

# Súčasný stav jadrovej energetiky v Slovenskej republike a vo svete

Predložený príspevok sa zaoberá krátkym prehľadom základných pojmov používaných v jadrovej energetike vo svete a v SR. Charakterizuje pojmy, ako sú jadrové palivo, moderátor, absorbér, chladivo, konštrukcia jadrového reaktora, typy jadrových reaktorov. Ďalej naznačuje možnosti bezpečného využitia jadrového potenciálu vo svete a v SR.

## Úvod

K získaniu dostatočného množstva energie prešli ľudia dlhú a obtiažnu cestu tisícročiami. A ani dnes nie je ľudstvo na konci. Ukazuje sa, že tradičné energetické suroviny – uhlie, ropa, zemný plyn – nebudú ľudstvu k dispozícii navždy a musíme počítať s tým, že v neďalekej budúcnosti sa ich zásoby budú znižovať. Do popredia záujmu sa dostávajú nové úsporné technológie i ne-tradičné zdroje energie. Nemôžeme sa však spoliehať na to, že by sa v dohľadnom čase celosvetová spotreba energie znižovala. So zvyšovaním úrovne rozvojových krajín i s ďalším rozvojom vyspelých štátov budú nároky na dostatok energie stále vyššie. Ani jadrová energetika v súčasnej podobe nie je konečným riešením na ceste za energiou. Veľké prostriedky sa vkladajú do výskumu nových typov jadrových reaktorov a hlavne do výskumu jadrovej syntézy.

Cesta k dnešnému rozvoju jadrovej energetiky bola dlhá, trvala viac ako 2 000 rokov, avšak všetko podstatné sa udialo až v 20. storočí. Začalo sa to hlbším poznaním hmoty, pochopením stavby atómov a objavením prirodzenej rádioaktivity. Rozbitie atómového jadra a ovládnutie reťazovej reakcie potom znamenalo začiatok nového veku.

## Zo životopisu jadrovej energetiky

Dvaja grécki filozofi – Leukippos z Milétu a Demokritos z Abdéru – došli už niekedy v 5. storočí pred n. l. k záveru, že hmotu nemožno deliť do nekonečna. Usúdili, že musia existovať nejaké malé, ďalej neviditeľné častice (po grécky neviditeľný je atomos), ktoré nazvali atómy.

Tento názor pretrval cca 2 000 rokov a zastávali ho mnohí známi fyzici, napr. Isaac Newton (1643 – 1727). S omnoho prepracovanejšou atómovou teóriou hmoty prišiel anglický chemik John Dalton (1766 – 1844), ktorý zistil, že i veľmi malé čiastočky látky stále obsahujú rovnaké prvky. Napríklad nepatrná kvapka vody obsahuje vodík a kyslík, rovnako ako celé jazerá [1].

V 17 roku života bol holandský vedec a veľmi obetavý človek W. C. Röntgen (1845 – 1923) vylúčený zo školy, keďže neprezradil spolužiaka, ktorý nakreslil karikatúru profesora. Napriek tomu sa



Obr.1 Smolínec obsahujúci rádium, resp. urán a stará kúpeľná budova v Jáchymove

stal univerzitným profesorom a objavil žiarenie nového typu – paprsky X, ktoré prenikali mäkkým tkanivom ľudského tela (Nobelova cena 1901). Fosforenciu a neskôr aj rádioaktivitu týchto papršiekov ako prvý objavil a potvrdil francúzsky fyzik A. H. Becquerel (1852 – 1908). Nový rádioaktívny prvok – rádium – získaný z tzv. smolinca z českého Jáchymova, objavili skvelí francúzski fyzici, manželka Piere Curie (1859 – 1906) a Maria Curie-Skłodowska (1867 – 1934); obr. 1 [1].

Usilovné skúmanie mnohými výskumníkmi prináša prvé ovocie. Sú objavené a pomenované častice alfa, tvorené jadrami hélia, častice beta, čo sú záporne nabité elektróny, a častice gama, kde ide o elektromagnetické žiarenie podobné röntgenovému žiareniu. Dánsky vedec Niels Bohr (1885 – 1962) vytvára názorný model atómu. V roku 1919 anglický fyzik Ernst Rutherford (1871 – 1937) uskutočnil umelú premenu jedného prvku na druhý tak, že ostreľoval atómy dusíka časticami alfa a získal atómy kyslíka. Angličan James Chadwick (1891 – 1974) objavil dovtedy neznáme častice – neutróny. Týmito časticami, namiesto dovtedy používaných častíc alfa na ostreľovanie jadier, začal jadrá ostreľovať taliansky fyzik Enrico Fermi (1901 – 1954). Avšak bombardovanie jadier rôznych prvkov neprinášalo hľadaný efekt a požadované jadrové štiepenie. Toto sa potvrdilo až pri bombardovaní uránu neutrónmi – potvrdili to špičkoví nemeckí fyzici L. Meitner (1878 – 1968) a O. Hahn (1879 – 1968) [2].

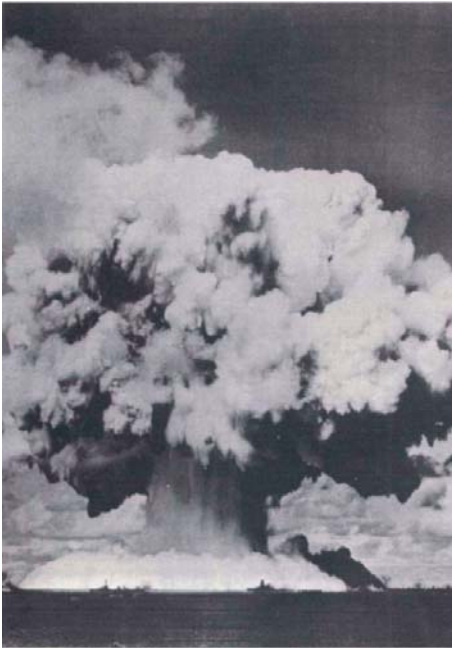
Aby mohla byť „odštartovaná“ reťazová reakcia, sú potrebné účinné elektricky nabité častice, ktorými sa ostreľujú látky, z ktorých sa získavajú neutróny. Ak takúto časticu urýchlime v urýchľovači častíc – cyklotrone (objavil a skonštruoval ho anglický fyzik E. O. Lawrence (1901 – 1958)), získa táto častica energiu, ktorá je potrebná na štiepenie uránu. Prvý jadrový reaktor zostrojil E. Fermi v roku 1943 na štadióne chicagskej univerzity. Prvá umelá reťazová reakcia bola spustená 2. 8. 1942. Keďže existovala opodstatnená obava, že Hitler pracuje na vývoji atómovej bomby,



Obr.2 Albert Einstein pri vysvetľovaní všeobecnej teórie relativity v roku 1915

zostavila vláda USA tím vedcov, ktorí pracovali tiež na jej vývoji. V tomto tíme boli všetci špičkoví fyzici tejto doby, napr. R. Oppenheimer, N. Bohr, E. Fermi, E. Teller vrátane nemeckých fyzikov, ktorí opustili nacistické Nemecko, napr. Verner von Braun či geniálny Albert Einstein (obr. 2). Prvá atómová bomba vybuchla 16. 7. 1945 na pokusnej strelnici v Novom Mexiku. V septembri 6. a 9., 1945 boli zhodené bomby na mestá Hirošima a Nagasaki (obr. 3).

