provoz celé elektrárny dohlíží směnový inženýr.

## JADERNÁ ELEKTRÁRNA TEMELÍN

---

### Historie

Jaderná elektrárna Temelín je umístěna v Jižních Čechách v blízkosti Týna nad Vltavou. Rozhodnutí o výstavbě 1. a 2. bloku bylo vydáno v roce 1980. V roce 1987 byla zahájena výstavba provozních objektů. Na přelomu 90. let došlo k přehodnocení koncepce výstavby, pozastavení prací na 3. a 4. bloku a po několika mezinárodních auditech schválila vláda v březnu 1993 dostavbu JE Temelín. Na průběhu výstavby tohoto velmi složitého technického díla se nepříznivým způsobem podepsalo i vytváření nepříznivého společenského klimatu odpůrci jaderné energetiky v ČR i zahraničí, jejichž mnohokrát zcela irelevantním argumentům byla věnována ze strany médií značná pozornost. Přes řadu technických obtíží a přes tyto skutečnosti se podařilo dovést dílo do konce a dne 11. ledna 2002 bylo na 1. bloku dosaženo projektového výkonu 3 000 MWt (1 000 MWe). Na 2. bloku bylo maximálního projektového výkonu poprvé dosaženo 3. března 2003.

### Základní parametry elektrárny

Počet bloků 2  
Instalovaný výkon jednoho bloku 981 MWe  
Typ reaktoru Tlakovodní VVER 1000, V 320

### Reaktor

Tepelný výkon 3 000 MWt

### Aktivní zóna

Počet palivových kazet 163  
Počet palivových proutků v kazetě 312  
Obohacení paliva max. 5 % <sup>235</sup>U

Celková hmotnost paliva (UO <sub>2</sub> )	92 t
Palivový cyklus	4 roky
<b>Primární okruh</b>	
Počet cirkulačních smyček	4
Objem chladiva v primárním okruhu	337 m <sup>3</sup>
Pracovní tlak	15,7 MPa
Teplota chladiva na vstupu do aktivní zóny	cca 290 °C
Teplota chladiva na výstupu z aktivní zóny	cca 320 °C
Průtočné množství chladiva reaktorem	84 800 m <sup>3</sup> za hodinu
<b>Parogenerátor</b>	
Počet na blok	4
Parní výkon na jeden parogenerátor	1 470 t za hodinu
Tlak páry na výstupu z parogenerátoru	6,3 MPa
Teplota páry na výstupu z parogenerátoru	278,5 °C
<b>Ochranná obálka ( kontejment )</b>	
Výška válcové části	38 m
Vnitřní průměr válcové části	45 m
Tloušťka stěny	1,2 m
Tloušťka vnitřní nerezové výstelky	8 mm
<b>Turbogenerátor</b>	
Počet na blok	1
Turbína	1 VT díl + 3 NT díly
Otáčky	3 000 za minutu
Výstupní napětí alternátoru	24 kV
Chlazení alternátoru	kapalný vodík

Další informace o obou těchto elektrárnách a mnoho dalších zajímavostí o jaderné energetice máte možnost se dozvědět v informačních centrech obou elektráren.

---

## VÝZKUMNÉ REAKTORY V ÚSTAVU JADERNÉHO VÝZKUM ŘEŽ, A.S.

---

### Lehkovodní reaktor LR-0

Reaktor LR-0 představuje ojedinělé experimentální zařízení, které dovoluje studovat statické a přechodové stavy v aktivních zónách typu VVER 1000 a VVER 440. Reaktor pracuje v běžném provozu s výkonem 0,1 až 400 W, nejvyšší povolený výkon 5 kW smí být použit po dobu nepřesahujícím 1 hodinu. Palivové proutky obsahují tablety UO<sub>2</sub> s různým obohacením <sup>235</sup>U, což umožňuje provádět experimenty na velkém množství konfigurací aktivní zóny. První kritičnosti bylo dosaženo v prosinci 1982 a do dnešních dnů pracuje reaktor velmi spolehlivě. Mezi nejdůležitější projekty, které jsou na tomto zařízení realizovány, patří zejména:

- měření parametrů aktivních zón
- výzkum neutronově-fyzikálních charakteristik kompaktních skladů pro palivo typu VVER
- prostorová kinetika VVER-1000
- vliv havarijně regulační kazety VVER-440

### Reaktor VVR-S ( LVR-15)

V září 1957 byla v Československu poprvé uskutečněna řízená štěpná řetězová reakce v jaderném reaktoru v Ústavu jaderného výzkumu v Řeži u Prahy. Výzkumný jaderný reaktor VVR-S

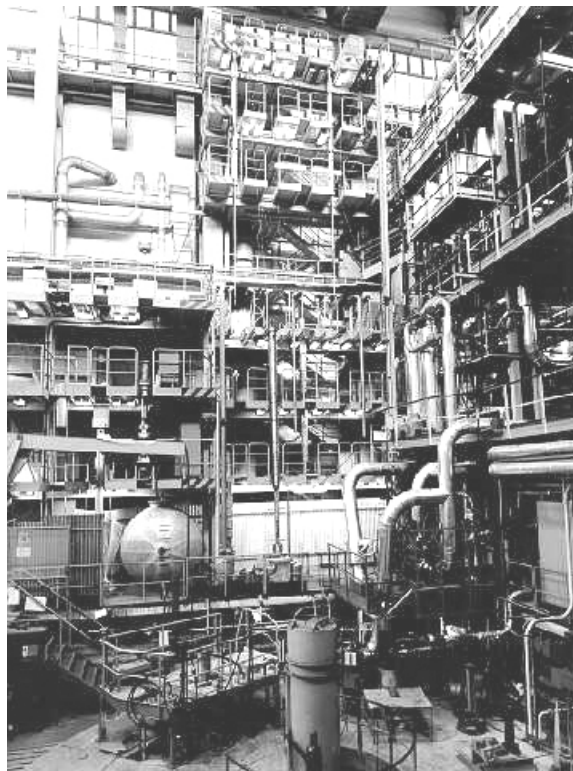


s tepelným výkonem 2 MW byl vybudován s cílem zajistit výzkumnou základnu pro experimenty v oboru neutronové a reaktorové fyziky a výrobu radioizotopů. V pozdějších letech byl několikrát rekonstruován a výkon byl zvýšen až na dnešních 10 MW. Od roku 1989 nese označení LVR-15. Aktivní zóna reaktoru je tvořena 28–34 palivovými články typu IRT-2M. V letech 1994 až 2000 byl reaktor postupně vybaven pěti reaktorovými smyčkami.

Reaktor LVR-15 je využíván především pro materiálový výzkum ve vodních smyčkách a sondách. Ve smyčkách a sondách je prováděn výzkum současného působení záření, chemického režimu a vysokého tlaku a teploty na změny materiálových vlastností a korozi konstrukčních materiálů. Dále je reaktor LVR-15 využíván pro následující oblasti:

- krátkodobé ozařování vzorků pro neutronovou aktivační analýzu pomocí pneumatické potrubní pošty
- ozařování radiačně dopovaných monokrystalů křemíku ve vertikálních rotačních ozařovacích kanálech
- ozařování vzorků ve vertikálních kanálech v palivu nebo reflektoru pro výzkum a výrobu radioizotopů pro radiofarmaka
- aplikaci neutronové záchytné terapie při ozařování pacientů
- experimenty v horizontálních kanálech

Svazky neutronů vyváděné z reaktoru horizontálními kanály jsou využívány dalšími institucemi k základnímu i aplikovanému výzkumu.



**Vodní smyčka**

## Aktuality České nukleární společnosti

REAKTOR TŘETÍ GENERACE SPOLÉHÁ NA FYZIKÁLNÍ ZÁKONY

září 2005

**Firma Westinghouse Electric Company, která mimo jiné dodala řídicí technologii do elektrárny Temelín, získala od amerického Regulačního úřadu pro jadernou energii (NRC) bezpečnostní a konstrukční osvědčení pro pokročilý reaktor AP 1000. Tím se AP 1000 stává nejbezpečnějším a nejekonomičtějším reaktorem s osvědčením od NCR na světě.**

Nový reaktor AP 1000, vývojově navazující na menší tlakovodní reaktor AP 600, dosahuje výkonu až 1 154 MWe a má životnost 60 let. Projektanti se při vývoji drželi zásady, že jednoduchost rovná se bezpečnost a ekonomičnost. Výsledkem je reaktor, jenž obsahuje o 50 % méně ventilů, o 83 % méně potrubí, o 87 % méně kontrolních kabelů a o 35 % méně čerpadel než velikostně srovnatelné konvenční reaktory. Viceprezident sekce jaderných elektráren firmy Westinghouse Jack Allen k tomu říká: „Jelikož AP 1000 obsahuje výrazně méně čerpadel, potrubí a kabelů, znamená to, že se instaluje, kontroluje a udržuje mnohem méně položek, čímž se zvyšuje bezpečnost a snižuje cena.“

Dalším výrazným bezpečnostním prvkem je systém takzvané pasivní bezpečnosti. V případě potřeby zastaví jadernou reakci jednoduché fyzikální zákony na bázi gravitační síly, kondenzace či stlačování plynu. Nejenže se reaktor tedy nemusí několikrát zálohovat mechanickými bezpečnostními zařízeními, ale díky jednoduchosti systému se snižuje i rozsah potřebného zásahu ze strany operátora.

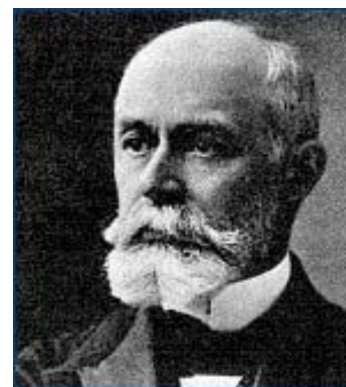
Reaktor je rozdělen na díly, které se skládají dohromady jako obrovská stavebnice. „Modulární konstrukce snižuje čas výstavby od momentu, kdy nalijete první beton, do zavážky paliva na 36 měsíců. Tím pádem i výrazně zkracujete dobu, po kterou je vázán investiční kapitál, tedy čas do začátku výroby elektřiny,“ dodává Allen. Reaktor AP 1000 se tak řadí do největší série reaktorů generace 3+.

Podle firmy Westinghouse se cena AP 1000 bude pohybovat mezi 1–1,2 tisíci dolarů na kilowatt výkonu. Investičně tedy bude reaktor na stejné úrovni jako moderní uhelné a plynové elektrárny při dnešních cenách paliva. Udělené osvědčení od NCR zvyšuje atraktivitu reaktoru pro vývoz. O AP 1000 již projevilo zájem několik společností z Evropy, Asie i Spojených Států. Prvním zákazníkem se zřejmě stane Čína.

