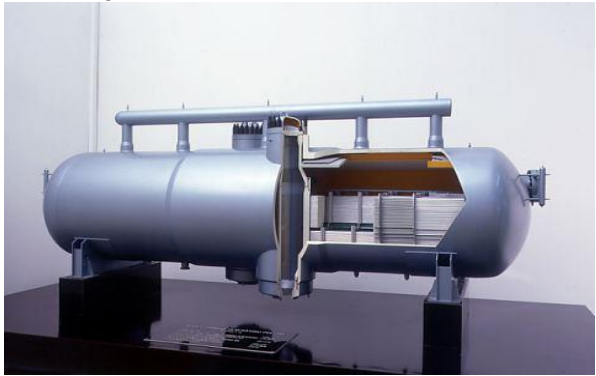


## QUO VADIS JADROVÁ ENERGETIKA?

prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc., Slovenská nukleárna spoločnosť

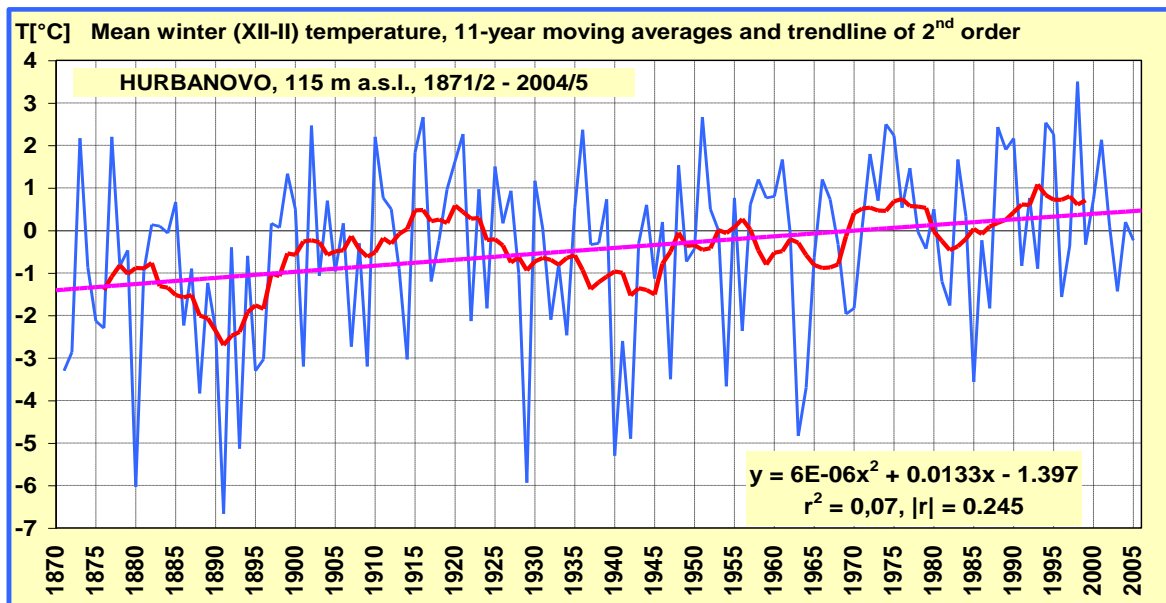
**Ako funguje jadrová elektrárňa? Ale stručne, mám len minútu.**

Ako konva na ohrev vody. Pri jednookruhovej elektrárni je tou konvou samotný reaktor. Pri dvojkruhovej tlakovodnej jadrovej elektrárni, a takých je vo svete takmer 70% vrátane našich VVER-440, je tou konvou parogenerátor (viď obrázok). Horúca voda (teplota 300 °C, pri tlaku 12,26 MPa) prichádza do parogenerátora a rozdeľ sa do cca 5000 trubiek, ktoré vidíme vo vnútri. Tieto trubky sú ponorené vo vode sekundárneho okruhu (226 °C, pri tlaku 4,7 MPa). Sekundárna voda sa ohrieva, mení na paru o teplote cca 260 °C a rozpína sa. Stačí ju už len usmerniť a priviesť cez hlavný parný kolektor na kolesá turbíny, ktoré roztočí do potrebných otáčok podobne ako aj rotor elektrického generátora. Takto získavame striedavý elektrický prúd, ktorý vyvedieme z elektrárne, transformujeme na požadovanú kvalitu a privedieme do elektrických zásuviek všade tam, kde potrebujeme. **Na obr. je Model parogenerátora jadrovej elektrárne VVER-440**



### Globálne otepľovanie. A čo s tým má jadrová energetika?

Po mnohých rokoch sa vedci viac-menej zhodli, že dochádza ku globálnemu otepľovaniu našej planéty Zem, ktoré spôsobuje človek a nie výkyvy počasia.



Trend teploty vzduchu za zimy v Hurbanove, 1871/72 - 2004/05

Prvé odhady zmeny klímy pozoroval už v 19. soročí Arrhenius. Zmeny a variabilita klímy sa stali významným predmetom výskumu najmä po roku 1979 – založenie Svetového klimatického programu (WCP). V roku 1988 začal činnosť IPCC (Medzivládny panel pre klimatickú zmenu pod patronátom OSN) a začalo seriózne skúmanie teórie klimatickej zmeny. Zmena klímy sa prejaví nielen zmenou dlhodobých priemerov, ale aj zmenou distribučných kriviek klimatických/meteorologických prvkov, teda aj výskytu extrémnejších prípadov počasia. Vplyvom počasia, najčastejšie v dôsledku záplav, vznikli na Slovensku v rokoch 2003 a 2004 škody za vyše 5 mlrd. Sk ročne, v ČR v roku 2002, v Poľsku a v ČR spolu v r. 1997 vyše 100 mlrd. Sk ročne.