Prvý elektrinu z uránu vyrobil a dodal do siete testovací reaktor ACRO v Idaho Falls v USA



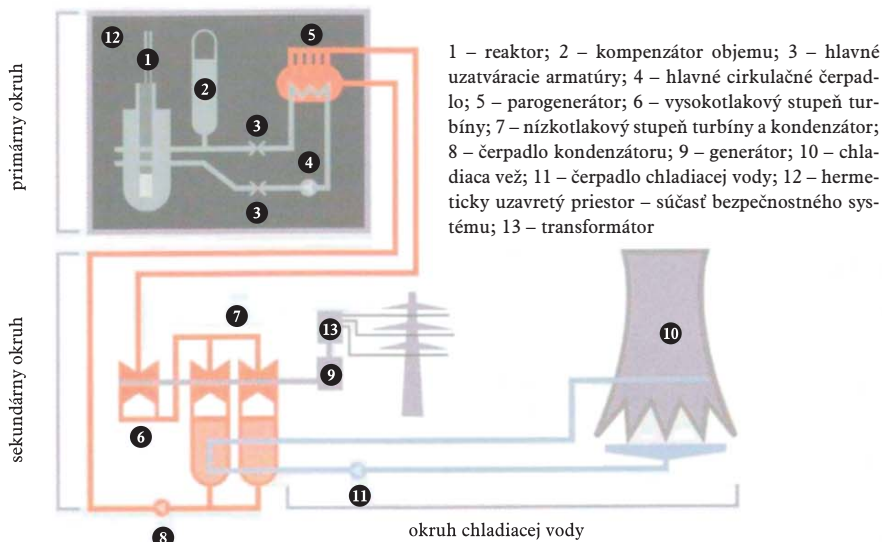
Obr.3 Typický hríb po explózii atómovej bomby a prvé dve atómove bomby zhodené na mestá Hirošimu a Nagasaki – little boy a fat man

v roku 1951. V roku 1954 bola v Obninsku pri Moskve uvedená do prevádzky prvá komerčná atómová elektrárňa, ktorá dodávala pre verejnú elektrickú sieť 5 MW. V roku 1955 bol dokončený prvý atómový ľadoborec Lenin. Od tejto doby je jadrová energetika na vzostupe po celom svete [3].

### Výroba elektrickej energie v jadrovej elektrárni

Jadrová elektrárňa, podobne ako klasická elektrárňa spaľujúca fosílna palivá, je zariadenie, kde dochádza k premene tepelnej energie na elektrickú energiu. Zdrojom tepla v klasických elektrárňach sú fosílna palivá uhlie, ropa, zemný plyn, zatiaľ čo pri jadrových elektrárňach je zdrojom tepla jadrové palivo [3].

Najjednoduchšia schéma jadrovej elektrárne je jednookruhová. Priamo v reaktore sa varom vody vytvorí para, ktorá sa vedie k turbíne, kde koná užitočnú prácu a po ochladení v kondenzátore sa vracia späť do reaktora. Je to jednoduchý postup, ale má obrovskú nevýhodu, pre ktorú sa nepoužíva, a to, že voda z reaktora môže byť rádioaktívna. S touto vodou sa dostáva do styku veľká časť strojového vybavenia elektrárne. Vo väčšine krajín vrátane Slovenska sa prevádzkujú dvojokruhové elektrárne.

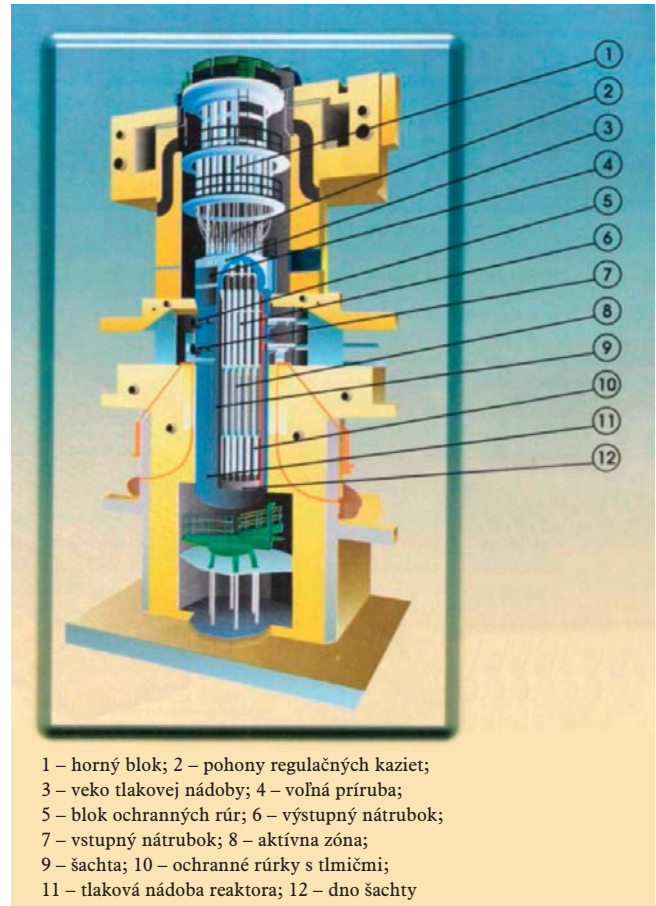


Obr.4 Schéma výroby elektrickej energie v dvojokruhovej jadrovej elektrárni a štiepenie uránu 235

Voda z reaktora koluje v tzv. primárnom okruhu. Rúrky primárneho okruhu prechádzajú výmenníkom tepla, tzv. parogenerátorom, kde ohrievajú vodu sekundárneho okruhu. Až v ňom vzniká para, ktorá sa vedie k turbíne a do kondenzátorov. Sekundárny chladiaci okruh vôbec neprichádza do styku s reaktorom. Schéma výroby elektrickej energie v takomto type elektrárne je na obr. 4 [4], [6].

### Konštrukcia jadrových reaktorov

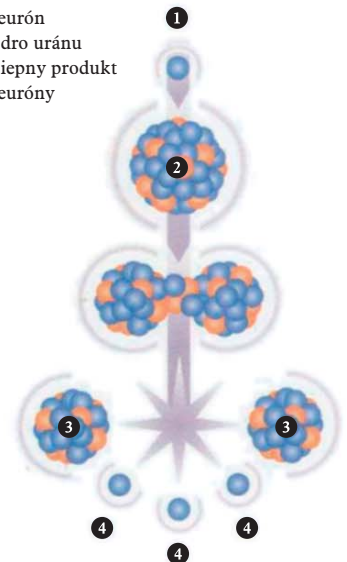
Princíp jadrových reaktorov je jednoduchý, ich konštrukcia je veľmi zložitá. Vyhotovenie reaktora závisí od mnohých ukazovateľov: typu paliva, chladiva, prevádzkového tlaku, teploty atď. Všeobecne je reaktor veľká nádoba alebo sústava nádob, ktorá



Obr.5 Schéma tlakovodného reaktora

- 1 – horný blok; 2 – pohony regulačných kaziet;
- 3 – veko tlakovej nádoby; 4 – voľná prírubica;
- 5 – blok ochranných rúr; 6 – výstupný nátrubok;
- 7 – vstupný nátrubok; 8 – aktívna zóna;
- 9 – šachta; 10 – ochranné rúrky s tlmičmi;
- 11 – tlaková nádoba reaktora; 12 – dno šachty