PODIVNÁ ZÁŘE VE TMĚ

říjen 2005

S objevem **radioaktivity** je neodmyslitelně spjata jméno významného francouzského fyzika **Henriho Becquerela** (1852–1908). Jak už to u velkých objevů bývá, i k nalezení radioaktivity došlo spíše náhodně. Při studiu luminescence minerálů Becquerel zjistil, že přírodní uran vydává zvláštní, dosud neznámý druh záření. Nejprve se domníval, že se jedná o nějaký nový druh luminescence. Začátkem roku 1896 se mu však přihodila podivná věc: všiml si, že krystalky uranové soli, na které svítlo slunce, způsobují zčernání fotografické desky. Jaké bylo však jeho překvapení, když opakovanými pokusy zjistil, že na zčernání desky nemá vliv intenzita osvětlení, ale způsobuje ho samotná uranová sůl! Takové zjištění podnítilo v Becquerelovi ještě větší touhu proniknout do tohoto „nového tajemství“ přírody. Ná-



sledujícím podrobným výzkumem se mu podařilo potvrdit, že se skutečně jedná o zcela nový druh záření, které je odlišné od těch, které byly dosud známé (luminiscence, paprsky X).

Na výsledky výzkumu Becquerela navázala **Marie Curie**, aby dokázala, že vlastnosti, které se dříve připisovaly pouze uranu a jeho sloučeninám, má ještě jeden prvek – thorium. Stejně jako v případě uranu bylo jeho záření stálé a nečerpalo energii ze žádného vnějšího zdroje. Jako první použila právě Marie Curie termín „radioaktivita“, aby popsala záření vydávané uranem a později i thoriem. Trvalo dlouhou dobu, než se výsledky Becquerelových pokusů prosadily, známější byly přece jen více nedávno objevené Roentgenovy paprsky. Marie Curie však neúnavně pokračovala ve svých výzkumech, a tak se podařilo najít nový radioaktivní prvek – polonium a později radium. Právě tento poslední objevený prvek měl výjimečné vlastnosti – byl mnohem radioaktivnější a vyzařoval teplo. Brzy se začalo pracovat na možnostech jeho využití při léčbě rakoviny, a tak se začala psát historie nového oboru zvaného **radioterapie**. Roku 1903 byla udělena Nobelova cena společně H. Becquerelovi a manželům Curieovým právě za objev radioaktivity. Dalšího ocenění se H. Becquerelovi dostalo, když byla jeho jménem nazvána jednotka aktivity 1 Bq (becquerel).



Dnes již víme, že radioaktivitu lze rozdělit na **přírodní** nebo **umělou**. V přírodě se vyskytují atomy, jejichž jádra jsou nestabilní a samovolně se přeměňují na jádra jiných prvků za vzniku neviditelného ionizujícího (radioaktivního) záření. Tento proces je označován jako přírodní radioaktivita. Pokud dojde k ozáření stabilních jader, např. v jaderném reaktoru, mohou se taková jádra proměnit v radioaktivní. V takovém případě mluvíme o umělé radioaktivitě.

### NOBELOVA CENA ZA MÍR PATŘÍ IAEA

---

říjen 2005

Letošní udělování Nobelovy ceny za mír přineslo velké překvapení. Norský Nobelův výbor se tentokrát rozhodl ocenit činnost **Mezinárodní agentury pro atomovou energii** (IAEA, v češtině se používá rovněž zkratka MAAE) spolu s jejím ředitelem **Muhamedem El Baradejem**. Komise je ocenila za snahu chránit jadernou energii před vojenským zneužitím a za zajišťování podmínek pro její bezpečné mírové použití.

Mezinárodní agentura IAEA byla založena roku 1957 a v současné době sídlí ve Vídni. Další kanceláře má rozesety po celém světě – v Ženevě, v New Yorku, v Torontu a také v Tokiu. IAEA vystupuje jako nezávislá, vědecká a mezivládní organizace, slouží ke spolupráci mezi členskými státy v otázce jádra. Zaměřuje se na využívání jaderného výzkumu a technologií k mírovým účelům. Podporuje zdokonalování jaderné bezpečnosti nejen ve smyslu nezneužití jaderné energie, ale také v otázce ochrany lidského zdraví. Do povědomí veřejnosti se IAEA dostala v souvislosti s plánovaným útokem USA na Irák. Tehdy agentura IAEA kritizovala záměr prezidenta George Bushe zaútočit na Irák. Vyvracela jeho argumenty s tím, že existence zbraní hromadného ničení není prokázána. Jak se bohužel ukázalo později, agentura měla pravdu, ve zničeném Iráku se nepodařilo Američanům najít dostatečný důkaz o tom, že by zde zbraně hromadného ničení byly.

Vedle agentury IAEA byl oceněn také Dr. Mohamed El Baradei, výkonný ředitel agentury. Tento 63letý Egyptan začal svou kariéru v roce 1964 v Egyptských diplomatických službách, později jako profesor vyučoval mezinárodní právo na New Yoor University School of Law.



Během svého života měl mnoho příležitostí se blíže seznámit s fungováním mezinárodních organizací, konkrétně v oblasti mezinárodního míru, bezpečnosti a uplatňování mezinárodního práva. Je autorem řady článků a publikací o mezinárodním právu, kontrole zbraní a mírovém využívání jaderné energie. Nobelovu cenu si podle komise zasloužil tím, že neústupně prosazoval program o světovém nešíření jaderných zbraní a podpoře mírového využití jádra.

Organizace IAEA v čele s El Baradeiem má velký význam právě v této době, kdy celosvětové snahy o válečné odzbrojování uvízly na „mrtvém bodě“, a šíří se stále větší nebezpečí, že by jaderné zbraně mohly použít teroristické skupiny.

Nobelova cena je nejvyšší ocenění udělované každoročně již od roku 1901 za zásadní vědecký výzkum, technické objevy nebo jiný přínos lidské společnosti. Ceny jsou předávány v pěti kategoriích: fyzika, chemie, lékařství, literatura a cena za mír. Zvláštní skupinu pak tvoří cena za ekonomii. Nobelova cena za mír je však jednou z nejkontroverznějších. Poté, co komise představí své rozhodnutí, rozpoutá se obvykle bouře dohadů a sporů o tom, zda jsou zásluhy oceněných dostatečné. Z historie lze vzpomenout případ z roku 1994, kdy ocenění měl získat palestinský politik a vůdce Jásir Arafat. Tehdy se situace vyhrotila až do té míry, že na protest odstoupila část Nobelovy komise.

---

### JADERNÁ ENERGIE DOSTÁVÁ V EVROPĚ ZELENOU

---

listopad 2005

**Řada evropských politiků se v poslední době stále častěji vyjadřuje k otázce využívání jaderné energie. K dalšímu rozvoji jádra směřují stále silněji významné evropské země jako Francie a Velká Británie. Svědčí o tom právě hlasy předních politiků z obou zemí.**

Francouzský ministr financí Jean-François Copé se vyjádřil pro deník Wall Street Journal, že rozvoj jaderné energie přinesl jejich zemi řadu výhod. Zdůraznil, že největším přínosem jádra je jeho bezpečnost, stálé ceny nabízené energie a nezávislost na dodávkách energie z ciziny, kterou Francie tímto získala. Jaderná energie nyní tvoří 78 % veškeré energetické produkce v této zemi.

Podporu jaderné energii vyjádřil také anglický premiér Tony Blair, který na tiskové konferenci 11. října řekl, že členové skupiny G8 by měli vzájemně spolupracovat na dalším zdokonalování technologií, které jim umožní přizpůsobit se rostoucím energetickým požadavkům. Podle jeho slov by to znamenalo zaměřit se na všechny dosažitelné prostředky, mezi které patří jaderná energie. „Diskuze kolem jaderné energie by měly být vedeny bez předsudků, téma jaderné politiky se začíná dostávat stále více do popředí v politice nejen u nás, ale také v dalších zemích,“ vyzdvihl význam jádra ve Velké Británii Tony Blair. Celých 19 % vyrobené elektrické energie zde připadá právě na jadernou energii.

Alternativní energie, kam jádro také patří, začíná být sice populárnější, stále však nemá jednoduchou pozici. K tomu, aby mohla energie z alternativních zdrojů bez jaderné energie pokrýt významnější část celkové energetické produkce ve Velké Británii, musely by státní dotace do roku 2010 přesáhnout částku 6,5 miliardy liber. I kdyby bylo možné tohoto cíle dosáhnout, produkci emisí by se tak podařilo snížit pouze o 2 %. Britská vláda musí nyní urychleně přehodnotit stávající energetickou politiku a do konce roku 2006 vypracovat plán, jak pokrýt vysoké energetické nároky a přitom splnit zpřísnující se ekologická kritéria. Podle Blaira by vládní rozhodnutí mělo počítat s větším budoucím využitím jaderné energie, čímž otevřel možnost, že by nové plány britské energetiky zahrnovaly také výstavbu nových jaderných elektráren. Vážnost energetické situace ve Velké Británii ještě potvrzuje skutečnost, že řada stávajících jaderných elektráren je zastaralá a měla by být v provozu do roku 2015.

Další člen britské vlády, stínový ministr energetiky Bernard Jenkin, nedávno veřejně prohlásil, že by vláda konečně měla přestat „demonizovat“ jadernou energetiku, a přijmout sku-

tečnost, že hraje důležitou roli v zajištění bezpečné energie. Zároveň jako člen Konzervativní strany kritizoval Blaira za to, že konečné rozhodnutí o tom, kam bude britská ekonomika směřovat, chce vláda provést do konce roku 2006. Časovou prodlevu využila vláda podle něho k tomu, aby se vyhnula případným protestům, které by mohlo rozhodnutí o podpoře jaderné energie vyvolat. Dále je podle něho nutné pochopit veřejné obavy z jaderné energie a přesvědčit občany o jejích přednostech, nebo vyvrátit pochyby tam, kde jsou neopodstatněné.

### JADERNÝ COMEBACK V NĚMECKU?

---

listopad 2005

**Vítězství pravicové koalice CDU-CSU v německých volbách znovu otevírá citlivou otázku využívání jaderné energie. Křesťanští demokraté avizovali již dlouho před volbami, že v případě úspěchu budou tlačit na změnu zákona příkazujícího uzavření jaderných elektráren do 15 let. Nucená spolupráce s SPD ale může návrat jádra na scénu německé energetiky zpomalit.**

Bývalý středo-levicový kabinet Gerharda Schrödera prosadil na nátlak menšího koaličního partnera Strany zelených zákon, podle něhož musí všech 17 jaderných elektráren ukončit provoz do roku 2020. Jaderná energie přitom tvoří asi 30 % německé elektrické energie, tedy druhou největší část po uhlí (50 %). CDU v čele s novou kancléřkou Angelou Merkelovou, která v letech 1994 až 1998 vykonávala funkci ministryně pro životní prostředí, považuje zákon za málo flexibilní a ráda by jej přepracovala.

Ve světle německých závazků z Kjótského protokolu dává Křesťanským demokratům za pravdu řada institucí. Specialistka na energetiku z Německého institutu pro ekonomický výzkum DIW Berlin Claudia Kemfertová považuje za společensky přijatelné prodloužit fungování jaderných elektráren, pokud splní přísné bezpečnostní kritéria: „*Nemluvíme přece o nových elektrárnách. Delší životnost nám ale pomůže překlenout časový příkop, než plně nastoupí nové technologie, například čisté uhelné elektrárny.*“ Také Federace německého průmyslu BDI by ráda odstoupení od jaderné energie posunula alespoň o dalších deset let.