Okrem toho sa prejaví zmena klímy aj zmenou chemizmu prostredia v oceánoch (a aj na kontinentoch). V Antarktíde sa rýchlejšie topia ľadovce, hladina oceánov stúpa. U nás sa zvyšuje počet tropických dní a znižuje počet dní s dobrými snehovými podmienkami. Celkovo však máme šťastie. V centrálnej časti Španielska sa však počet dní, kedy tropické horúčavy znemožňujú akúkoľvek prácu zvyšuje. Bez klimatizácie nie je mysliteľné robiť niečo iné, než len zúfalo sa potiť. Zostáva nám len veriť, že:

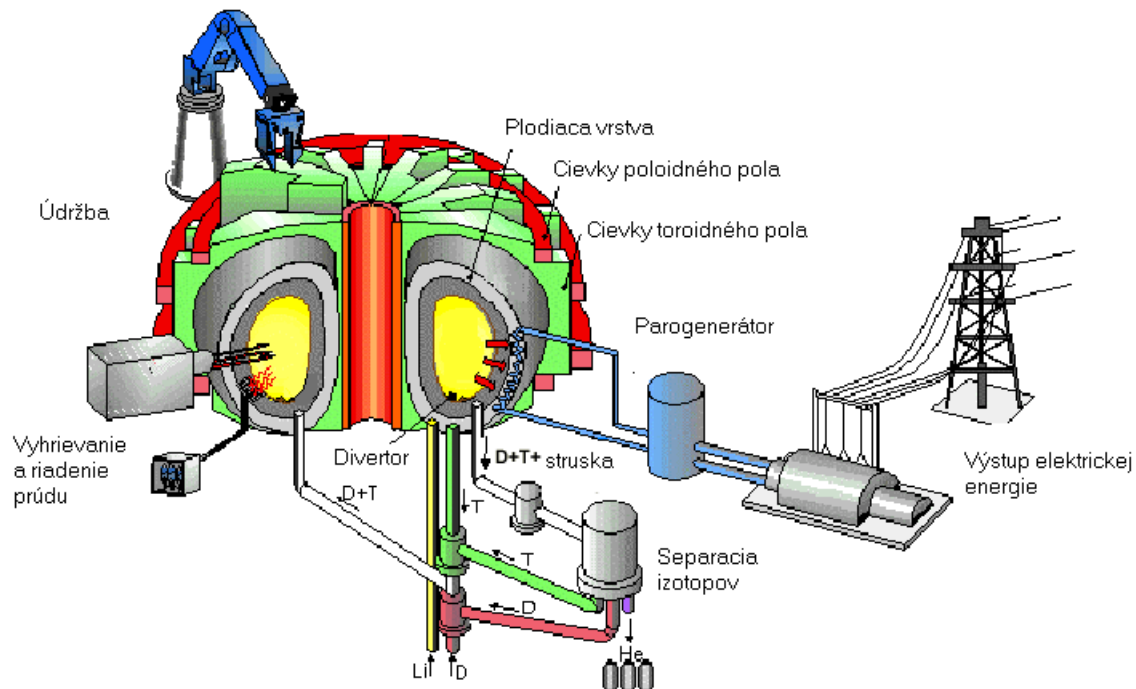
- JE – ktoré prakticky nevypúšťajú  $\text{CO}_2$  – budú aj naďalej dodávať elektrinu vo veľkom množstve s minimálnym dopadom na životné prostredie z hľadiska znečistenia ovzdušia.
- Jadrová energia ročne zabráni vo svete emisiám 1,8 miliárd ton  $\text{CO}_2$ , v Európe 550 mil. ton  $\text{CO}_2$ . Rovnaká úspora by sa dosiahla v Európe odstránením 140 miliónov áut z ciest.

Koncentrácia skleníkových plynov sústavne narastá. Jadrová energetika tento efekt nemôže zastaviť, ale len príbrzdiť. Je však jadrová energetika naozaj to, čo nás skutočne ohrozuje?

Ak sa v dôsledku zvýšenej koncentrácie skleníkových plynov a následnému globálnemu otepleniu a roztopeniu väčšej časti ľadovcov zvýši hladina morí o meter, mnohé veľké mestá (Benátky, Amsterdam, New York, ...) môžu mať obrovské problémy, ktoré ohrozia existenciu stoviek miliónov ľudí. A tí sa budú snažiť zachrániť migráciou do obývatelných území.