- 1 – neurón
- 2 – jadro uránu
- 3 – štiepny produkt
- 4 – neuróny



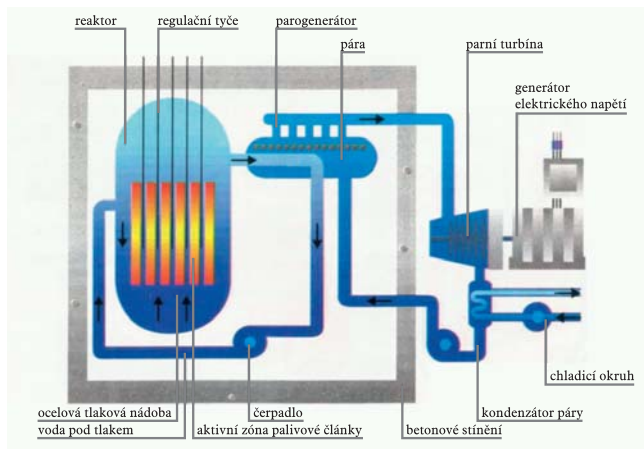
musí odolávať viac ako 30 rokov vysokým tlakom, teplotám a intenzívnemu toku neutrónov. Základné konštrukcie sú:

- **reaktor s tlakovou nádobou**, používa sa tam, kde je objem paliva približne rovnaký ako objem moderátora; je vyrobený zo špeciálnej nehrdzavejúcej ocele, váži niekoľko sto ton, priemer má asi 7 m a výšku 23 m,
- **reaktor s tlakovými rúrkami**, používa sa tam, kde je objem paliva oveľa menší ako objem moderátora, palivo je v rúrkach obklopených blokmi moderátorov,
- **reaktor s nádobou zo železobetónu**, ktoré sa stavajú priamo na stavenisku elektrárne s reaktormi používajúcimi na spomaľovanie neutrónov grafit.

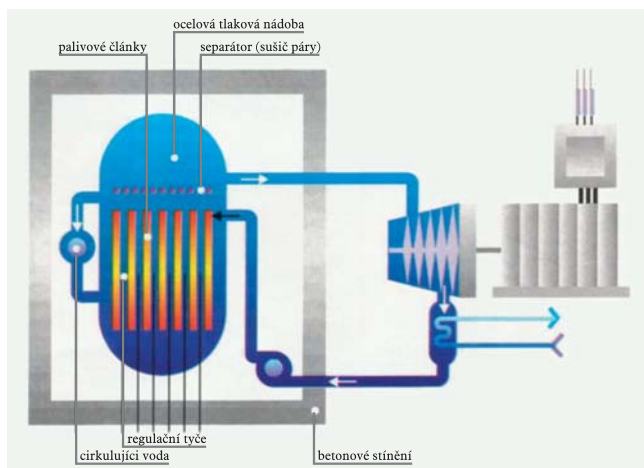
Na obr. 5 je znázornený najbežnejší tlakovodný reaktor, ktorý sa používa aj v jadrových elektrárnach Jaslovské Bohunice a Mochovce.

Vo svete pracuje viac ako 440 jadrových reaktorov rôznych konštrukcií. Ďalej sú uvedené najpoužívanejšie reaktory, resp. ich konštrukcie [1]:

- **tlakovodný reaktor PWR** (Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor) alebo ruský typ VVER (Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor) – pracuje ich asi 253, t. j. 57 % zo všetkých reaktorov vo väčšine štátov sveta, obr. 6,
- **varný reaktor BWR** (Boiling Water Reactor) je druhý najpoužívanejší reaktor – pracuje ich asi 94, t. j. 24 % z celkového počtu reaktorov sveta, obr. 7,
- **ťažkovodný reaktor CANDU** vyvinutý v Kanade a exportovaný do Indie, Pakistanu, Argentíny, Kórei a Rumunska, pričom dnes ich pracuje asi 35, obr. 8,
- **reaktor chladený plynom Magnox GCR** (Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor) používaný v Anglicku a Japonsku, obr. 9,

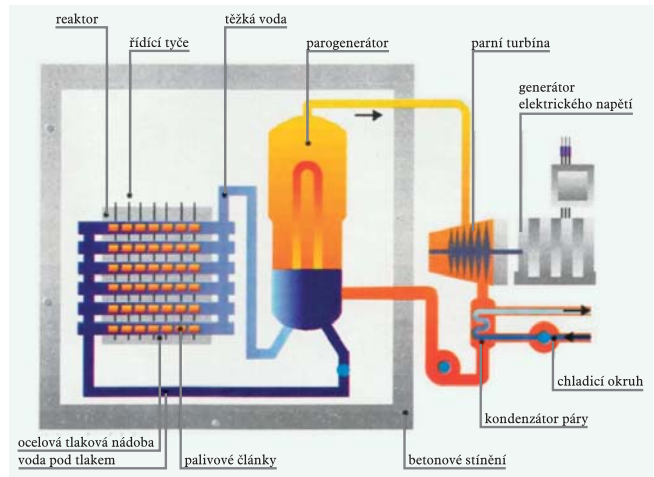


Obr.6 Technologická schéma tlakovodného reaktora typu ruskej konštrukcie VVER

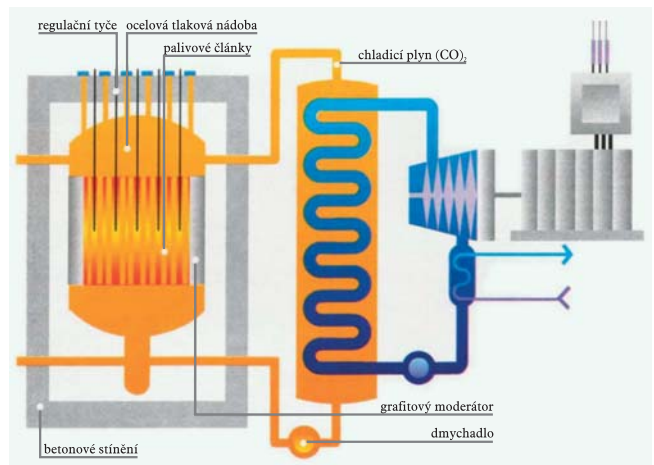


Obr.7 Technologická schéma práce varného reaktora BWR s výkonom 1 000 MW

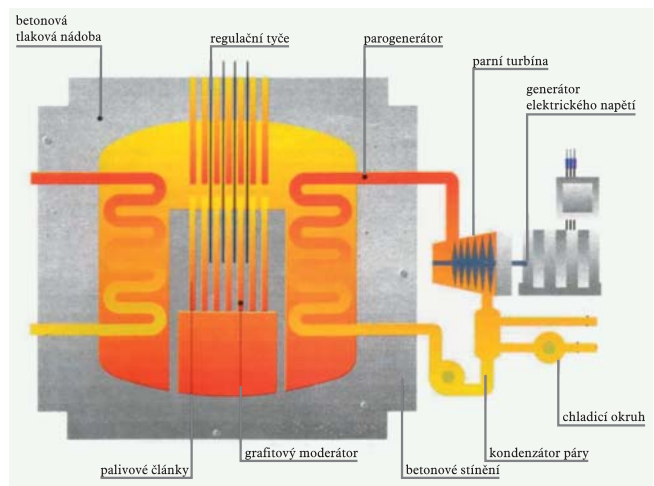
- **pokročilý reaktor chladený plynom AGR** (Advanced Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor), ktorý sa používa výhradne v Anglicku, obr. 10,
- **rýchly množinový reaktor FBR** (Fast Breeder Reactor) používaný v Rusku, Francúzku a Anglicku, obr. 11,
- **reaktor typu RBMK** (Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj), resp. LWGR používaný výhradne v krajinách bývalého ZSSR, napr. v Černobyle, obr. 12,
- **vysokoteplotný reaktor HTGR** (High Temperature Gas Cooled Reactor), ktorý sa používa zatiaľ experimentálne (keďže je veľmi perspektívny) v Nemecku, USA a Anglicku, obr. 13.