Nová vláda ale bude mít ztíženou pozici pro vyjednávání. Po těsném vítězství „obětovala“ CDU kvůli kancléřství osm ministerstev druhé SPD, mezi nimi i resort životního prostředí. Pravděpodobný budoucí ministr Sigma Gabriel se zatím k otázce oživení jaderné energetiky staví velmi rezervovaně. A to i přesto, že rostoucí cena zemního plynu nutí většinu populace přemýšlet o tom, zda je vhodné opustit jadernou možnost. V Německu se cena elektřiny zvedla za poslední tři roky o 38 % a další zdražování je pravděpodobné. CDU ještě před volbami oznámila, že začne snižovat vládní podporu obnovitelných zdrojů, která deformuje trh s elektřinou. Národní obchodní komora DIHK dokonce apeluje na politiky, aby přehodnotili vedoucí úlohu Německa v implementaci kjótských závazků. Podle komory povede rigorózní snižování emisí CO<sub>2</sub> spojené s rostoucími cenami elektřiny ke konkurenčnímu znevýhodnění německých podniků. Energeticky náročná výroba, například hliníkárný a chemický průmysl, už se začala přesouvat do zahraničí.

Do roku 2020 bude v Německu potřeba asi 20 000 MWe jako náhrada za dosluhující uhelné elektrárny. Pokud by jaderné elektrárny byly opravdu odstaveny, požadavek se zdvojnásobí. V každém případě ale bude nutné dokončit průzkumy v solném dole Gorleben, o němž se uvažuje jako o budoucím možném úložišti radioaktivních odpadů. Krajská vláda Dolního Saska, v jehož katastru důl leží, je myšlenka nakloněna.

#### **Německý energetický mix:**

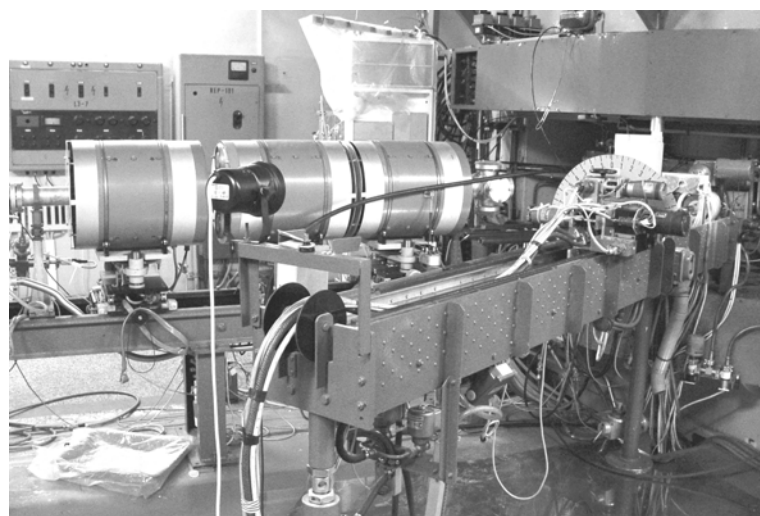
Uhlí (černé, hnědé): 50,2 %; jádro: 30,1 %; obnovitelné zdroje: 10 %; zemní plyn: 8,5 %

Více jak 250 návštěvníků z řad studentů a další veřejnosti během dvou dnů využilo příležitosti k prohlídce Ústavu jaderného výzkumu, a.s. a Ústavu jaderné fyziky Akademie věd ČR v Řeži. Největší zájem patřil dvěma výzkumným jaderným reaktorům, cyklotronu a van de Graafovu urychlovači. Dny otevřených dveří byly uspořádány v rámci Týdne vědy, který právě skončil.

*„Lidé se nejvíce bojí toho, co neznají a nevidí. Ve dnech otevřených dveří si mohou všichni, kdo mají zájem, prohlédnout naše výzkumná zařízení a seznámit se tak s experimenty v jaderné fyzice, s jadernou energií, s technologií výroby a také s jejím dalším využitím. Jaderná energie v naší zemi zastupuje 40 % celkové vyráběné energie a představuje téměř jedinou reálnou možnost do budoucna,“*

vysvětlil význam pořádaných exkurzí ve výzkumném komplexu v Řeži vědecký tajemník Ústavu jaderné fyziky AV ČR, Jaroslav Dittrich.

Ústav jaderné fyziky AV ČR má v současné době šest vědeckých oddělení a oddělení urychlovačů. První vědecké oddělení se zabývá teoretickou fyzikou, mimo jiné výpočty struktury hyperjader. Druhým je oddělení jaderné spektroskopie, jehož hlavním programem je výzkum srážek těžkých jader na velkých urychlovačích, elektronová spektroskopie a jaderné analytické metody. Další oblastí je neutronová fyzika, zde se studuje difrakce neutronů na pevných látkách. Dosažené výsledky nacházejí praktické využití v materiálovém výzkumu, například pro zjištění pevnosti materiálu kloubních náhrad. Oddělení využívá ke svým pokusům výzkumný jaderný reaktor LVR-15, který spravuje Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s.



**Cyklotron Ústavu jaderné fyziky v Řeži**



**Letecký snímek Ústavu jaderného výzkumu v Řeži**

Tento reaktor patří vedle dalšího podobného v Budapešti k unikátním evropským zařízením. Skupina složená z pracovníků obou ústavů zde pracuje na medicínské akreditaci převratné metody léčby nádorů pomocí tzv. neutronové záchytové terapie. Další vědecká oddělení Ústavu jaderné fyziky AV ČR se věnují jaderným reakcím a problematice dozimetrie ionizujícího záření.

Poslední oblast výzkumu je zaměřena na vývoj a samotnou výrobu radiofarmak pomocí cyklotronu, který je největším za-



řízením zdejšího ústavu. Radiofarmaka představují skupinu speciálních léků na bázi radioaktivních chemických sloučenin, které nachází uplatnění při léčbě nádorových onemocnění. Výzkum na urychlovači by mohl přinést značný přínos také v oblasti nakládání s radioaktivním odpadem. Řízenými transmutacemi by mohly radioaktivní látky s dlouhou dobou rozpadu přejít na izotopy s kratší dobou. Jaderná fúze možná pomůže v blízké budoucnosti částečně vyřešit problém radioaktivity a všech potenciálních rizik, které s sebou nese jaderný materiál používaný dnes jako palivo v jaderných elektrárnách.

Vědečtí pracovníci se významně podílejí na výzkumných projektech společně s vědeckými týmy z více než 100 institucí po celém světě, například ve Spojených státech amerických, v Německu apod. Probíhá také spolupráce se švýcarským CERNem, což je evropská organizace pro jaderný výzkum, největší světové fyzikální centrum, jehož členem je Česká republika. Významný je také mezinárodní projekt KATRIN v Karlsruhe, jehož cílem je zjistit s dosud nedosaženou přesností hmotnost neutrina.

Ústav jaderného výzkumu Řež a.s. spolu s Ústavem jaderné fyziky AV ČR patří k nejvýznamnějším organizacím, které výzkumem a technickým vybavením přispívají k rozvoji využití jádra jako zdroje čisté a dostupné energie.

### JADERNÁ ENERGIE V MAĎARSKU JDE KUPŘEDU

---

listopad 2005

**Maďarští zákonodárci podpořili návrh na výstavbu státního skladu pro nízko a středně radioaktivní odpad. Zároveň bylo odsouhlaseno prodloužení provozní licence jaderné elektrárně Paks.**

Při listopadovém zasedání parlamentu se poslanci usnesli v poměru 339 hlasů ku 4 na zahájení přípravných prací na vybudování skladu pro nízko a středně radioaktivní odpad v obci Bataapati, která leží asi 60 km od hranic s Chorvatskem. Jedná se o odpad, který vzniká v nemocnicích, při výzkumech nebo výuce. Plánovaný sklad by měl nahradit nedostatečné kapacity stávajícího zařízení v Püspökszilágy.

Ohledně výstavby nového úložiště proběhlo v letošním červnu v obci Bataapati veřejné referendum. Kladně se vyjádřilo 91 % místních obyvatel. Veřejnému hlasování předcházela důkladná geologická průzkum, který provedla Maďarská geologická inspekce. Kapacita úložiště se předpokládá okolo 40 000 m<sup>3</sup> odpadu. Náklady byly dosud vyčísleny v hodnotě 100 milionů eur. Plány počítají se zahájením provozu skladu již v roce 2008.

Maďarsko dosud nemá trvalé úložiště použitého paliva a vysoce radioaktivního odpadu. Od roku 1994 je v platnosti smlouva s Ruskem o tom, že se o tento odpad postará ruská strana, ale zároveň bude pro Maďarsko dodávat nové palivo. V Jaderné elektrárně Paks byl koncem roku 2004 zahájen provoz meziskladu použitého paliva, které zde může být uloženo po dobu 50 let.

Další z kroků maďarské vlády k zajištění trvalého zdroje spolehlivé energie do budoucna je také podpora výroby jaderné energie. Byla prodloužena funkční doba jaderné elektrárny Paks, která tak bude v provozu do roku 2037. Tato jediná maďarská jaderná elektrárna, s výkonem 1 760 MWe ze čtyř reaktorů typu VVER 440, dodává 40 % z celkové domácí energetické produkce.

Maďarsko patří mezi země s významným zastoupením jaderného průmyslu. Z tohoto důvodu spolupracuje vláda a Maďarský úřad pro jadernou energii s řadou mezinárodních organizací na zajištění bezpečné produkce elektřiny a nakládání s jaderným odpadem. Právě jaderná problematika patřila k hlavním bodům jednání mezi představiteli vlády a generálním ředitelem IAEA, El Baradejem, při jeho říjnové návštěvě v Budapešti. Maďarsko při této příležitosti vyjádřilo činnosti IAEA svoji podporu a zavázalo se i nadále využívat jádro ve smyslu zvyšování celosvětové jaderné bezpečnosti.

## ČÍM NAKRMIT ČÍNSKÉHO DRAKA?

---

prosinec 2005

**Čína se za posledních patnáct let změnila z výrobce hraček a levného oblečení ve světovou ekonomickou supervelmoc. Aby se dobře rozjetý stroj nezaseknul, musí Čína masivně investovat do energetického sektoru. V současnosti nemá v Číně až 100 miliónů lidí k dispozici elektřinu.**

Měsíc a půl před koncem roku kohouta oznámila Čína zásadní revizi svého hrubého domácího produktu. Téměř dvacetiprocentní odhadovaný nárůst zemi katapultuje ze sedmého na čtvrté místo největší ekonomiky světa, před Velkou Británií a Francií. Čína letos sklízela úspěchy i na dalších frontách: například poslala do vesmíru první kosmonauty a podruhé za sebou vystřídala USA na první příčce světového exportéra informačních a telekomunikačních technologií.

Dravý ekonomický rozvoj ale klade vysoké nároky na energetiku – poptávka po elektřině roste v průměru o 15 % ročně. Pokud si chce Čína současné tempo růstu udržet, bude muset každých deset let zdvojnásobit výrobní zdroje elektřiny. Kromě tradičních fosilních paliv, jako je uhlí a ropa, se proto Čína aktivně angažuje ve výzkumu, vývoji a výstavbě jaderných elektráren a obnovitelných zdrojů energie, především vodních a větrných. Následující přehled shrnuje, jaké energetické překážky čekají čínského draka v blízké budoucnosti.