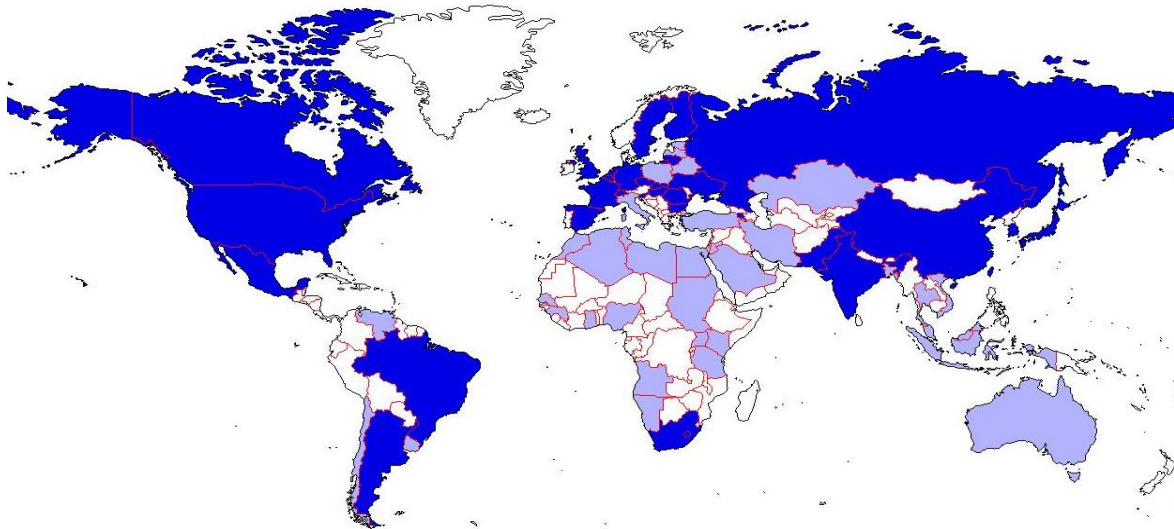
### Fúzny reaktor ITER

Od parogenerátora ďalej je fúzny reaktor podobný klasickej elektrárni a všetko je známe a sto rokov vyskúšané. Neznáme je to pred parogenerátorom. I keď aj princíp termonukleárnej fúzie je už 50 rokov známy. Inováciou je komerčné energetické využitie princípu TOKAMAKU (z roku 1958), ktoré sa má technologicky zrealizovať v ITERi. Fyzikálne vymyslieť je však niečo celkom iné ako technicky zrealizovať. Stojíme pred problémom ako zvládnuť ohrievanie vody, ak váš zdroj tepla (ionizovaná plazma) má stovky miliónov Kelvinov. No a vedcom (v tomto prípade viac technológom) sa zatiaľ nepodarilo vymyslieť nič lepšie ako to, čo je na dolnom obrázku.



ITER je odsúdený na úspech. Stál už 18 mld. euro a jeho konečný účet môže byť vyšší. Obrovským úspechom by bolo jeho spustenie do roku 2027. No aj keby všetko išlo bez problémov, fúzne reaktory nenahradia klasické jadrové reaktory na báze štípanej reakcie pred rokom 2050.

## Pohľad na jadrovú mapu sveta



Krajiny s jadrovými reaktormi (tmavomodré), resp. tie, ktoré sa chcú pustiť do výstavby (stav podľa IAEA v roku 2008).

Deklarovať výstavbu jadrovej elektrárne je omnoho jednoduchšie, ako ju postaviť. Nejde iba o získanie podpory obyvateľstva a investície v hodnote približne 10 mld euro, ale aj technického zázemia, subdodávateľov a funkčného systému zaručujúceho dlhodobú udržateľnosť. Potenciál jadrovej energetiky je obrovský. Musí byť akceptovaná ako „tímový hráč“ a bez jej snahy to nepôjde

### Od Fermiho reaktora k ALLEGRU (*Quo vadis reaktor?*)

Jadrové reaktory majú už viac ako 70 rokov. Technické zvládnutie štiepnej reakcie v tzv. Fermiho reaktore Pile-1 v Chicagu (na kresbe.) odštartovalo v decembri 1942 éru využitia nového zdroja energie. Ako každý technický objav i štiepna reakcia a následná obrovská produkcia energie boli najskôr predmetom využitia (zneužitia) vo vojnách, či politickom vydieraní. Atómové bomby zhodené na Hirošimu a Nagasaki v septembri 1945 svojimi hroznými dôsledkami urýchlili kapituláciu Japonska a ukončenie 2. svetovej vojny. Albert Einstein po jej skončení povedal: „*Neviem aké zbrane sa použijú v najbližšej vojne, ale viem aké budú v tej nasledujúcej – luk a šíp.*“ Vedci mali vždy veľkú predstavivosť. Snaha svetových mocností mať atómové bomby vo svojom arzenáli, rozpútala preteky s cieľom demonštrovať svoju silu a technologickú vyspelosť. Vedci, najmä fyzici boli vysoko vážené osobnosti, od ktorých vedomostí, nasadenia a kreativity závisela nielen prestíž, ale aj určitá forma nedotknuteľnosti krajiny disponujúcej jadrovými zbraňami. Už v minulosti bolo využitie prírodných síl spojené s technickou invenciou vzdelaných osobností. Archimedes zachránil mesto Tarent mesto Tarent jednoduchou radou vojakom: *“Leštite štíty!”* A následne ich nasmeroval na plachty rímskych lodí v tarentskom prístave až pokým nezačali horieť. I Leonardo da Vinci popri svojom maliarskom, architektonickom, či medicínskym talente oplýval množstvom technických nápadov.