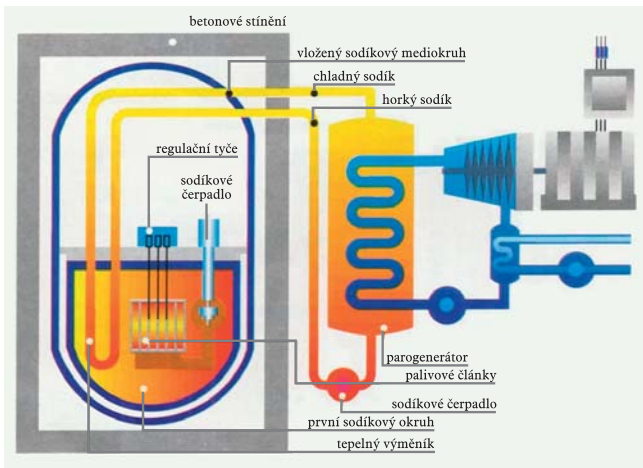
Obr.8 Technologické usporiadanie reaktora CANDU s výkonom 600 MW



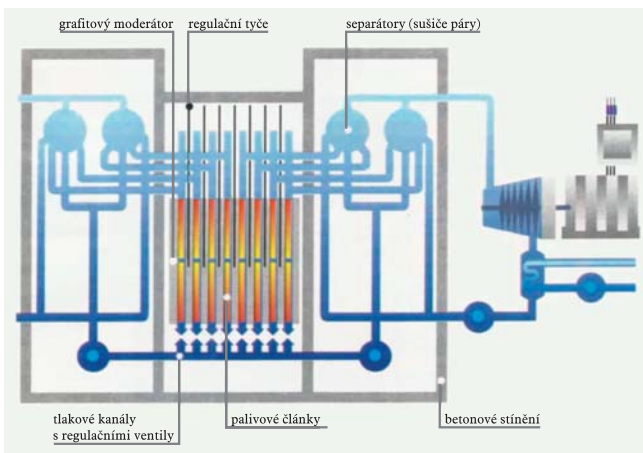
Obr.9 Technologické usporiadanie reaktora MAGNOX s výkonom 600 MW



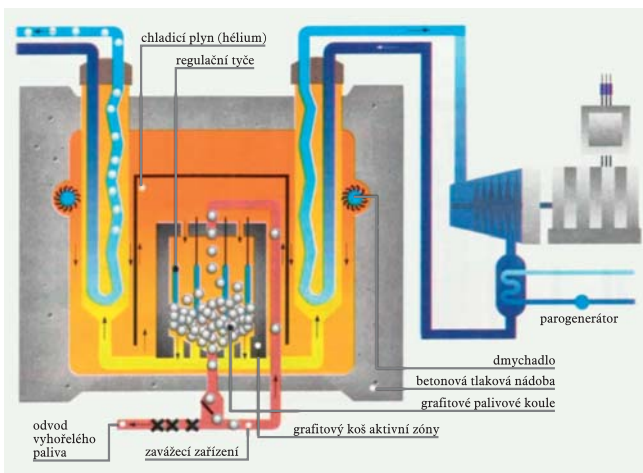
Obr.10 Technologické usporiadanie reaktora AGR s výkonom 600 MW



**Obr.11 Technologické usporiadanie reaktora FBR s výkonom 1 300 MW**



**Obr.12 Technologické usporiadanie reaktora RBMK s výkonom 1 000 MW**



**Obr.13 Technologické usporiadanie experimentálneho reaktora HTGR**

## Jadrové palivá

Z jadrových palív nachádzajúcich sa v prírode sa na štiepenie hodí len prírodný urán. Tórium sa používa len pri jadrovej konverzii. Prírodný urán obsahuje 0,71 % štiepateľného izotopu  $U_{92}^{235}$ , zvyšok tvorí izotop  $U_{92}^{238}$ .

V reaktorovej praxi sa ako jadrové palivo väčšinou používa izotopicky obohatený urán. Aktívne materiály palivových článkov sa podľa účelu delia na [2]:

1. materiály zaisťujúce štiepnu reakciu (štiepne materiály),
2. materiály zaisťujúce vznik nového jadrového paliva (množinové materiály).

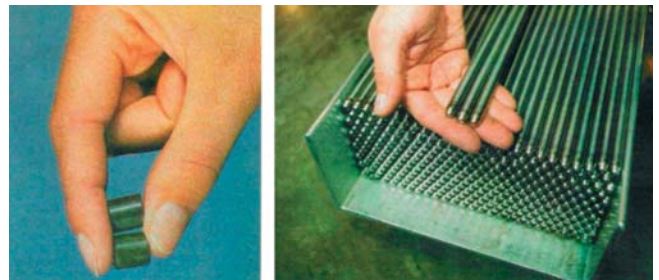
Do prvej skupiny patria materiály, ktoré obsahujú jeden z troch nasledujúcich izotopov:  $U_{92}^{235}$ ,  $U_{92}^{233}$  a  $Pu_{94}^{239}$ ,  $Pu_{94}^{241}$  pre tepelné reaktory, resp  $U_{92}^{238}$ , a  $Th_{90}^{232}$  pre rýchle reaktory. V prírode sa vyskytuje len izotop  $U^{235}$  a vo veľmi malom množstve je sprievodným izotopom uránových rúd  $Pu^{239}$ .

Do druhej skupiny patrí izotop  $U^{238}$  (výskyt v prírodnom uráne 99,3 %) a  $Th^{232}$  (výskyt v prírodnom tóriu 100 %).

Ďalšie delenie jadrového paliva možno robiť na základe jeho štruktúry, a to na:

- a) jadrové palivá kovové, urán sa leguje Cr, Ce, Y, Be, Mo s cieľom zvýšenia hustoty štiepneho materiálu,
- b) jadrové palivá keramické, čím sa myslia:
  - oxidy uránu, tória alebo plutónia, a to jednotlivo alebo ich zmesí,
  - neoxidové keramické materiály – karbidy, sulfidy, fosfidy, nitridy, silicidy, a to uránu, tória a plutónia resp. ich zmesí,
  - disperzné fázy v matrici z neštiepneho kovu (hliník, austenitická nehrdzavejúca oceľ) alebo z grafitu.

Jedna tableta (pozri obr. 14) jadrového paliva  $U^{235}$  s hmotnosťou cca 4,8 g má energetický obsah, ktorý nahradí 1,6 t hnedého uhlia; 0,88 t čierneho uhlia alebo 438 kg benzínu. V jednom jadrovom reaktore sa nachádza cca 40 t jadrového paliva, pričom toto množstvo nahradí ročne cca 300 000 nákladných vagónov uhlia. Tablety z  $UO_2$  sú ukladané do zirkónových tyčí, tie následne do kaziet a kazety do reaktora. Výmena vyhoreného paliva za čerstvé prebieha raz za 1 rok až 1,5 roka.