### Uhlí a ropa

Nejdůležitějším primárním zdrojem je v Číně uhlí: vyrábí se z něj téměř tři čtvrtiny energie. Čína je zároveň největším světovým producentem i spotřebitelem uhlí, 40 % železniční kapacity v zemi je používáno pouze na přepravu miliardy tun uhlí ročně. Čínský důlní průmysl také drží smutný rekord v počtu úmrtí horníků: v roce 2004 jich v práci zemřelo na 6 000! Hlavním důvodem jsou výbuchy metanu. Důl Sihe v severní Číně jako první začal metan, agresivní skleníkový plyn uvolněný dolováním, zachytávat a využívat v nedaleké plynové elektrárně. Peníze na projekt, který má kromě zvýšení bezpečnosti horníků také snížit znečištění ovzduší, poskytla formou půjčky Světová banka.

Dalším důležitým zdrojem energie je ropa. Po USA a Japonsku zaujímá Čína třetí místo v její spotřebě – přestože je významným světovým nalezištěm, musí již dnes až třetinu ropy dovážet. Ropa je důležitá nejen pro průmysl. V čínských metropolích již tradiční kola zcela vytlačily automobily a počet aut neustále roste, ročně téměř o pětinu. Ekonomové se obávají, že další nárůst poptávky po ropě ze strany Číny by mohl cenu suroviny neúměrně zvyšovat.

### Jaderná energie

Přestože celkový podíl jaderné energie je pouze kolem dvou procent, patří Čína společně s Indií mezi asijské jaderné draky – od roku 2002 vybuďovala šest jaderných elektráren a v příštích 15 letech jich plánuje postavit pětikrát tolik. Do roku 2050 chce mít na 150 reaktorů (pro srovnání, dnes mají nejvíce reaktorů – 103 – Spojené státy). Výstavba jaderných zařízení se uskutečňuje ve dvou rovinách. Na straně jedné, aby uspokojila naléhavou poptávku po energii, importovala nejdříve Čína komerční reaktory z Ruska, Francie a Kanady, proto se na jejím území nachází několik různých technologických typů. Rozšiřování současných zařízení bude tyto typy samozřejmě respektovat, elektrárny budované na „zelené louce“ by ale již měly být jednoho druhu. Takový záměr je samozřejmě atraktivní pro zahraniční investory – budovat několik reaktorů stejného typu je levnější. Na straně druhé investuje Čína do výzkumu a vývoje vlastní jaderné technologie, založené na německém principu vysokoteplotního oblačkového reaktoru chlazeného heliem (HTR). V roce 2003 byl do sítě zapojen prototyp s výkonem 10 MW, první běžný 200MW reaktor by se měl začít stavět v roce 2007. Výhodou těchto menších reaktorů je jejich stavební modul – mohou se snadno připojovat další zdroje, podle toho, jak roste spotřeba energie v lokalitě.



### Obnovitelné zdroje

V současnosti se 18 % energie vyrobí z vodních zdrojů. Dvě právě budované přehrady (Tři soutěsky a Žlutá řeka) by měly podíl ještě o něco zvýšit. Obě veledíla se setkala s odporem ekologů, politických aktivistů a archeologů – kvůli Třem soutěskám bylo přesídleno více než milion lidí a voda zaplaví vzácná archeologická naleziště. Vláda ale kromě splavnosti a zamezení pravidelných záplav vypichuje především výrobu elektřiny ve vodních elektrárnách (bez emisí). Rostoucí znečištění (16 z 20 nejvíce znečištěných měst na světě je v Číně) vedlo také koncem letošního února čínské představitelky ke schválení zákona o obnovitelných zdrojích. Čína má vhodné podmínky pro výstavbu větrných elektráren, a to na pobřeží i ve vnitrozemí. Experti odhadují potenciální využití výkonu větru 500–1000 GW, výstavba větrných parků je ale zatím pomalá. Od nového zákona odborníci očekávají významný nárůst energie z větrných elektráren.

### V JAPONSKU VEDE JÁDRO

---

prosinec 2005

**Minulý týden Japonsko uskutečnilo tři další kroky v podpoře jaderné energetiky. Do komerčního provozu byl uveden v pořadí čtvrtý a co do výkonu největší reaktor společnosti Tohoku a zároveň byl po důkladných opravách spuštěn 3. blok elektrárny Mihama. Začala výstavba skladu použitého paliva.**

Japonská energetická společnost Tohoku minulý týden spustila první blok své jaderné elektrárny Higoshidori na jihovýchodě ostrova Honšú. Stavba elektrárny Higoshidori začala v roce 1998. Po zkušebním provozu a závěrečných testech byl tento varný reaktor o výkonu 1 100 MW spuštěn. Jedná se o vůbec první reaktor, který byl od ledna letošního roku uveden v Japonsku do komerčního provozu. Konstrukce byla navržena tak, aby budova elektrárny byla dostatečně odolná vůči zemětřesení, s kterým je třeba v Japonsku počítat. Především byly vyztuženy speciálními ocelovými rámy budovy, kde se nachází reaktor a turbíny.

V oblasti Aomori, kde leží elektrárna, byla v listopadu zahájena výstavba zařízení k ukládání vysoce radioaktivních látek. Jedná se o mezisklad použitého paliva z japonských jaderných elektráren. Funkční bude od roku 2010 a jeho kapacita se odhaduje až na 5 tisíc tun. Do roku 2050 by mělo být postaveno trvalé úložiště jaderného paliva, dosud však není potvrzena jeho lokalita.

Japonská vláda nedávno podpořila návrh na opětovné spuštění 3. reaktoru jaderné elektrárny Mihama, která leží v regionu Fukui na západním pobřeží ostrova Honšú. Elektrárna disponuje třemi reaktory o celkovém výkonu 1 570 MW. Agentura pro bezpečnost jaderného průmyslu odsouhlasila pokračování činnosti 3. reaktoru o výkonu 780 MW. Blok byl odstaven v roce 2004 v důsledku nehody způsobené protržením trubky v sekundárním nejaderném okruhu. Vlastník jaderné elektrárny, společnost Kansai Electric, zavedla přísnější bezpečnostní opatření a zdvojnásobila svoje investice na údržbu a řízení sekundárního systému ve všech svých elektrárnách.

Japonsko má omezené zásoby nerostného bohatství a proto dováží 80 % energie. Největší podíl z celkové energetické spotřeby zaujímá ropa (49,4 %); v porovnání s ostatními zeměmi vykazuje Japonsko nejvyšší objem dovezené ropy hned po USA.

Na pokrytí energetických nároků se dále podílí uhlí (19,1 %), zemní plyn (13,1 %), jaderná energie (12,6 %) a energie z dalších zdrojů pak tvoří 5,8 %. Vláda podporuje rozvoj jaderné energetiky, neboť v ní vidí řešení, jak účinně snížit množství skleníkových plynů. Podle svého dlouhodobého energetického plánu chce Japonsko do roku 2011 zvýšit podíl elektřiny z jádra na 30 %. Tohoto cíle chce dosáhnout výstavbou dalších elektráren o celkovém výkonu 17,5 GW. V souvislosti s nedostatkem vlastních přírodních zdrojů prosazuje japonská vláda získávání uranu a plutonia přepracováním z vyhořelého paliva. V budoucnosti počítá Japonsko s využitím speciálního paliva MOX, které vzniká přepracováním již použitého jaderného paliva. Japonsko provozuje nyní 56 jaderných reaktorů a je třetím největším producentem energie z jaderných elektráren na světě vedle Francie a USA.

**Přehled japonských jaderných elektráren:**

Název:	Výkon:	Typ reaktorů:	Provozovatel:
Fugen	4 268 MW	kombinovaný reaktor (HWLWR)	Power Reactor&Nuclear Co.
Fukushima Daiichi	4 546 MW	varný reaktor (BWR)	Tokyo Electric Power Co.
Fukushima Daini	4 268 MW	varný reaktor (BWR)	Tokyo Electric Power Co.
Genkai	3 312 MW	tlakovodní reaktor (PWR)	Kyushu Electric Power Co.
Hamaoka	3 469 MW	varný reaktor (BWR)	Cubu Electric Power Co.
Higashidori	1 100 MW	varný reaktor (BWR)	Tohoku Electric Power Co.
Ikata	1 922 MW	tlakovodní reaktor (PWR)	Shikoku Electric Power Co.
Kashiwazaki	7 965 MW	varný reaktor (BWR)	Tokyo Electric Power Co.
Mihama	1 570 MW	tlakovodní reaktor (PWR)	Kansai Electric Power Co.
Monju	280 MW	rychlý reaktor (LMFBR)	PowerReactor&Nuclear Co.
Ohi	4 494 MW	tlakovodní reaktor (PWR)	Kansai Electric Power Co.
Onagawa	1 293 MW	varný reaktor (BWR)	Tohoku Electric Power Co.
Sendai	1 692 MW	tlakovodní reaktor (PWR)	Kyushu Electric Power Co.
Shika	513 MW	varný reaktor (BWR)	Hokuriku Elect. Power Co.
Shimane	4 780 MW	varný reaktor (BWR)	Chogoku Elect. Power Co.
Takahama	3 220 MW	tlakovodní reaktor (PWR)	Kansai Electric Power Co.
Tokai	159 MW	varný reaktor (BWR)	Japan Atomic Power Co.
	1 056 MW	chlazený plynem (GCR)	
Tomari	1 100 MW	tlakovodní reaktor (PWR)	Hokkaido Elect. Power Co.
Tsuruga	341 MW	varný reaktor (BWR)	Japan Atomic Power Co.
	1 115 MW	tlakovodní reaktor (PWR)	

**JADERNÉ ELEKTRÁRNY SE BUDOU STAVĚT PO CELÉM SVĚTĚ**

prosinec 2005

**Podle Světové nukleární asociace (WNA) by se mělo postavit do roku 2030 až 400 nových jaderných reaktorů. Celosvětově se tak zvýší podíl jaderné energie na pokrytí energetických potřeb ze současných 9 % na 16 %. Výzkum veřejného mínění, zveřejněný minulý týden Mezinárodní agenturou pro jadernou energii (IAEA), potvrzuje, že lidé podporují prodloužení doby životnosti jaderných elektráren.**

Společnost GlobeScan Incorporated v rámci zadaného výzkumu pro WNA oslovila celkem přes 18 000 respondentů z 18 zemí světa, jako například Japonsko, USA, Francie, Německo nebo Velká Británie. Bylo zjištěno, že celkem 28 % dotázaných považuje jadernou energii za bezpečnou a podporuje výstavbu dalších jaderných zařízení, zatímco dalších 34 % lidí si přeje, aby se nové elektrárny nestavěly, ale zároveň souhlasí s pokračováním činnosti stávajících zařízení. Celkově lze říci, že pro podporu již existujících jaderných zařízení se vyslovilo 62 % osob. Nejvíce příznivců jaderné energie má v současnosti Jižní Korea, a to 86 %, z čehož 52 % se vyjádřilo pro stavbu nových elektráren a 34 % obyvatel bylo pro využití stávajících zařízení. V USA podporuje jádro 69 % dotázaných, z nichž 29 % se domnívá, že by měla být prodloužena činnost již fungujících elektráren. Pro 40 % Američanů je jaderná energie bezpečná a uvítali by možnost výstavby dalších jaderných zařízení.