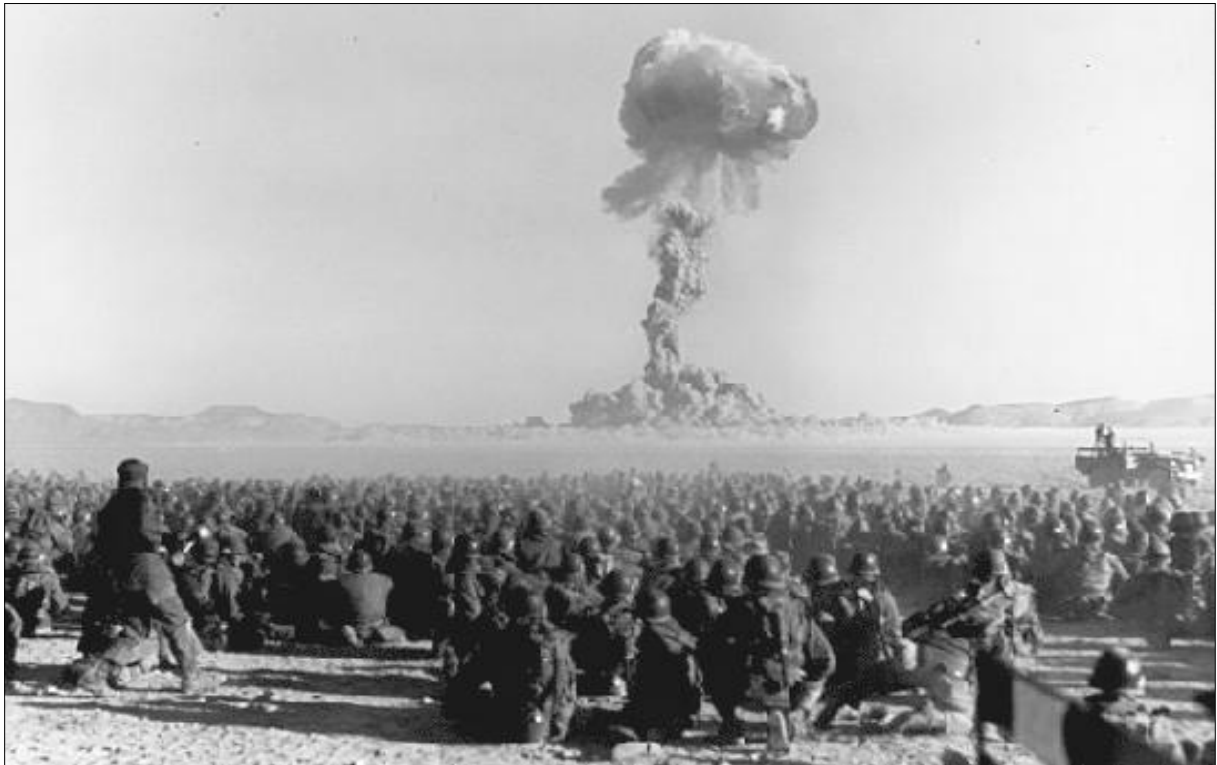
Je považovaný i za ideového tvorca prvých tankov, ponoriek a helikoptér. Ešteže nevedel nič o štiepení ťažkých jadier... Prvé typy jadrových reaktorov boli výskumné, zamerané na pochopenie a zvládnutie štiepnej reakcie. Každá z veľmoci sa snažila aj o určitú diverzitu pracovísk, pracovníkov, či konštrukčných technických systémov. Na ich počiatku stáli O. Hahn a F. Strassman, ktorí v roku 1938 objavili proces štiepenia uránu a E. Fermi, ktorý v roku 1942 popísal podmienky pre vytvorenie riadenej štiepnej reakcie a potvrdil to i experimentom na reaktore Pile-1 v Chicagu.





*Pracovní stůl O. Hahna a F. Strassmana, na ktorom v roku 1938 skúmali štiepenie jadier.*

Nasledovali ďalšie reaktory konštruované za účelom výroby plutónia, ktoré vznikalo záchyтом neutrónov na uráne 238, ktorého je viac ako 99% v izotopickom zložení prvku. Popri amerických a ruských reaktoroch je možné spomenúť i anglické (Windscale), či francúzske (Marcoule) reaktory, ktoré v 50-tych rokoch vyrobili dostatočné množstvá plutónia na demonstráciu jadrových zbraní. Peniaze neboli problémom. Bohužiaľ ani jadrová bezpečnosť... So stratami sa vo vojenskom výskume kalkulovalo.



*Skúška A-bomby na strelnici Alamogordo v Novom Mexiku 16. 7. 1945.*

Atómová bomba s názvom „Little boy“, ktorá vybuchla 6.8.1945 asi 400 m nad Hirošimou zabila 66 000 ľudí a ďalších 69 000 zranila. Viac ako 2/3 budov bolo v meste zničených. Účinnosť tejto bomby bola viac ako 2000 krát vyššia v porovnaní s konvenčnými. Najväčšia odpálená vodíková bomba „Cár“, explodujúca nad Ostrovom Novaja Zemlja v roku 1961, bola ešte 3000 silnejšia (ekvivalent 50 Megaton TNT). Spôsobila by popáleniny 3. stupňa ešte 100 km od epicentra, svetlo z výbuchu bolo pozorovateľné z 1000 km a tlaková vlna 3 krát obehla zemeguľu. Časť ostrova doslova zmizla z povrchu zeme. Po USA (1945), ZSSR (1948) sa jadrovými mocnosťami stali aj Veľká Británia (1952), Francúzsko (1960), Čína (1964) a India (1974), z čoho sa dá usudzovať, kde bolo najviac vojenských jadrových zariadení a kde bolo investovaných i najviac finančných prostriedkov do výskumu.