**Obr.14 Tableta jadrového paliva a zirkónová tyčinka naplnená palivom**

## Súčasný stav jadrovej energetiky na Slovensku

Publikovaný návrh energetickej politiky uvažoval do roku 2010 s prevádzkou 6 blokov jadrových elektrární, pričom pôvodne predpokladal ukončenie prevádzky Jadrovej elektrárne Jaslovské Bohunice V-1 (ďalej aj JE BO) v roku 2010, resp. 2012. Vláda SR dňa 14. septembra 2001 i na základe požiadavky EÚ prijala veľmi významné rozhodnutie, ktorým skrátila termín ukončenia prevádzky 1. a 2. bloku JE Jaslovské Bohunice V-1 na rok 2006 až 2008.

Skrátenie prevádzky JE Jaslovské Bohunice V-1 podľa rozhodnutia vlády znamená zabezpečiť v skorších termínoch nové zdroje. Najneskôr v roku 2007 by sme mali mať z nových zdrojov k dispozícii výkon 440 MW a od roku 2009 ďalších 440 MW. Slovenské elektrárne, a. s., na základe rozsiahlych analýz metódou najnižších nákladov skúmali možnosť náhrady rôznymi zdrojmi, pričom dospeli k jednoznačnému záveru, že najvýhodnejším variantom náhrady blokov je dokončenie 3. a 4. bloku Jadrovej elektrárne JE Mochovce (ďalej aj JE MO).

Taliansky ENEL získal 66 % akcií SE, a. s., po jeho vybratí vládou 6. 10. 2004, pričom SE, a. s., sumu 840 mil. euro. Do konca novembra 2004 kabinet definitívne schválil vstup zahraničného investora do SE, pričom reálne sa tak stalo 17. 2. 2005, keď podpredseda vlády SR a minister hospodárstva SR Pavol Rusko podpísal zmluvu o tejto akvizícii s generálnym riaditeľom spoločnosti ENEL Paolom Scaronim. Na slávnostnom akte sa zúčastnili aj

rok	merná jednotka	1995	2000	2005	2010
hrubý domáci produkt v cenách 1993	mld. Sk	416,7	554,5	696,4	855,5
palivo – energetické zdroje	PJ	753,0	878,2	929,7	981,6
spotreba elektrickej energie	PJ	98,3	125,5	139,7	152,4
spotreba elektrickej energie	TWh	27,3	34,9	38,8	42,3
spotreba plyných palív	PJ	220,6	283,7	302,0	356,8
spotreba tuhých palív	PJ	228,9	253,9	247,8	240,9
spotreba kvapalných palív	PJ	156,2	164,7	178,5	185,7
energetická náročnosť	PJ/mld. Sk	1,81	1,58	1,34	1,15

Tab.1 Prognóza vývoja rozhodujúcich ukazovateľov energetického hospodárstva

taliansky ministerský podpredseda a minister zahraničia Gianfranco Fini a predseda predstavenstva ENELU Piero Gnudi. Po podpise previedol ENEL 20 % z celkovej sumy. Zvyšnú časť sumy uhradí v druhej polovici 2005, keď SR prevedie 66 % podiel v SE na konto ENEL-u. Podľa Scaroniho najdôležitejšia investícia je dostavba 3. a 4. bloku Atómovej elektrárne Mochovce.

Výstavba blokov 3. a 4. JE MO bola pozastavená v r. 1992 a SE, a. s., stála doteraz 18,9 miliardy Sk. Stavebné práce na blokoch sú zrealizované na 80 % a technologické na asi 40 %. Od zastavenia dostavby investujú SE, a. s., ročne asi 100 miliónov Sk do konzervácie zariadení. Na dostavbu je podľa štúdie pre SE, a. s., potrebných ešte 42,5 mld. Sk, z toho 19,1 mld. Sk na dodávky zariadení a 23,4 mld. Sk na montážne práce.

Celkový prehľad rozhodujúcich ukazovateľov energetického hospodárstva v SR do roku 2010 je uvedený v tab. 1 [4], [7].

Jadrový podiel na celkovej výrobe elektriny v r. 2004 na Slovensku sa zvýšil na 66,6 % v porovnaní s 57,8 % v r. 2003. Celková výroba elektriny na Slovensku v r. 2004 bola 25 576 TWh (rok predtým 31 147 TWh).

Zámery podporované vládou SR pre oblasť jadrovej energetiky sa ničím nelíšia od predpokladov vývoja v krajinách OECD. V súčasnosti v krajinách OECD 345 blokov jadrových elektrární kryje 24 % celkovej spotreby elektrickej energie (Európa 35 %, SR 66,6 %). Ďalších 11 blokov je v krajinách združených v OECD vo výstavbe (Kórea, Japonsko, Česko, Francúzsko). Predpokladá sa, že výroba elektrickej energie v jadrových elektrárnach do roku 2010 mala rásť tempom asi 0,9 % ročne, z dnešných 2 019 TWh na 2 236 TWh v roku 2010. Celkový inštalovaný výkon za rovnaké obdobie vzrastie z 294 GWh na 312 GWh i pri uvažovaní ukončenia prevádzky v jadrových elektrárnach s inštalovaným výkonom 29,6 GWh. Zároveň krajiny OECD vedia, že SR patrí 3. miesto s najvyšším podie-

lom výroby elektriny z jadrových elektrární. V roku 2004 pracovalo vo svete 441 jadrových reaktorov.

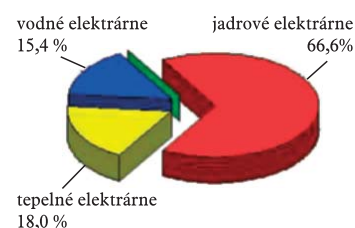
Na Slovensku sú v JE Jaslovské Bohunice modernizované reaktory typu VVER 440/230 (Vodo Vodianyj Energetičeskoj Reaktor); v anglo-americkom ponímaní sa používa skratka BWR (Boiling Water Reactor) a v JE Mochovce sú novšie reaktory typu VVER 440/213.

Na obr. 15 je uvedené rozdelenie energetických zdrojov SR, resp. na obr. 16 je uvedená výroba elektrickej energie jednotlivými výrobcami v SR za rok 2004.