Dotazovaným byla také položena otázka, zda by se měla jaderná energie více využívat, neboť nepřispívá ke zvyšování globálního oteplení. Kladně se vyjádřilo 38 % osob, opačný názor zastávalo 47 % lidí. Neméně zajímavé výsledky přinesla otázka, v jaké oblasti by se jaderná energie měla více využívat: 39 % respondentů zdůraznilo medicínské použití jádra; na dalším místě s 26 % byla výroba elektřiny z tohoto zdroje.

Řada zemí volí jadernou energii jako relativně levný zdroj elektřiny – uvádí zpráva „Nová ekonomika jaderné energie“, kterou vypracovali nezávislí experti pro Světovou nukleární asociaci (WNA). Celkový výkon jaderných zařízení se podle odhadů zvýší o 150 GW.

Rozvoj jaderné energetiky podporuje řada faktorů, především pak levnější provoz novodobých jaderných zařízení. Podle studie budou náklady i v budoucnu stále klesat, neboť se používají standardizované typy reaktorů, zkracuje se doba výstavby elektráren a zvyšuje se výrobní kapacita i životnost jaderného zařízení. „*Jaderná energie je stále více využívána, protože s sebou přináší celou řadu výhod oproti fosilním palivům. Při výrobě této energie nevznikají téměř žádné skleníkové plyny, a proto nezatěžuje tolik životní prostředí; navíc představuje cenově stabilní zdroj energie,*“ vysvětlil současnou situaci generální ředitel Světové nukleární asociace John Ritch.

---

### RUSKO UVEDE DO PROVOZU NEJMODERNĚJŠÍ RYCHLÝ REAKTOR

---

leden 2006

**Nový jaderný reaktor „pokročilý“ generace s označením BN-800 bude do roku 2010 uveden do komerčního provozu v ruské elektrárně Bělojarsk. Prohlásil to Sergej Kirijenko, ředitel státní agentury pro jadernou energii ROSATOM. Podle vyjádření ruského prezidenta, Vladimíra Putina, stojí Rusko na prahu nové doby, kdy musí dojít k výraznému zrychlení vývoje jaderné energetiky.**

Reaktor BN-800 má nahradit svého předchůdce, reaktor BN-600, který je dosud největším rychlým reaktorem na světě sloužícím ke komerčním účelům. BN-600 s výkonem 560 MWe dodává ročně do sítě okolo 4 000 milionů MWh. Vyšším výkonem (1 200 MWe) disponoval pouze francouzský reaktor Superphenix, který byl v roce 1999 odstaven.

Projekt rychlého reaktoru BN-800 začal již v roce 1985. Od možnosti průmyslového využití ho doposud dělila velká překážka – finance. V červnu minulého roku však vyzvali představitelé ruského parlamentu vládu, aby podpořila program výstavby reaktoru BN-800. Sergej Kirijenko uvedl, že vláda chce přidělit 1 miliardu rublů (38 milionů dolarů) ze státního rozpočtu právě na výstavbu rychlého reaktoru BN-800. „Příspěvek“ ruské vlády na dokončení tohoto projektu Kirijenko komentoval slovy: „je to více než dříve, ale méně než je potřeba“. Celkové náklady se totiž podle odhadů mohou vyšplhat až na několiknásobek vládního příspěvku.

Pokročilé typy reaktorů 3. generace a v budoucnu také 4. generace jsou dalším stupněm ve vývoji jaderného průmyslu. Podle usnesení mezinárodního fóra IV. generace (GIF) dojde v rozmezí let 2010–2030 k výraznému zdokonalení šesti typů reaktorů – jedná se o rychlý reaktor chlazený plynem, rychlý reaktor chlazený tekutým sodíkem, rychlý reaktor chlazený tekutým olovem, reaktor chlazený tekutou solí, vysokoteplotní reaktor chlazený vodou a vysokoteplotní reaktor chlazený heliem. Všechny reaktory musí splňovat nejen bezpečnostní nároky, ale také ekonomická hlediska spojená s výstavbou elektrárny i s jejím dalším provozem. GIF představuje sdružení deseti zemí s významným jaderným programem. Rusko do jejich výčtu sice nepatří, přesto spolupracuje s touto organizací především v oblasti výzkumu na reaktorech chlazených tekutým sodíkem, ve které je právě Rusko nejdále. Vedle GIF působí v této oblasti také Mezinárodní projekt novodobých jaderných reaktorů a palivových cyklů (INPRO), který zajišťuje Mezinárodní asociace pro jadernou energii. Cílem INPRO je podpořit bezpečné, udržitelné a ekonomicky dostupné využití jaderných technologií v souvislosti s energetickými nároky 21. století. V současné době má 22 členů včetně Ruska. INPRO uvádí jako případovou studii zdokonalení jaderné technologie právě ruský rychlý reaktor BN-800.

Rychlý množivý reaktor BN-800 patří do kategorie pokročilých reaktorů chlazených sodíkem. Reaktor BN-800 bude disponovat 880 MWe; v porovnání s původním reaktorem BN-600 dojde ke zvýšení výkonu o 320 MWe. BN-800 dále nabízí výrazné vylepšení oproti současnému typu reaktoru BN-600: došlo ke zdokonalení sekundárního jaderného okruhu a používá se

v něm kvalitnější materiál. Výraznou předností reaktoru BN-800 je také možnost použití více druhů paliv. Reaktor bude uzpůsoben „spálit“ za rok až dvě tuny plutonia získaného z vojenských zbraní. Nový ruský reaktor by měl přinést zlepšení také v oblasti finanční návratnosti nákladů. Podle odhadů budou výdaje na jeho výstavbu jen o 15 % vyšší než u konstrukce běžného tlakovodního reaktoru (VVER). Reaktor BN-800 by měl využívat uzavřeného palivového cyklu, který zahrnuje přepracování vyhořelého paliva a opětovné využití takto získaného uranu při přípravě nového paliva. Vysoce radioaktivní odpad, jenž nelze dále zpracovat, se vitrifikuje. Program uzavřeného palivového cyklu tak odpovídá celosvětovým požadavkům na hospodárné využívání přírodních zdrojů uranu.

## V ROCE 2005 PŘIBYLY VE SVĚTĚ NOVÉ REAKTORY

únor 2006

**Podle Světové asociace pro atomovou energii (WNA) je v současné době po celém světě v provozu celkem 443 reaktorů, které disponují výkonem okolo 370 000 MWe. Elektřina vyrobená z jádra zastupuje 16 % průměrné světové produkce a nadále lze počítat s jejím nárůstem.**

Do sítě byly podle WNA v uplynulém roce připojeny 2 nové reaktory – japonský Higashidori (1 067 MWe) a indický Tarapur (490 MWe). Po delší přestávce začal do sítě opět dodávat energii jeden kanadský reaktor (Pickering – 515 MWe). Naopak k uzavření jaderných zařízení došlo ve dvou případech – jednalo se o německý Obrigheim (340 MWe) a švédský Barsebäck (602 MWe). Celkem tak došlo k navýšení instalovaného výkonu v jaderných elektrárnách o 1 130 MWe.

Během minulého roku byla zahájena výstavba nových reaktorů ve Finsku (Olkiluoto – 1 600 MWe) a v Pákistánu (Chasma – 300 MWe). K lednu 2006 tak bylo na celém světě ve výstavbě 24 jaderných bloků, které mají disponovat výkonem téměř 19 000 MWe. Kromě toho v současnosti probíhají konkrétní přípravy k vybudování dalších 41 jaderných bloků po celém světě. Nejvíce jich má být vystavěno v Japonsku (celkem 12 reaktorů, například Kamino-seki – 1 373 MWe, Tsurugi – 1 538 MWe) a v Číně (celkem 9 reaktorů, např. Lingao – 2 000 MWe, Qinshan – 1 300 MWe).

Výhledově se počítá s rozšířením jaderných zařízení o dalších 113 nových reaktorů. Největší podpora výstavby nových jaderných elektráren je zaznamenána v Asii. Konkrétně se plánuje výstavba 48 reaktorů v Jižní Africe a v Indii, 19 reaktorů by měla dále postavit Čína, 13 USA a 8 reaktorů by mělo v budoucnu získat Rusko. Zbýlých 25 bloků je rozděleno například mezi Francii, Indonésii nebo Turecko.

### Přehled změn týkajících se jaderných reaktorů ve světě v roce 2005

Stav	Stát	Reaktor	Typ	Výkon (MWe)
připojen k síti	Japonsko	Higashidori	varný (BWR)	1 067
připojen k síti	Indie	Tarapur	těžkovodní reaktor (PHWR)	490
připojen k síti (opětovné spuštění)	Kanada	Pickering	těžkovodní reaktor (PHWR)	515
komerční provoz	Japonsko	Shika	zdokonalený varný (ABWR)	1 358
komerční provoz	Japonsko	Hamaoka	zdokonalený varný (ABWR)	1 380
komerční provoz	Jižní Korea	Ulchin	tlakovodní (PWR)	960
uzavřen	Německo	Obrigheim	tlakovodní (PWR)	340
uzavřen	Švédsko	Barsebäck	varný (BWR)	602

**S otázkami podobného typu se setkávám ve své praxi poměrně dlouho a nezdá se mi, že by jich ubývalo. Spíše naopak. Rozhodl jsem se proto, že se pokusím čtenáři trochu osvětlit, co že vlastně chemie na jaderné elektrárně pohledává, jakou má roli a v čem je užitečná.**

Na začátek jen malé připomenutí. Jaderné štěpení probíhá v těsných palivových tyčích umístěných v reaktoru. Jejich kovový povrch se ohřívá teplem vznikajícím při štěpení jaderného paliva uvnitř tyčí a své teplo pak předává vodě. Ta potom v tepelném výměníku, zvaném parogenerátor ohřívá zevnitř tisíce trubek, z jejichž vnějšího povrchu přestupuje teplo do vody a přeměňuje ji v páru. Dále je to již v principu stejné jako v každé jiné, tepelné elektrárně. Pára točí turbínou, kondenzuje a z kondenzované se vrací zpět do parogenerátoru. Kondenzace páry probíhá v kondenzátoru, který je z druhé strany chlazen chladicí vodou, která se dále chladí například v chladicích věžích. Tolik tedy ve zkratce. Co je tomuto přenosu a přeměně energie společné? Je to použití vody. Voda tady pracuje jako přenašeč energie v primárním okruhu (rusky se voda v primárním okruhu nazývá mile „teplonositel“), v sekundárním okruhu točí turbínou a v chladicích okruzích odvádí odpadní teplo pryč z výroby, tak jak to vyžadují přírodní zákony formulované ve druhé větě termodynamické. Žádná magie.

Voda je zvláštní tekutina. Díky tvaru své molekuly má značně atypické chování. Rozpustí kde co, je to médium, které je nesmírně „životafilní“ a má dobré termodynamické vlastnosti. Z toho plynou pro jadernou elektrárnu jisté výhody a jisté nevýhody.