Ďalším krokom bolo využitie jadrových reaktorov v zariadeniach, ktoré sa v 2. svetovej vojne ukázali ako najúčinnnejšie zbrane. Týkalo sa to najmä ponoriek a lietadlových lodí, ktorých rýchlosť, dosah i čas nasadenia boli výrazne limitované zásobami paliva. Podobne to bolo i v prípade ľadoborcov. Prvú ponorku s jadrovým pohonom s poetickým názvom Nautilus spustili USA na vodu už

v roku 1954 a podplávala Severný pól v roku 1958. Mobilné jadrové zariadenia a v spojení s jadrovými hlavicami sa stali pre svet skutočnou vojenskou hrozbou. Moderná ponorka dokáže operovať 3 roky bez potreby doplniť palivo, pohybovať sa v hĺbkach do 1000 m a rýchlosťou až do 80 km/h. Ruská ponorka Kursk, ktorá havarovala v roku 12.8.2000 v Barentsovom mori bola vybavená 2 tlakovodnými reaktormi o výkone 190 MW. Prvým ľadoborcom na jadrový pohon bol „Lenin“ (spustený na vodu v septembri 1959 a vyradený v 1989). Na 134 m dlhej lodi boli umiestnené 3 jadrové reaktory OK-150, s tepelným výkonom 90 MW. Najväčší ľadoborec v súčasnosti sa volá „50. Výročie víťazstva“ a má dva reaktory o výkone 171 MW. Do prevádzky bol uvedený v roku 2007.



*Prvý ruský jadrový ľadoborec Lenin bol uvedený do prevádzky v roku 1959.*

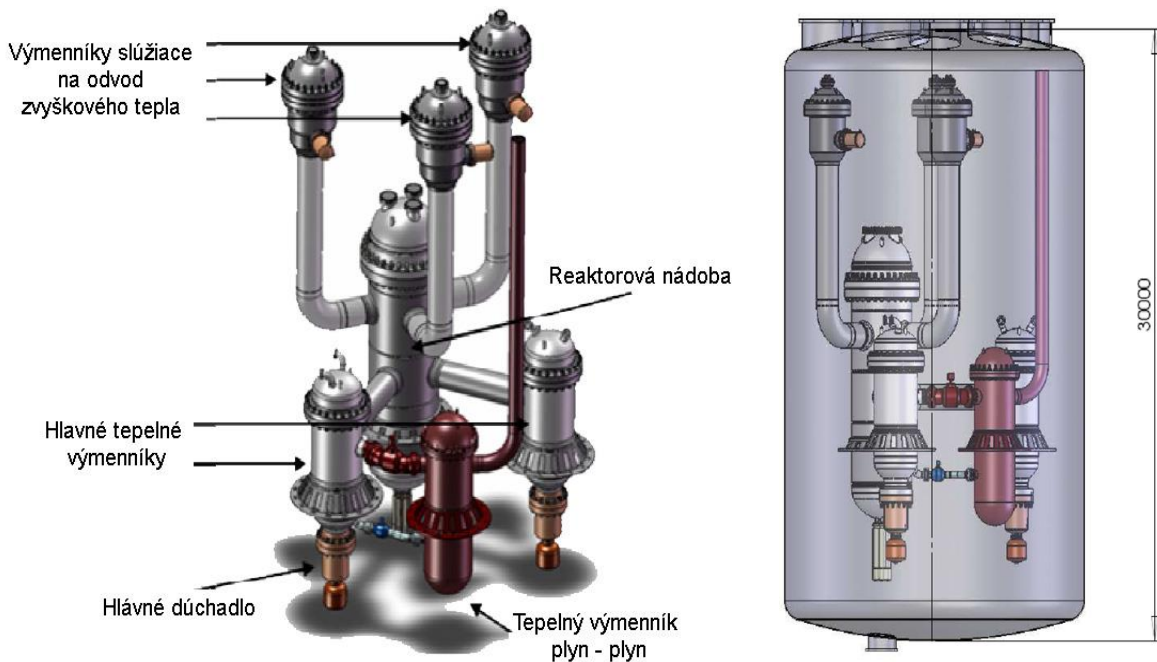
Za priekopníka stacionárnych energetických reaktorov sa považuje ruský reaktor v Obnisku, ktorý bol spustený v júni 1954. Jeho výkon 5 MW vyvoláva už možno úsmev, ale stál na začiatku cesty, ktorá dospela k dnešným 1000 a viac megawatovým blokom.

Pre historickú korektnosť je však potrebné uviesť, že prvé jadrové zariadenie produkujúce elektrickú energiu bolo spustené už 20. decembra 1951. Bol to reaktor EBR-I v Idaho v USA. Aj keď jeho primárnym cieľom bolo preukázanie možnosti množenia jadrového paliva, dokázal vyrobiť elektrickú energiu na rozsvietenie štyroch žiaroviek.