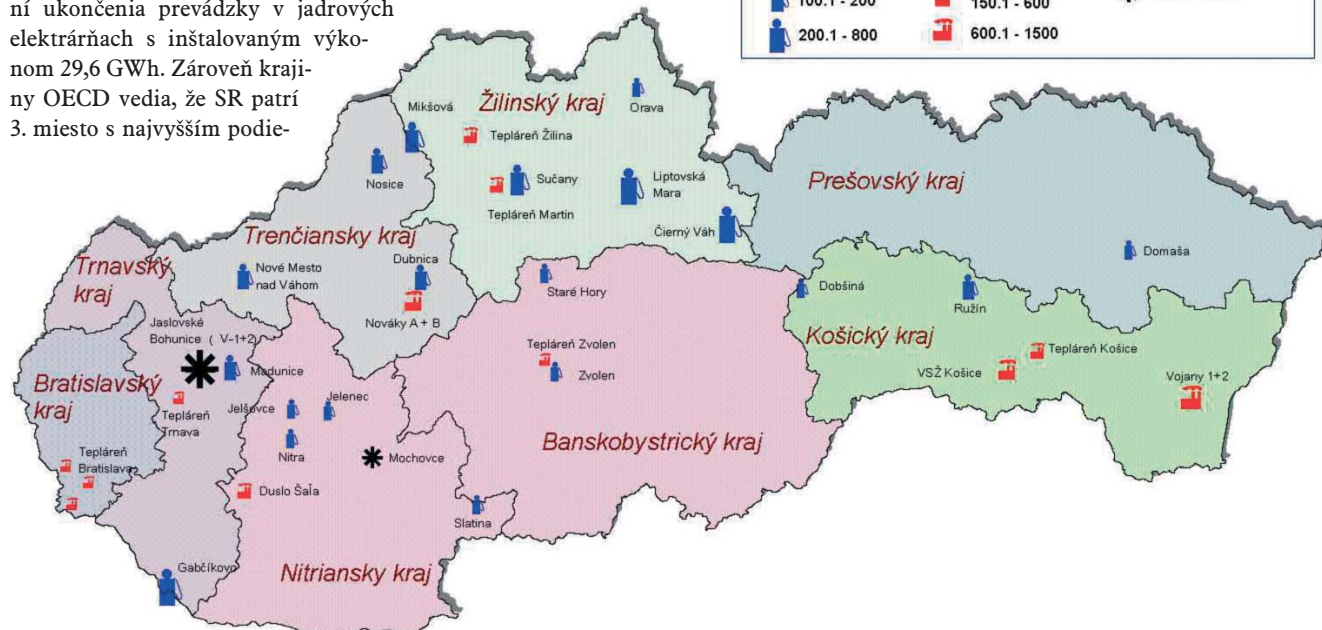
Tu treba podotknúť skutočnosť, že vývoz elektriny zo Slovenska v roku 2004 bol nadpriemerný – viac ako 14 %, čo je oproti štátom EÚ, kde sa táto hodnota pohybovala pod hranicou 10 %, pomerne vysoká hodnota.

Na obr. 17 a 18 sú zobrazené obe atómové elektrárne v SR v poradí JE Jaslovské Bohunice a JE Mochovce.

Na základe doterajších poznatkov z posledných medzinárodných posúdení je zjavné, že bezpečnostné ciele odporúčané MAAE (Medzinárodná Agentúra pre Atómovú Energiu so sídlom



Obr.16 Výroba elektriny v SR za rok 2004



Obr.15 Prehľad rozloženia energetických zdrojov v SR

Energetické zdroje a ich inštalčný výkon v MW		
Vodné elektrárne	Tepelné elektrárne	Atómové elektrárne
0 - 30	0 - 40	* 0 - 880
30.1 - 100	40.1 - 150	* 880.1 - 2000
100.1 - 200	150.1 - 600	
200.1 - 800	600.1 - 1500	



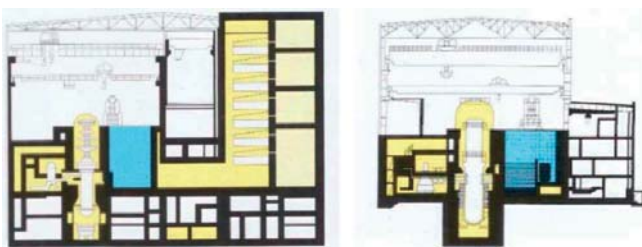
Obr.17 Celkový pohľad na Jadrovú elektrárňu Jaslovské Bohunice



Obr.18 Celkový pohľad na Jadrovú elektrárňu Mochovce

vo Viedni) pre jadrové elektrárne SR budú postupnou rekonštrukciou splnené. V takom prípade vydá ÚJD (Úrad Jadrového Dozoru) na základe zákona č. 130/1998 Z. z., ktorý je aproximovaný k právu EÚ, súhlas na ďalšiu päťročnú prevádzku elektrární, keď bude opätovne požadovať prehodnotenie bezpečnosti blokov JE V-1.

Pre úplnosť treba uviesť, že navrhovaná energetická politika SR predpokladá modernizáciu bloku JE BO V-2 v rokoch 2006 až 2008, ktorou sa okrem zvýšenia bezpečnosti sledujú ekonomické ciele, ktoré v súlade so svetovým trendom plynú z prípadného zvýšenia výkonu predĺženia životnosti tejto JE. Bloky JE BO V-2 sú novšieho typového radu VVER-440/213, kde ide o typ V-213, obr. 19. Skúsenosti z doterajšej prevádzky JE BO V-2 z hľadiska jadrovej bezpečnosti a spoľahlivosti dokazujú, že prevádzka bola a je bezpečná, stabilná a spoľahlivá. Bolo to konštatované vo všetkých doterajších hodnotiacich správach ÚJD SR pri výkone štátneho dozoru. K tomu záveru vo svojej správe dospela aj misia OSART (Operation Safety Review Team) na JE BO V-2 v roku 1996 a jeho následná misia v marci 1998. Tieto hodnotenia potvrdzujú, že ďalší technický a investičný postup v oblasti zvyšovania



WVER 440/W213

WVER 440/W230

Obr.19 Konceptia jadrových reaktorov typu VVER 440/213, resp. 440/230

vania bezpečnosti JE BO V-2 je správny. Rovnako ako na JE BO V-1, aj na elektrárni JE BO V-2 sa uskutočňovala postupná modernizácia blokov kontinuálne od ich uvedenia do prevádzky, pričom sa tam realizovalo viac ako 670 technických úprav a vylepšení [12], [13].

## Jadrová energetika v 21. storočí

Za najperspektívnejšie možno v oblasti jadrovej energetiky považovať:

- vysokeplotné reaktory pracujúce pri teplote okolo 1 000 °C, ktoré využívajú na odvod tepla z reaktora hélium,
- rýchle množinové reaktory pracujúce s rýchlymi neutrónmi a s chladivom, ktoré jedine je schopné odvádzať z týchto reaktorov teplo, a to kvapalným sodíkom,
- urýchľovačom riadený reaktor označovaný ADTT z anglického „urýchľovačom riadená transmutačná technológia“, ktorý je v štádiu experimentov,
- riadená termonukleárna syntéza prostredníctvom experimentálnych termonukleárných reaktorov TOKAMAK, pracujúcich pri extrémne vysokej teplote (cca 100 mil. stupňov), ktoré sú v štádiu experimentov,
- termonukleárny reaktor laserovej fúzie typu HELIOS, experimentálne pracujúci v USA,
- ITER, resp. ITER – FEAT (International Thermonuclear Experimental Reactor, resp. (Fusion Energy Advanced TOKAMAK), ktorý realizujú vedci z USA, Ruska, Japonska a EÚ [8], a iné.

Napriek skutočnosti, že mnohé reaktory sú v súčasnosti v štádiu experimentálnych výskumov, prinášajú principiálne nové riešenia výroby energie, ktorú bude možné vyrábať z fosílnych palív ešte cca 200 rokov, dokedy budú ich zásoby na Zemi. Pritom tieto nové technológie budú schopné vyrobiť rádovo omnoho viac energie ako jadrové technológie používané v súčasnosti [12].

## Využitie radiácie a jadrové odpady

### Využitie radiácie

Okrem elektriny vyrobenej v jadrovej elektrárni sa využíva jadrové žiarenie tiež v [1], [5], [16]:

#### 1. Zdravotníctve:

- nukleárna medicína – zobrazovanie častí ľudského tela pomocou rádionuklidov,
- rádioimunoanalýza – analýza telových tekutín pomocou rádionuklidov,
- rádiofarmaka – používanie rádionuklidov zvnútra, na vnútorné ožarovanie,
- liečenie nádorov – ožarovanie nádorov a ich operácia v mozgu, pomocou Leksellovho gamanoža,
- sterilizácia – zdravotníckeho materiálu, injekčných zariadení, protéz ap.