#### **Výhody:**

Voda je schopna převést značné množství tepla, je levná, není nebezpečná pro životní prostředí. Slouží i jako zpomalovač neutronů, nutných pro štěpení uranu.

#### **Nevýhody:**

Nelze ji použít nad teplotu 374 °C, kdy již neexistuje v kapalně formě. Je korozně agresivní a každé zařízení se v ní rozpouští. Některé velmi málo, některé velmi rychle. Jakmile vzniknou v podmínkách používání vody jen trochu příznivé podmínky pro existenci života, můžeme si být jisti, že se tam život objeví a zkomplikuje nám život náš.

#### **Co tedy chemici na JE dělají? Zabývají se především vodou.**

- Upravují vodu tak, aby její vlastnosti v různých technologických systémech byly v souladu s materiály použitými pro konstrukci zařízení. Zařízení nesmí zreznout dřívě, než doslouží. 40–60 let provozu je ta doba, po kterou by mělo hlavní zařízení sloužit bez velkých oprav! Bez nadsázky se dá říci, že chemický režim pracovních médií výrazně spolurozhoduje o životnosti elektrárny a ve velké míře i o nákladech na její údržbu.
- Chemici řídí složení pracovních roztoků tak, aby jejich úprava a používání neprodukovala mnoho odpadů, zejména radioaktivních odpadů.
- Protože v primárním okruhu voda proudí aktivní zónou, místem, kde probíhá štěpení, místem o extrémní radiaci, a protože voda je vynikajícím rozpouštědlem, může sem transportovat i rozpuštěné mikronečistoty, které se v aktivní zóně mohou přeměnit na některé velmi „nepříjemné“ radionuklidy. Ty pak způsobují známá omezení v přístupu k zařízení, zejména při jeho údržbě. V tomto případě je cílem chemiků zajistit maximální čistotu vody v primárním okruhu a nepřipustit sebemenší znečištění vody dobře se aktivujícími prvky.
- Chemie na jaderné elektrárně má i významnou diagnostickou úlohu. Jak je známo, jsou štěpným, radiotoxickým produktům, vznikajícím při dělení jader uranu, postaveny do cesty bariéry zamezující jejich průniku do životního prostředí. Těmito bariérami jsou zejména pokrytí palivových tablet, primární okruh jako celek a kontejnment. V elektrárně však existuje i mnoho dalších rozhraní, bariér, tepelných výměníků, jejichž absolutní těs-

nost je nutná. Zde je chemie jedinečná v tom, že může odhalit již velmi malé netěsnosti na základě chemických a radiochemických rozborů médií na obou stranách monitorované bariéry. Jednoduše se vybere to, co je na jedné straně hojně a nemůže být na druhé straně bariéry, co je dobře stanovitelné a pak se již „jen“ sleduje, zda-li se tento indikátor objeví tam, kde být nemá. Tato metoda také dovoluje kvantifikaci případného problému. To znamená, že nám umožňuje spočítat, kolik vody by z jednoho okruhu prolínalo do okruhu druhého v případě nějaké netěsnosti.

- Proudí-li kapalně médium zařízením, stává se nosičem informace o stavu tohoto zařízení. Například v sobě nese více či méně korozních zplodin. Měřením koncentrace a složení těchto zplodin hodnotíme průběh koroze zařízení. U velkých elektrických transformátorů se ve složení jejich pracovní náplně objevuje informace o stavu celého zařízení. U točivých strojů mazaných olejem je možno na základě analýzy olejů určit stav třecí plochy a můžeme s velkým předstihem stanovit, zda-li je stroj na cestě k zadření, či nikoliv.
- Chemie má také co do činění s účinností elektrárny. Špatné složení chladicí vody může způsobit zarůstání výměníků tepla různými organizmy. Jsou známé patálie s bakteriemi, řasami, ale i s vyššími organizmy, jako jsou například šneci, kteří ucoupou chladicí okruh a odstaví tak elektrárnu z provozu. Snažíme se o to, aby voda svým základním složením nepodporovala růst organismů. V nouzi přistupujeme k používání různých biocidů, což se nám nelíbí, ale díky někdy nevhodné kvalitě vod v našich řekách nám nezbyvá než v nutných případech přijmout i toto řešení. Pak je naším úkolem omezit tento způsob ošetřování vody na nezbytné minimum.

### **Jaké máme nástroje pro naši práci?**

- Podíváme-li se na technologii jaderné elektrárny podrobněji, zjistíme, že jde v podstatě o jednu velkou úpravnu vody. Vyrábíme demineralizovanou vodu, která se svojí kvalitou blíží chemicky čisté vodě. Tato voda se doplňuje do systémů jaderné elektrárny, ve kterých se dále upravuje dávkováním korekčních chemikálií, případně se dále přečišťuje. Nadbilanční vody se také čistí. Vrací se do technologie, případně se vypouští do řeky jako čistá voda, někdy daleko čistší, než byla když byla ještě vodou říční. Nejhojněji se na jaderné elektrárně používají iontovýmenné technologie, odparky, filtry všeho druhu, biologické čistírny. Co je bezesporu chemickou továrnou, je technologie zpracování radioaktivních odpadů. K chemii vody zde přistupuje i chemie cementu, bitumenu, technologie srážení, odstředování a dokonce mohou být používány i sklářské technologie.
- Zvláštní kapitolou je analytická chemie aplikovaná pro potřeby jaderné elektrárny. Abychom mohli řídit provoz technologií jaderné elektrárny, zajišťovat požadovanou kvalitu výpustí elektrárny do životního prostředí, mít pod kontrolou radiační situaci, korozi a degradaci zařízení, potřebujeme mít k dispozici dokonalou analytickou chemii včetně automatického technologického měření jakosti provozních médií. Je to kapitola sama pro sebe a na dlouhé popisování. Ve zkratce řečeno. Dnešní laboratoř jaderné elektrárny se zabývá zejména analýzou vody, stopovou analýzou, gamaspektrometrickou analýzou atd. Má specifikum v tom, že musí zpracovávat radioaktivní vzorky, vzorky plynů, pevných látek, kapalin včetně ropných produktů. Některé vzorky mají speciální složení, takže nelze použít standardních metod k analýze a musíme si vypracovávat svoje zvláštní postupy. Laboratoř se zabývá i speciálními biologickými rozbory.

V tomto nástroji úlohy chemie na jaderné elektrárně není možno jít do podrobností a jako autor mám problém s tím, co zmínit a co přejít bez komentáře. Proto jsem se rozhodl na závěr uvést pár chemicko-technicko-biologických zajímavostí jen tak, jako pár střípků do mozaiky:

### **Chladicí okruh JE Temelín coby čistírna odpadních vod:**

Každého upoutá pohled na chladicí věže elektrárny. Co se ale děje uvnitř? Věže slouží k chlazení vody z kondenzátorů turbín. Mimoto se tam ale dějí i jiné věci. Chladicí věž je ve spodní části doslova napěchována plastovými výplněmi, které zajišťují rovnoměrné rozdělení proudu vody po průřezu věží. Na površích těchto výplní se po nějaké době provozu vytvoří biologické blána, která začne pracovat jako biologický filtr vody. Ve věži je zahájen proces čištění vody. Odbourávají se organické nečistoty, probíhá likvidace amoniaku. Jde v podstatě o technologii biofiltrace užívané v čistírenství i ve vodárenství. Rozdíl je pouze v tom, že na jaderné elektrárně je tato technologie provozována s jiným hydraulickým a jiným látkovým zatížením. V případě Jaderné elektrárny Temelín to znamená, že vracíme do Vltavy méně organických nečistot, než jsme z ní odebrali.

### **Chladicí okruhy technické vody – producent exotických řas.**

Na Jaderné elektrárně Temelín jsou k dispozici chladicí bazény, chladicí tzv. technickou vodu. Jde v podstatě o umělé otevřené vodní nádrže, obsahující vždy teplou vodu. V těchto nádržích se provádí korekce chemického režimu dávkováním inhibitorů koroze a dalších činidel. Po uvedení elektrárny do provozu se nám však v těchto bazénech objevily v poměrně velkém množství zelené organizmy. Byli jsme nuceni se tímto problémem zabývat a na pomoc jsme si pozvali odborníky z AV ČR z Botanického ústavu v Třeboni. Všichni byli překvapeni. To, co se nám množí v technické vodě, je exotický organismus, teprve nedávno v rybníkách u Paříže objevená řasa. Její zvláštnost spočívá v tom, že obsahuje kapičku oleje, která ji udržuje u hladiny vody, na slunci. Je teorie, která říká, že tento typ řas stál u zrodu ropných ložisek. A tak je tu problém biologicko-technologicko-chemický. Technologii Jaderné elektrárny Temelín tyto planktonní řasy zřejmě nevadí a tak se snažíme odpovědět na otázku, zda-li je řasa trachydiskus naším nepřítelem, kterého je nutno hubit, či je naším spojencem potlačujícím korozi, kterého je třeba hýčkat? Kdo má k tomuto problému na jaderné elektrárně nejbližší? Samozřejmě chemici. A tak se tím zabýváme.

### **Analytická chemie – jak se ve vodě rozpouští nerezové oceli?**

Co se dostane do aktivní zóny reaktoru a co má schopnost se aktivovat na radioaktivní neklid, to se tam aktivuje. Dříve, nebo později. Tak vznikají v primárním okruhu jaderné elektrárny tzv. aktivované korozní produkty, které jsou hlavním problémem radiační ochrany při odstávkách. Jde o aktivované atomy z konstrukčních materiálů primárního okruhu. Ty se dostávají do aktivní zóny tím, že se nerezová ocel po atomech rozpouští a rozpuštěné atomy pak na jiném místě s jinou teplotou vykristalizují. Abychom poznali, jak tento proces běží na Jaderné elektrárně Temelín, musíme být schopni analyzovat tato stopová množství rozpuštěné nerezové oceli. Stanovujeme tedy nanogramy Ni, Cr a dalších kovů v primární vodě. Ano, všechno je ve vodě rozpustné, i austenitická ocel.

### **Kouzlo titanu.**

Toto by byl příběh téměř historický. Tady chemie velmi efektivně a úspěšně zasáhla do projektu jaderné elektrárny. Po dlouhých debatách ve fázi projektu Jaderné elektrárny Temelín se nakonec udělalo moudré rozhodnutí a kondenzátory turbín se na Jaderné elektrárně Temelín vybavily titanovými trubkami. Tato materiálová změna má dalekosáhlé důsledky. Jako kouzlem bylo najednou možno úplně změnit koncepci chemického režimu sekundárního okruhu. Umožnilo to zvýšit alkalitu vody sekundárního okruhu tak, že do té doby strašák, erozní koroze okruhu, zcela zmizel. Čistota vody okruhu se řádově zlepšila, životnost konstrukcí parovodů se nyní odhaduje na stovky let a parogenerátory jsou nyní čisté jak pračka v reklamě na calgon.

Občas své kolegy elektrikáře, strojaře a další profese dráždím konstatováním, že jaderná elektrárna je chemická továrna. I když to na první pohled zní divně, myslím, že nebudu daleko od pravdy.