*Reaktor EBR-I uvedený do prevádzky 20.12. 1951 v Idaho v USA.*

Základom energetiky v mnohých krajinách sú jadrové bloky postavené v 70-tych a 80-tych rokoch minulého storočia. Dnes sú vo výstavbe viaceré bloky označované ako generácia 3, prípadne 3+, pričom ťažisko výstavby sa presunulo do Ázie. ALLEGRO je jedným zo šiestich predstaviteľov reaktorov takzvanej 4. generácie. V rámci európskeho výskumu má Slovensko unikátnu šancu významne sa podieľať spolu s Českou republikou, Maďarskom, Francúzskom, ako aj ďalším krajinami na jeho výstavbe.





*Primárny okruh a oceľový kontajment okolo primárneho okruhu reaktora ALLEGRO.*

V prvom kroku je potrebné vytvoriť zodpovedajúcu technologickú platformu a aktivizovať ľudí doma i v zahraničí, ktorí majú záujem riešiť náročné technické úlohy. A tu sme asi pri tom najdôležitejšom bode. ALLEGRO je šanca pre Slovensko vrátiť sa na reálnu cestu technického a ekonomického rozvoja. Poučky novodobých ekonómov, že prosperita vzniká z obchodu, že stačí v správny okamih lacno kúpiť a drahो predáť, sú nesprávne. Slovensko nebude mať nikdy takú ekonomickú váhu a práva na globálnom trhu ako veľmoci. Našou jedinou šancou je byť rozumní a k tomu nám ALLEGRO môže výrazne pomôcť. Môže pre nás znamenať šancu vrátiť sa k technicky náročnejším činnostiam v širokom spektre disciplín. Môže reštartovať technickú a technologickú vedomostnú bázu, na ktorej by stávali aj iné odvetvia. Môže byť oblasťou pre kapitalizáciu našich doterajších skúseností s výstavbou a prevádzkou jadrových zariadení. Môže pomôcť k uzavretiu palivového cyklu a opätovne využiť aspoň časť vyhoreného jadrového paliva, ktoré tvorí podstatnú časť rádioaktívnych odpadov. Môže vytvoriť stovky nových pracovných miest a dať šancu mnohým slovenským firmám. Plánuje sa až 85 percentné pokrytie nákladov z prostriedkov Európskej komisie, ktoré dlhodobu nie sme schopní zmysluplne čerpať.

Aktivity v technických vedách a výskume, kvalitná technologická báza v strojárstve, stavebníctve, či energetike sú nádejou pre Slovensko. Nemáme obrovské nerastné bohatstvo, či špičkové podmienky pre výnosné poľnohospodárstvo. Máme len relatívne lacné, snáď i tvorivé pracovité ruky a ... skúsenosti s jadrovou energetikou. Od 50-tych rokov minulého storočia sme do nej investovali nemalo námahy i finančných prostriedkov. Či už to bola prvá jadrová elektrárňa A-1, uvedená do prevádzky po 15 rokoch výstavby roku 1972 (úplne prvou elektrárnou na Slovensku bola ale tá v mlyne S. Ludwiga v Bratislave z roku 1884) alebo bloky typu VVER v Bohuniciach a Mochovciach. Výstavba ALLEGRA, chladeného podobne ako v prípade A-1 plynom, predpokladá v prvých možno i desiatich rokoch vybudovanie serióznej technologickej platformy a investícií do strojárstva, chémie, či elektrotechniky. V školstve by to chcelo výraznejší príklon talentovanej mladej generácie ku prírodným a technickým vedám. K tomu však dôjde len v prípade, že mladí budú vidieť reálne príležitosti na uplatnenie sa v technických disciplínach. Za poctivú technickú prácu, ktorá i pre svoju netrivialitu môže byť i potešením, si zarobiť primeranú plácu a cítiť sa človekom.

Takže ALLEGRO do práce!

## Úvahy nad možným rozvojom v jadrovej energetike v nasledujúcej dekáde

Jadrová energetika, ktorá v rokoch 2005-2010 naberala dych na svoju renesanciu, sa po Fukušimskej havárii opäť dostala „do záklonu“. Dnes v podstate hybernuje. Rozvoj je snád len v Ázii. Pritom súčasné smerovanie pri výrobe energií je neudržateľné. Bez zásadných a nákladných rozhodnutí sa emisie CO<sub>2</sub> spôsobené výrobou energie z fosílnych palív do roku 2050 vo svete zdvojnásobia. Zvýšený dopyt po energii vo svete a geopolitické konflikty (Perský záliv, Ukrajina, ...) zákonite zvyšujú obavy o energetickú bezpečnosť. V mnohých európskych krajinách však dopyt po energii už dlho nerastie. Vo vyspelých krajinách EU dokonca klesá. Energeticky náročné technológie sa sťahujú do Ázie, či rozvojových krajín, ktoré často emisiám nevenujú náležitú pozornosť (podobne ako USA, kde je dôvodom „nezníženie životnej úrovne obyvateľstva“). Súčasnú smerovanie v globálnom otepľovaní síce môžeme zmeniť, ale bude nato potrebná celosvetová zhoda, v ktorej budú uprednostňované energetické zdroje s nízkymi emisiami uhlíka. Ak chceme výraznejšie znížiť emisie skleníkových plynov, musíme široko rozvíjať nové technológie vrátane jadrových elektrární. Tieto úlohy sú naliehavé a na viac dlhodobé.