#### 2. Poľnohospodárstve:

- potravinárstvo – ničenie škodcov, mikrobov, baktérií, pre sterilnú diétu pre pacientov, kozmonautov ap.,
- šľachtiteľstvo – vznik nových odrôd, ktoré majú vyššiu výnosnosť, odolnosť, viac živín a pod.,
- likvidácia škodlivého hmyzu – pripraví sa ožiarení sterilní samci, ktorí nemôžu mať po vypustení do prírody potomstvo,
- hnojivá – označia sa rádionuklidom a aplikujú v prírode, kde sa takto ľahko sleduje, koľko sa ich aplikuje, keďže sú drahé,
- lesníctvo, chovateľstvo, krmovinarstvo ap.

#### 3. Priemysle:

- kontrola opotrebovania – najprv sa rádionuklidom označí miesto a skúma sa jeho opotrebovanie,

- b) hrúbkomery a hladinometry – meranie hrúbok a výšky hladín,
- c) rádiografia – odhaľovanie dutín, chýb a pod.,
- d) radiačná polymerácia – ožarovanie diaľkových káblov s cieľom zvýšenia ich životnosti,
- e) vodohospodárstvo, geológia, archeológia, kriminalistika ap.

### Jadrové odpady

Vyhorené palivo z jadrových reaktorov tvorí menej ako 1 % objemu všetkých jadrových odpadov na svete, avšak obsahuje viac ako 90 % celej rádioaktivity [2], [14].

Rádioaktívne odpady sa podľa aktivity a podľa polčasu rozpadu hlavných rádionuklidov delia na 5 kategórií (I až V).

Zdrojom odpadov sú hlavne jadrové elektrárne, zdravotníctvo, poľnohospodárstvo a priemysel. Jadrové odpady sa delia na:

- a) pevné,
- b) kvapalné,
- c) plynné.

Spracovanie jadrových odpadov sa realizuje prostredníctvom:

- a) lisovania,
- b) spaľovania,
- c) spevňovania,
- d) odparovania.

Predchádzajúce štyri typy spracovania jadrových odpadov sú potrebné na to, aby sa tieto odpady mohli ďalej upravovať prostredníctvom:

1. bitumenizácie,
2. cementácie,
3. polymerizácie.

Až na záver týchto všetkých operácií možno uvažovať o uložení jadrových odpadov. Tie sa ukladajú na dočasné úložiská a až po určitom čase na konečné úložiská. Úložiská možno rozdeliť na:

- a) povrchové,
- b) podpovrchové,
- c) hlbinné.

Zneškodňovanie rádioaktívnych odpadov je ekonomicky veľmi náročné, a preto existuje jasná snaha prevádzkovateľov jadrových elektrární o ich minimalizáciu. Zároveň treba povedať, že z každej predanej kilowatthodiny sa cca 1/3 peňazí odkladá na budúcu likvidáciu odpadov.

Úložiská rádioaktívneho odpadu sa kontrolujú podľa predpisov Medzinárodnej agentúry pre atómovú energiu so sídlom vo Viedni až 300 rokov [6], [15].

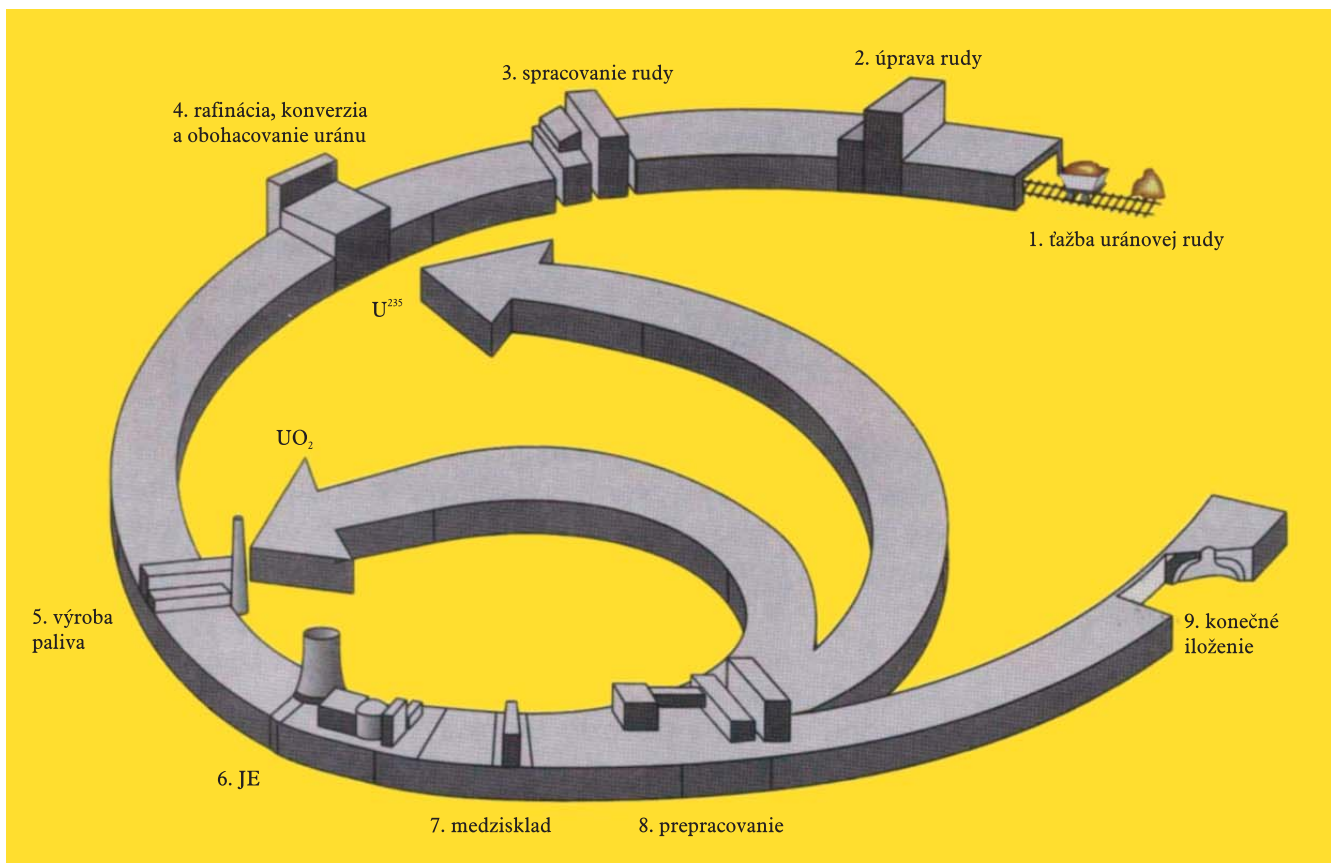
### Jadrová bezpečnosť

Tábor odporcov jadrovej energetiky zatiaľ neprišiel s reálnym plánom „čo namiesto atómu“. Je pravdou, že akákoľvek činnosť ľudí, tým viac priekopnícka prináša i svoje riziká. Tak sa stalo, že pri jadrových haváriách zahynulo pri smrteľných úrazoch spojených bezprostredne z prevádzkou jadrových elektrární cca 200 osôb (vrátane Černobyľu). A to je len 1/5 životov, ktoré padnú za obeť motorizmu každý deň.