GLOBALNÍ JADERNÉ PARTNERSTVÍ POD TAKTOVKOU AMERIKY

---

únor 2006

**Vláda prezidenta George Bushe představila plán na vytvoření globálního jaderného partnerství (GNEP). Významným spojencem v jeho realizaci by mělo být Rusko. Bývalí protivníci ve studenovělečném jaderném zbrojení chtějí nyní vzájemnou spoluprací zajistit, aby se v nestabilních zemích jaderné elektrárny nestaly zástěrkou pro výrobu nebezpečných zbraní.**

S nápadem na globální jaderné partnerství přišly Spojené státy již před dvěma lety, když se objevily první obavy z iránského programu na obohacování uranu. Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) projekt uvítala. Podle plánu se Amerika a Rusko stanou hlavními dodavateli reaktorového paliva ostatním zemím a zároveň odběrateli použitého paliva. Tímto způsobem by se například dalo předejít nutnosti obohatit uran před použitím v elektrárnách, čímž argumentuje Írán. Odebráním použitého paliva by zase obě jaderné mocnosti zabránily tomu, aby se bez dozoru přepracovalo na nebezpečné plutonium. Země, které chtějí využívat bezemisní jadernou energii místo spalování fosilních paliv, by si palivo do reaktorů vlastně pronajímaly, čímž by jim odpadly značné investice do palivového cyklu. Amerika a Rusko tedy počítají, že jejich nabídka bude pro ostatní země finančně zajímavá. Do iniciativy chtějí postupně pozvat i Velkou Británii, Francii, Japonsko a Čínu.

Pro Spojené Státy znamená program GNEP jadernou renezanci. Použité palivo z cizích reaktorů chtějí Američané přepracovat a zbytek uložit – bude tedy potřeba postavit přepracovací závody, podpořit výstavbu nových jaderných elektráren s tzv. rychlými reaktory schopnými využívat přepracované palivo a učinit zásadní rozhodnutí ohledně skladování nezpracovatelných zbytků. Zvláště poslední bod bude pro Bushovu administrativu těžké obhájit, neboť současné zákony nedovolují ukládat cizí jaderný odpad na americké půdě. Spojené státy opustily od přepracování použitého paliva v 70. letech, protože během procesu získané plutonium se dalo využít k výrobě jaderné bomby a navíc se v té době jevilo jako neekonomické. Technologický pokrok, rostoucí světová poptávka po energii (podle některých odhadů vzroste do roku 2050 o polovinu) a hrozba globálního oteplování ale posouvají metodu přepracování zpět do centra pozornosti. Ve Francii, Japonsku a Rusku se již běžně používá.

Projekt globálního jaderného partnerství získá na rozjezd 250 miliónů USD z federálního rozpočtu na rok 2007. Kromě scénáře na nový způsob zacházení s palivem obsahuje i vizi dodávek malých licencovaných reaktorů do rozvojových zemí. Tyto miniaturní reaktory mají generovat něco mezi 5–10 % energie klasických elektráren a budou prý dodávány na klíč. Po skončení životnosti se nebudou doplňovat novým palivem, ale celé se opět vrátí do Spojených států. Velké naděje jsou v tomto případě vkládány do výzkumu PBR reaktorů v Jižní Africe a Číně. Část peněz by také měla jít na výzkum snižování radioaktivity konečných odpadů k uložení. Kritici plánu GNEP ale poukazují na obrovské finanční požadavky jeho realizace a na dlouhou návratnost investic.

KONFERENCE JADERNÝCH KOMUNIKÁTORŮ PIME 2006 (VÍDEŇ, 12.–16. 2. 2006)

---

únor 2006

**Konference se zúčastnilo více než 170 expertů na jadernou komunikaci z celého světa. Téměř celý svět se obrací pozitivněji k jaderné energetice. Rozhodujícími argumenty je zajištění dostatku elektřiny a nebezpečí klimatických změn. V poslední době však vyvstává jeden nový problém, a to nebezpečí šíření jaderných zbraní. V komunikaci je potřeba zdůrazňovat, že z použitého paliva normálního komerčního energetického reaktoru nelze jadernou zbraň vyrobit. Plná znění prezentací naleznete na [www.pime2006.org](http://www.pime2006.org).**



**Dr. Fatih Birol**, ředitel divize ekonomických analýz Mezinárodní energetické agentury IAEA vystoupil s obsáhlým **rozborem energetické situace světa**. Varoval před následky, pokud svět nezmění energetickou politiku. IAEA udělalo prognózu vývoje při současné politice: velké zvýšení spotřeby uhlí, prudké zvyšování spotřeby plynu, dominantní postavení ropy, stagnace jádra, jen lehké a nevýznamné zvýšení obnovitelných zdrojů. Toto ovšem vůbec není tzv. trvale udržitelný rozvoj! „IAEA věří, že existuje obrovský potenciál pro rozvoj jaderné energetiky ve světě,“ řekl pan Birol. Pokud se nezvýší cena ropy, aby se vyplatilo otevřít nová ložiska, dojde ropa Saudské Arábii do 15 let, celosvětově to bude do 40 let. Ropa a plyn jsou umístěny zejména v politicky nestabilních zemích středního východu a Ruska. Strmě roste závislost EU na dovozu plynu. Stále se zvyšuje spotřeba ropy pro dopravu.

**Otázka skleníkových plynů:** Čína bude mít v roce 2030 o 30 % více CO<sub>2</sub> než všechny ostatní země dohromady, přepočteno na obyvatele to však bude stále méně než v zemích OECD! 1,4 miliardy lidí nebude mít ani v roce 2030 přístup k elektřině!

Pro výrobu elektřiny je jedinou alternativou jádro, pro dopravu biopaliva a případně nějaké nové typy paliv (vodík?) a pro domácnosti jsou jedinou cestou úspory.

**Komunikační strategie IAEA:** dodávají fakta a prognózy ministerstvům, přednášejí. Zdůrazňují, že politické rozhodnutí musí přijít ihned. Vítají rozhodnutí USA, které je logické a jediné možné (omezit závislost na ropě, rozvíjet jádro). Těžaři vědí, že ropy bude málo, tak zatím drží ceny nízko, aby vytvořili dojem, že je vše v pořádku a spotřebitelé se jim rychle nepřeorientovali na jiná paliva.

**Černobylské forum** – 80 expertů z 12 zemí světa, 6 mezinárodních organizací a vlády Ruska, Ukrajiny a Běloruska vydalo **zprávu o následcích havárie po 20 letech**. Je v podstatě totožná se zprávou vydanou před 10 lety, ale tentokrát je potvrzená i vládami dotčených zemí. Ty dosud předstíraly horší následky, aby dostávaly finanční podporu.

**Závěry lékařské:** bylo zasaženo cca 5 milionů obyvatel radiačními dávkami srovnatelnými s dávkou přírodního pozadí. 600 000 lidí se zúčastnilo likvidačních prací – ti byli zasaženi nejvíce. Z nich dodnes cca 60 umřelo na následky ozáření. Podle statistik a prognóz by maximálně v budoucnu mohlo z nich na následky ozáření (rakovina) ještě umřít cca 4 000 lidí. Uvážíme-li, že normálně kdekoliv na světě bez jakékoliv souvislosti s radiací umírá cca 25 % populace na spontánně vzniklou rakovinu, pak ony 4 000 představují jen 2–3 % oproti spontánním případům, čili vlastně nebudou ani rozpoznány v rámci přirozených fluktuací onemocnění. To je diametrální rozdíl oproti tomu, co tvrdí odpůrci atomu – že obětí Černobylu jsou statisíce. Není to pravda. Nebyly pozorovány žádné případy genetických efektů, malformací a deformit u nově narozených dětí navíc oproti nezasaženým územím kdekoliv jinde na světě. (Naopak je jich v dotčených územích méně, protože obyvatelstvu se zde po havárii dostalo lepší zdravotní péče. U zvířat a rostlin v přírodě však nějaké malformace pozorovány byly.) Bylo pozorováno zvýšení případů rakoviny štítné žlázy u dětí, která je ale z 99 % úspěšně léčitelná. Umřelo na ni 9 dětí.

**Nejhorší následky Černobylu jsou v rovině psychologické.** Lidé se museli evakuovat, ztratili domovy. Mluví se o nich jako o „obětech“. Jsou málo informováni o skutečných následcích a málo poučení, jak mají žít. Propadají proto beznaději a alkoholismu a jejich životní styl je naprosto špatný. Také zcela zbytečně a bezdůvodně bylo zabito mnoho nenarozených dětí, a to jen kvůli strachu jejich matek (zejména v západních zemích). To jsou asi nejsmutnější oběti Černobylu, protože ve skutečnosti nebyly ohroženy a potraty byly zbytečné.

**Ekonomické následky** – pro dotčené oblasti byly obrovské. Destrukce osídlených komunit, náklady na odstranění následků havárie, uzavření ostatních bloků elektrárny. Další náklady budou vynaloženy na nový kryt nad havarovaný reaktor.

**Životní prostředí** – 30 km uzavřená zóna není doporučena k bydlení, do ostatních oblastí se lidé vracejí, protože radioaktivita již poklesla natolik, že je možné provozovat zemědělství. Uzavřenou zónu osídlila divoká zvířata, která tu dnes nejsou rušena (medvědi, vlci, dravci).

Zajímavé porovnání:	$^{137}\text{Cs}$ (PBq)	Kolektivní dávka (mSv)	Ekonomický dopad	Sociální dopad	Počet přímých úmrtí	Odhad počtu následných úmrtí
Hirošima	0,2	30	velký	velký	200 000	2 000
Spad po testech jaderných zbraní	1 000	5 000	malý	žádný	neznámý	neznámý
Černobyl	85	200	velký	velký	30	4 000

**Závěr:** po 20 letech je lepší zdravotní stav obyvatel a zlepšilo se životní prostředí. Je ale horší sociální stav obyvatel. Jediná pozitivní zpráva: Černobyl pomohl ostatním jaderným elektrárnám být bezpečnějšími.

Další informace na internetu na <http://world-nuclear.org/info/chernobyl/inf07.htm> nebo na <http://www.iaea.org/NewsCenter/Focus/Chernobyl/index.shtml>.

**Bruno Combi** – zakladatel sdružení **Environmentalists for nuclear**, které má 8 000 členů v 50 zemích světa. Přednáší, píše knihy, snaží se vzdělávat veřejnost. Ve své prezentaci zdůraznil růst energetické spotřeby ve světě (v Indii spotřebuje obyvatel 10krát méně energie než Evropan, v Evropě 10krát méně než obyvatel USA!), nebezpečí skleníkového efektu (ve 20. století vzrostla teplota o 1 °C, v 21. se čeká růst o 3–10 °C). I kdybychom okamžitě zastavili vypouštění CO<sub>2</sub>, teplota poroste – proces byl nastartován.