V nasledujúcich úvahách budem hojne využívať Technology Roadmap vypracovaný IAE/NEA z roku 2015, ktorý je aktualizáciou a doplnkom obdobného materiálu y roku 2010. Od roku 2011 perspektívy jadrovej energetiky výrazne zmenili udalosti v JE Fukushima Daichi. Havária zvýšila obavy verejnosti o bezpečnosť jadrových elektrární, vyvolala následné revízie bezpečnosti a vývoj nových požiadaviek na bezpečnosť, ktoré majú zaistiť vyššiu úroveň bezpečnosti pre súčasné aj budúce jadrové elektrárne. Ekonomické, resp. finančné krízy znížili dopyt po energiách a sťažili financovanie nákladných projektov najmä na liberalizovaných trhoch.

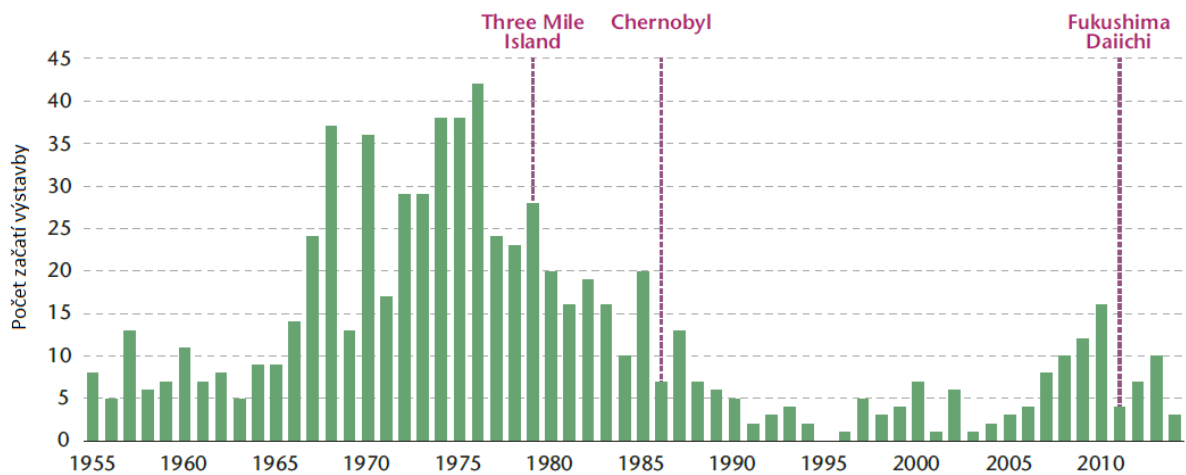
Jadrová energia je najväčší zdroj s nízkymi emisiami CO<sub>2</sub> v OECD krajinách s 18% podielom na vyrobenej elektrickej energii v roku 2013 a globálne je druhá s 11% podielom. Aktualizovaná vízia na základe scenára s oteplením o 2°C (2DS) predpokladá pokračovanie vedúceho podielu jadrovej energetiky v znižovaní emisií v priemyselnom odvetví a zvyšovanie energetickej bezpečnosti, optimalizáciu energetického mixu a poskytovanie elektrickej energie vo veľkom meradle pri stabilných cenách. V scenári 2DS by sa musel inštalovaný výkon viac ako zdvojnásobiť zo súčasných 396 GW na 930 GW v roku 2050 so 17% podielom elektriny z jadrových elektrární. Napriek nižším odhadom oproti plánu z roku 2010, kde sa počítalo s 1200 GW a 25% podielu jadra, tento nižší nárast stále poskytuje priestor pre búrlivý rozvoj jadrového priemyslu.

V roku 2010 začala výstavba 16 nových jadrových elektrární. Takéto číslo nebolo od roku 1985 nikdy dosiahnuté. Objavil sa pojem „jadrová renesancia“. Havária vo Fukushime mala okamžitý dopad na krátko a strednodobý vývoj jadrovej energetiky v mnoho krajinách.