Od roku 1957 existuje MAAE – Medzinárodná Agentúra pre Atómovú Energii (IAEA so sídlom vo Viedni), ktorá prísne sleduje a kontroluje všetky jadrové elektrárne a zároveň zaznamenáva i tie najmenšie nehody či prevádzkové havárie. Tie zverejňuje, analyzuje, pričom výsledky sa stávajú podkladom pre neustále sprísňovanie predpisov. Treba povedať, že väčšina havárií a nehôd jadrových elektrární spadá na vrub nespoľahlivosti „ľudského činiteľa“ [5].

Stav jadrovej bezpečnosti podľa medzinárodných pravidiel a noriem preveruje špeciálna služba MAAE označená OSART (Operational SAFETY Team). Ich osvedčenie dáva pracovníkom elektrární a obyvateľom okolia jadrových elektrární medzinárodnú istotu. Samozrejme, pre prácu jadrových elektrární platia ešte tisíce ďalších, spravidla veľmi prísnych predpisov, ktoré overujú desiatky štátnych i nezávislých inštitúcií.

Aby bola verejnosť pravdivo a zrozumiteľne informovaná, presadila MAAE v roku 1991 medzinárodnú stupnicu INES (The In-



Obr.20 Palivový cyklus

ternational Nuclear Event Scale), ktorá hodnotí v siedmich stupňoch všetky mimoriadne udalosti všade tam, kde sa pracuje s jadrovým materiálom:

- 0 – Udalosť bez významu pre bezpečnosť – event level zero – low scale.
- 1 – Odchýlka od bežnej prevádzky – anomaly.
- 2 – Porucha – incident.
- 3 – Vážna porucha – serious incident.
- 4 – Havária s účinkami v jadrovom zariadení – accident mainly in installation.
- 5 – Havária s účinkami na okolie – accident with off-site risks.
- 6 – Závažná havária – serious accident.
- 7 – Veľká havária – major accident.

Niektoré známe havárie jadrových elektrární boli označené podľa INES takto:

- INES – 2 Mihama, Japonsko, 1991
- INES – 3 Vandellos, Španielsko, 1989
- INES – 4 Saint Laurent, Francúzsko, 1969 a 1980  
Jaslovské Bohunice A – 1, ČSSR, 1977
- INES – 5 Windscale, Veľká Británia, 1957  
Three Mile Island, USA, 1979
- INES – 7 Černobyľ, ZSSR, 1986

V Európe, USA, Japonsku a Rusku sa dlhodobo vyvíjajú stále bezpečnejšie technológie pre jadrové elektrárne, ktoré vylučujú možnosť havárie (tzv. inherentná bezpečnosť). Ide o systémy, ktoré vylučujú ľudské chyby alebo úmyselné zásahy, resp. vonkajšie vplyvy. Ďalej sa rozvíja tzv. pasívna bezpečnosť, pod ktorou sa rozumie taký systém regulácie reaktora, ktorý zabezpečí jeho odstavenie i pri výpadku dodávky prúdu alebo poklesku tlaku. K súčasne využívaným patria tiež kontejment (dvojitý kryt reaktorovne jadrovej elektrárne), resp. barbotážne jamy (keďže v reaktorovni je mierny podtlak, všetko čo z nej uniká, musí prúdiť cez tieto jamy, kde sa odstraňuje rádioaktivita).

V neposlednom rade treba podotknúť, že všetky systémy v jadrovej elektrárni sú viacnásobne chránené a viacnásobne poistené. Takisto sa kombinujú prvky aktívnej a pasívnej bezpečnosti tak, aby v celom cykle (obr. 20) prípravy a využívania jadrového paliva i ukládania rádioaktívnych odpadov nedochádzalo k žiadnym nepredvídaným udalostiam [3].

Najviac nádejí na vyriešenie tiesnivého nedostatku energie v nadchádzajúcich rokoch sa vkladá do vyriešenia rozvoja termonukleárnej energetiky. Napodobnenie syntetických procesov, zlučovania vodíka a jeho izotopov na hélium, čo zatiaľ dokáže len Slnko, by navždy zaistilo pre celé ľudstvo dostatok energie. Cesta vedúca k tomuto cieľu však bude ešte nákladná a dlhá.

*Podakovanie autora článku patrí ČEZ, a. s., Praha za poskytnutie možnosti čerpať z ich odborných materiálov.*

*Táto práca vznikla za podpory grantov agentúry VEGA č.1/1105/04.*

## Literatúra

- [1] Encyklopédie energetiky. ČEZ, a. s., Praha, 1995.
- [2] BEČVÁŘ, J. a kol.: Jaderné elektrárny. Praha: SNTL/ALFA 1981.
- [3] KOLAT, P.: Energy supply, environmental impact, cleaner production and sustainability in Czech republic. In: Combustion and environment – 2002, VŠB TU Ostrava, s. 56 – 62.
- [4] KOREC, J.: Perspektívy jadrovej energetiky v súvislosti s novokoncipovanou energetickou politikou SR. Valné zhromaždenie Slovenskej nukleárnej spoločnosti, Častá Papiernička, 1999.
- [5] HORBAJ, P., IMRIŠ, I.: Quo vadis energetika a palivá? Prešov: Datapress, s. r. o. 2000, 88 s.
- [6] SCHMIDT, Š.: Atómové elektrárne Bohunice – najvýznamnejší energetický zdroj na Slovensku. Valné zhromaždenie Slovenskej nukleárnej spoločnosti, Častá Papiernička, 1999.
- [7] STUDENEC, O.: Súčasný stav a perspektívy jadrovej energetiky z pohľadu MH SR. Bratislava: MH SR 1999.
- [8] FELL, N.: Obrovský skok pro jadernú fúzi. Energie, roč. 5, 2000, č. 4, s. 31 – 35.
- [9] KOUKLÍK, I.: Porovnaní výsledků JE Dukovany a elektráren v zemích EÚ a Švýcarska. In: Energie, roč. 5, 2000, č. 4, s. 30 – 31.
- [10] STEHLÍK, J.: Komentář k energetické politice ČR. In: Energetika, roč. 50, 2000, č. 5, s. 152 – 156.
- [11] PECHA, J.: Moderné ocele v energetike. In: Energia, roč. 5, 2000, č. jún, s. 17 – 18.
- [12] Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond. Materiály WEC a IASA, 1995 až 2004.
- [13] Interné noviny „Mochovce“, roč. XVI. a XVII., rok 2001, 2002 a čísla roka 2003.
- [14] MIKOLAJ, D.: Vplyv prevádzkových charakteristík kogeneračnej jednotky spaľujúcej zmes propánu a butánu a jej účinnosť. In: Acta Mechanica Slovaca, 7, 2003, 3, s. 251 – 257.
- [15] HORBAJ, P., MIKOLAJ, D.: Group training course in Foundation of Nuclear Power Engineering. ES TU Košice, 2001, 103 s.
- [16] RYBÁR, P., TAUŠ, P., RYBÁR, R.: Alternatívne zdroje energie 1. Košice: ES Elfa, s. r. o. 2001, 81 s.

### Peter Horbaj

**TU Košice, Strojnícka fakulta  
Katedra energetickej techniky  
Vysokoškolská 4  
042 00 Košice  
e-mail: Peter.Horbaj@tuke.sk**