#### Přirovnání použitelná pro komunikaci:

- 6 milionů lidí umře ročně na následky kouření. To jsou stejné následky, jako kdyby se odehrálo 400 černobylských havárií denně!
- 350 000 lidí umře ročně na následky pracovních úrazů – z toho jen 1 byl pracovníkem jaderného průmyslu.
- Při současném trendu za 25 let vzroste spotřeba energie 2krát a vypouštění CO<sub>2</sub> 4krát.
- Náhrada 1 reaktoru EPR větrnými vrtulemi by pro Francii znamenala osázet vrtulemi celé jižní pobřeží Francie a celou Korsiku po pobřeží kolem dokola.
- Při dálkovém letu letadlem obdrží člověk 50násobek radiační dávky, než kdyby zůstal na zemi.
- V Brazílii v lokalitě Guapari je přírodní pozadí cca 40 μSv za hodinu (normálně jinde je to cca 0,3). Lokalita je nabízena turistům jako „léčivé lázně“. Kdyby taková úroveň byla v jaderné elektrárně, nedostala by povolení k provozu!
- Grafické porovnání velikosti WTC v New Yorku, běžné jaderné elektrárny a letadla – odpověď na strach z teroristického útoku na jadernou elektrárnu.
- Stejná velikost rizika: vykouřit 1,4 cigarety, cestovat 6 minut kanoí, cestovat 500 km autem, žít 50 let 10 km od pracujícího reaktoru.
- V EU se produkuje ročně 40 000 m<sup>3</sup> všech radioaktivních odpadů, tj. 90 cm<sup>3</sup> na osobu, tj. 3 cm x 3 cm x 9 cm. Z toho je použitého jaderného paliva jen 1 730 tun, tj. 4 g na osobu. Toxických nejaderných odpadů se produkuje v EU 36 milionů tun na osobu.

**Hledání místa pro úložiště nízko a středně aktivních RAO ve Slovinsku** – vyhlásili, ať se hlásí lokality, které by úložiště přijaly. Slíbili 200 000 eur ročně při průzkumu a 1 milion eur při zahájení. Přihlásilo se 8 lokalit, 2 se ukázaly jako nevhodné, 2 odstoupily pro nátlak obyvatel (starostové se přihlásili bez předchozího vědomí občanů), 1 odstoupila pod nátlakem okolních lokalit. Nyní se testují tři lokality (všechny v blízkosti stávající jaderné elektrárny Krško).

**Studie londýnské King's College o vnímání rizika** – budoucnost jádra v Evropě závisí na vnímání rizik různými skupinami lidí – politiky (zabezpečení dodávky elektřiny, klimatické

změny, ekonomická hlediska), obyvateli (strach z havárie). Názor veřejnosti se do velké míry řídí výsledky výzkumů – přikloní se k většině.

Souhrn doporučení pro komunikaci: soustředit se na komunikaci v jaderných lokalitách, budovat lokální vztahy, budovat důvěru pomocí objektivitu, poctivosti, otevřenosti a kompetentnosti. Mluvit o energetickém mixu. Mluvit o jádře a jeho pozitivěch co nejvíce, nastavit srozumitelný slovník. Vzdělávat mládež. Mluvit i o jiných použitích jádra (medicína atd.), protože v laické veřejnosti existuje jen spojení jádro = zbraně = nebezpečí.

**Debata o budoucnosti jádra ve Velké Británii** – v posledních měsících jsou noviny plné debaty o jaderné energetice. Lidi to zatím nezajímá, vnímají to jako starou známou hru odpůrců a příznivců. Zajímá je zdraví, školství, peníze, ... Tradiční způsob komunikace nestačí. Lidé se ptají: Co to přinese mně osobně? Je třeba posun v postojích od „pocitů“ k „přemýšlení“. Vzdělávat, mluvit o energetickém mixu, zdůrazňovat osobní postoj toho, kdo o jádru mluví, vzbuzovat zájem a zvyšovat znalosti veřejnosti. Mluvit jejich jazykem a být hodně ofenzivní. Blair řekl, že debata musí být vedena co nejotevřeněji a že je potřeba silný hlas průmyslu.

**Prof. Helmut Bock, Atominstitut Vídeň** – stručný přehled vývoje protijaderného postoje v Rakousku. Do roku 1978 bylo Rakousko projaderné a kdyby to tak zůstalo, mělo by dnes 6 energetických reaktorů. V roce 1960 uvedli Rakušané do provozu svůj první jaderný reaktor. Byl to 10MW experimentální reaktor ve vědeckém ústavu v Seibersdorfu nedaleko Vídně, o 2 roky později další přímo ve Vídni, třetí v roce 1965 na universitě v Grazu. V roce 1980 dostavěli jadernou elektrárnu Zwentendorf. Hotovou elektrárnu těsně před zahájením provozu zmařilo politicky motivované referendum (tehdejší kancléř spojil s elektrárnou své setrvání ve funkci a opozice ho chtěla odstranit). 36 % obyvatel se ho vůbec nezúčastnilo, 31 % bylo pro spuštění a 31,5 % proti. Paradoxně to byli občané z druhého konce Rakouska, než kde elektrárna stála, celkem asi pouhých 30 000 lidí z 5 milionů oprávněných voličů. Rakousko pak muselo postavit v těsné blízkosti uzavřené jaderné elektrárny uhelnou elektrárnu, která tam dodnes kouří. Politický mindrák z tohoto zpackaného rozhodnutí nese rakouská politická reprezentace dodnes. A protože 25 let masíruje občany umělou protijadernou ideologií, dostala se do začarovaného kruhu. V Rakousku mají zákon, že nesmějí užít jaderné štěpení k výrobě elektřiny (mohli by ho však užít např. k výrobě vodíku...). Prof. Bock s paní Drábovou napsali knihu o česko rakouských jaderných vztazích, která na jaře vyšla v češtině.

**Průzkumy mínění v USA** – pro jádro 70 % a proti 24 %. Rozdíl se už asi 10 let stále zvyšuje ve prospěch jádra. V okolí jaderných elektráren dokonce 85 % lidí je pro a bylo by pro stavbu dalšího reaktoru na tomtéž místě. Elektrárny dělají ve svém okolí vzdělávací programy pro školy – nahradili tím informační centra uzavřená po 11. 9. V posledních letech se zájem studentů o jaderné obory ztrojnásobil, ale stále to nestačí.

**Exkurze do laboratoří IAEA v Seibersdorfu** – výzkum a trenink pro všechny členské země OSN. Dělají to, co si přejí členské země. Zabývají se radiačním šlechtěním plodin (rýže, fazole, banány, jablka) na vyšší výnosy a toleranci k chorobám, aby se zlepšilo zásobování rozvojových zemí potravinami. Velmi úspěšný je projekt vymýcení nemoci přenášené mouchou tsetse – pěstují ve velkém samečky mouchy, sterilizují je zářením, vypustí je do přírody, kde samečkové soutěží s existující populací, ale z jejich spojení se samičkami se nenarodí potomstvo – populace mouchy klesá, na jednom místě v Africe už byla vyhubena. Má to obrovský význam pro zdraví obyvatel. Zkoušejí tak i bojovat s komáry přenášejícími malárii. Dále provozují radioekologický monitoring životního prostředí, sledování lepšího využití hnojiv radioizotopovými metodami, dozimetrické systémy pro měření dávek v medicínském použití záření, vyvíjejí a distribuují referenční materiály pro měření radioaktivity v různých složkách prostředí, potravin apod. Jedním z nejdůležitějších úkolů je program bezpečnostních záruk za nešíření jaderných zbraní. Inspektoři IAEA přivážejí vzorky z míst podezřelých z vývoje ja-

derných zbraní a ty velmi přesně vyhodnocují. Najdou i jen stopy štěpitelných materiálů a podle izotopového složení usvědčí kohokoliv z přípravy bomby. Nepomůže uklizení prostoru, nepomůže vymalování ani čerstvá podlaha. „Jen když přijedete na místo, kde podle satelitních snímků byla veliká výrobní hala a není tam nic, jen čerstvě vyasfaltovaná plocha, tak tam nic nenajdete,“ říká pracovník Seibersdorfu. „Ale to také o něčem svědčí,“ dodává.

### INDIE DOHODLA S FRANCIÍ SPOLUPRÁCI NA ROZVOJI JADERNÉ ENERGETIKY

---

březen 2006

**Francouzský prezident Jacques Chirac na pracovní návštěvě Indie podepsal s předsedou indické vlády Manmohanem Singhem souhlas o budoucí spolupráci obou zemí. Společným cílem je nejen podpora obchodních vztahů, ale také rozvoje jaderné energie a jaderného výzkumu včetně výstavby nových jaderných elektráren na indickém území.**

„Pokud je Indie na šestém místě v celosvětovém žebříčku zemí s největší energetickou spotřebou, která neustále narůstá, ..., pak nemůže čelit současným problémům bez zvýšení podílu jaderné energie“, vysvětlil Chirac indický zájem o jádro. Obě země se zavázaly ke vzájemné pomoci v několika oblastech jaderné energetiky, jako jsou výzkum a různé možnosti aplikací jaderné energie v zemědělství, lékařství a průmyslu, nakládání s jaderným odpadem, vytváření programů radiační ochrany obyvatelstva či v neposlední řadě také zvýšení informovanosti veřejnosti o výhodách a mírovém využití jaderné energie.

Zahájení spolupráce teď stojí v cestě jediná podmínka: Indie musí získat podporu 44 členů Skupiny jaderných dodavatelů (NSG), která kontroluje trh s jadernou energií. Podle pravidel NSG totiž země sdílející jaderné technologie musí poskytnout záruky, že poskytnuté informace nebudou zneužity k výrobě jaderných zbraní. Prvním úspěšným krokem v jednání s NSG je souhlasné vyjádření premiéra Singha, aby Mezinárodní agentura pro atomovou energii vykonávala bezpečnostní dohled nad indickými jadernými zařízeními. Významnou roli jistě hraje podpora samotné Francie, jedné ze zemí s největším objemem výroby jaderné energie na světě. Dokládá to výroky francouzského prezidenta: „Naprostě chápeme energetické problémy, které musí indická vláda řešit. Jestliže nepodpoříme snahu Indie vyrábět více elektřiny právě z jádra, pak dovolíme, aby zde vyrostlo více komínů produkujících skleníkové plyny“.

Optimisticky se podle diplomatů vyvíjejí klíčová jednání mezi Indií a USA o poskytnutí jaderných technologií. Očekává se, že by konečné rozhodnutí mohlo padnout již příští měsíc, kdy na pracovní návštěvu do Dillí přiletí americký prezident George Bush. V poslední době Bush vystupuje jako velký stoupenec jádra. „Budeme také hovořit o indickém civilním jaderném programu,“ vyjádřil se Bush k předmětu setkání s premiérem Indie.

Spotřeba energie v Indii se rapidně zvýšila – od roku 1990 do roku 2002 téměř dvojnásobně. Potvrzuje se, že tento trend bude nadále pokračovat. Elektřina vyrobená z jádra pokrývá asi 3 % z celkového objemu. Více jak polovinu pak zastupuje elektřina pocházející z fosilních paliv, jejichž zásoby jsou však omezené. Problém se zdroji energie chce Indie vyřešit větším důrazem na jadernou energii. Do roku 2050 se předpokládá, že elektřina z jádra bude zastupovat až 25 %. Podle Světové asociace pro jadernou energii (WNA) je v Indii v provozu 15 malých jaderných reaktorů s celkovým výkonem okolo 3 000 MWe. Indická jaderná energetika by měla do roku 2020 disponovat výkonem 20 000 MWe, čehož chce dosáhnout vybudováním až 24 jaderných zařízení.