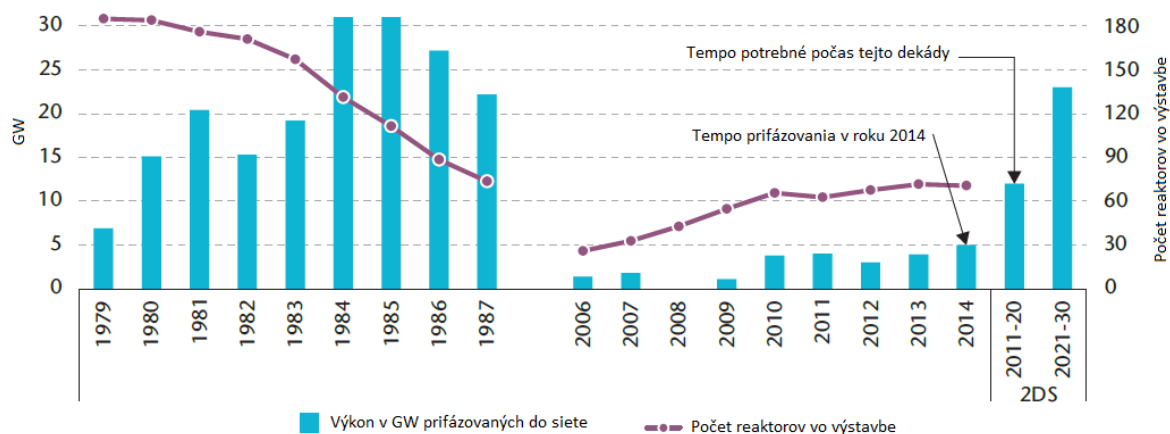
Aj napriek tomu ostáva jadrová energia najväčším zdrojom s nízkymi emisiami CO<sub>2</sub> v štátoch OECD a druhým najväčším v globálnom meradle. Jej dôležitosť ako súčasný a budúci zdroj energie s nízkymi emisiami CO<sub>2</sub> musí byť uznaná a mala by sa s ňou zaobchádzať rovnako ako s ostatnými zdrojmi s nízkymi emisiami CO<sub>2</sub>. Ako overená a vyspelá technológia, ktorá môže dodávať stálu elektrickú energiu, jadrová energia dokáže hrať kľúčovú úlohu v budúcich energetických systémoch v mnohých častiach sveta. Žiaľ, verejná podpora jadrovej energetiky drasticky klesla.

Jadrová energetika je chápaná z pravidla na generovanie elektrickej energie, hoci potenciál pre ostatné aplikácie ako výroba a rozvod tepla, výroba vodíka a odsolovanie morskej vody je nádejný. Jadrová fúzia je nádejná technológia v dlhodobom hľadisku a neočakáva sa jej podiel na výrobe elektrickej energie pred rokom 2050.

Celosvetová výroba elektrickej energie z jadrových elektrární klesla na približne 2478 TWh v roku 2013, čo znamená 10% pokles v porovnaní s rokom 2010, spôsobený najmä vypnutím ôsmich reaktorov v Nemecku a dočasným vypnutím 51 reaktorov v Japonsku zväčša už roku 2011. 48 reaktorov schopných prevádzky ostalo nevyužitých od septembra 2013 a po celý rok 2014. Inštalovaný výkon stúpil len mierne medzi rokmi 2013 a 2014 o približne 396 GW, a počet začatých výstavieb klesol z 10 v roku 2013 na iba 3 v roku 2014 (obr. 1). Rekordných 72 reaktorov bolo vo výstavbe na začiatku 2014, ale iba 5 GW bolo prifázovaných do siete v roku 2014 (oproti 4 GW v 2013), hlboko pod potrebnými 12 GW každý rok k splneniu 2DS pre rok 2025 (obr. 2)



Obr. 1: Počet začatí výstavby, 1955-2014 [IAEA, PRIS]



Obr. 2: Tempo prifázovania do siete a potrebné tempo na dosiahnutie 2DS cieľa [IAEA PRIS, IEA/NEA 2DS]

Každá krajina sa musí rozhodnúť, aký energetický mix je optimálny pre podmienky danej krajiny. Výhody jadrovej energie: nízke emisie skleníkových plynov, schopnosť konkurovať s ostatnými zdrojmi elektrickej energie a bezpečnosť dodávky sú však v mnohých prípadoch prevážené obavami verejnosti a politickými témami. Počet reaktorov vo výstavbe je najvyšší za posledných 25 rokov, a to hlavne vďaka Číne. Záujem o inovatívne dizajny a zdokonalené palivové cykly sa znovu obnovil ako dôsledok vývoja trhov a zlepšenie konkurencieschopnosti jadrových elektrární. Výhodnosť využívania JE je podporená aj predpoveďou, že dlhodobé efekty globálneho otepľovania sú limitované na 2°C a potenciálnom využití jadrovej energie ako zdroja s nízkymi emisiami skleníkových plynov. Tento scenár nie je však predpoveďou. Jadrová energia môže hrať kľúčovú úlohu v znižovaní emisií uhlíka pri výrobe elektrickej energie využitej najmä v základom pásme zaťaženia.

Považujem za nutné dostať sa čo najskôr od politických prehlásení a analytickej práce ku konkrétnym činom. Slovensko nebude krajinou, ktorá bude v danej oblasti udávať smer, ale môže byť dostatočne rozumné na to, aby i) výhodne zúročila svoje doterajšie skúsenosti z jadrovej energetiky a ii) optimálne využila svoj potenciál stredoeurópskeho štátu s flexibilnou legislatívou. Základom je však dlhodobá a reálna koncepcia rozvoja hospodárstva a z toho vychádzajúca energetická politika. Žiadna krajina, a toľž nie malé Slovensko, si nemôže dovoliť meniť hospodársku politiku každé volebné obdobie. Tento materiál si kladie za cieľ zosumarizovať súčasný stav a navrhnúť optimálne ciele a kroky do ďalšieho obdobia. Ak vyvolá odbornú polemiku, ktorá vyústi v jeho vylepšenie – budem len rád. Komplexné úvahy v rozsahu 58 strán si záujemcovia môžu prečítať na [www.snus.sk](http://www.snus.sk).