

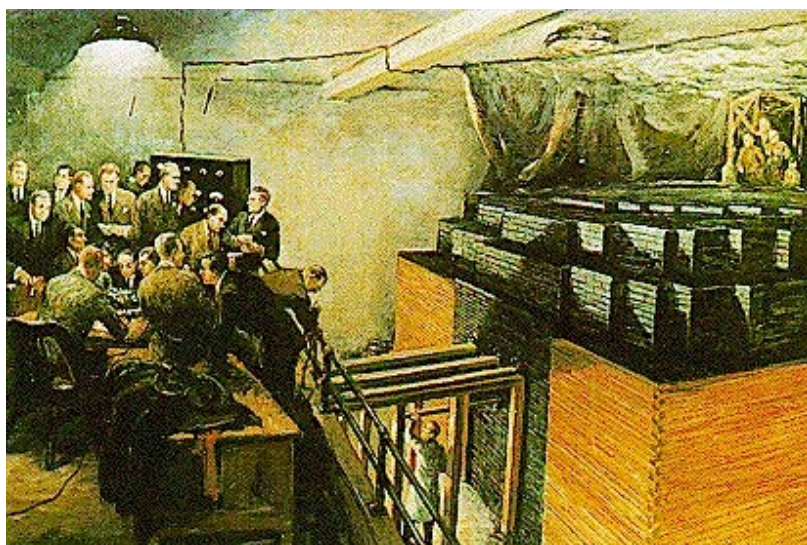
## Jedinou skutečnou alternativou pro lidstvo je atom

Pro název článku jsem použil poměrně odvážné tvrzení, ale jsem přesvědčen o jeho pravdivosti. Slovy klasika: „Můžeme o tom diskutovat, můžeme o tom vést spory, můžeme s tím i nesouhlasit, ale to je všechno, co se proti tomu dá dělat“. Vzpomněl jsem si v této souvislosti na profesora Heřmanského, legendu české jaderné energetiky, který svým studentům na přednáškách říká: „Nejsem fanouškem jaderné energetiky, ale zatím nic lepšího nemáme“.

### Trocha historie

Chtěl bych se v tomto článku věnovat především perspektivám jaderné energetiky, ale v době, kdy si připomínáme 20. výročí černobylské katastrofy, neuškodí, když se podíváme i do historie.

Štěpení jader uranu po ozáření neutrony objevili v roce 1938 Otto Hahn a Fritz Strassmann. Už v roce 1942 uskutečnil první kontrolovanou štěpnou řetězovou reakci americký fyzik italského původu Enrico Fermi. V pionýrských podmínkách pod tribunou chicagského stadionu postavil se svým týmem „atomový milíř“, který se skládal z uranu a grafitu. Fermi věděl, že jsou jádra uranu nejlépe štěpitelná takzvanými pomalými neutrony. K jejich zpomalování (moderaci) sloužil právě grafit. První řetězovou reakci ukončil takzvaný „brzdař“, který zasunutím kadmiové tyče do útrob reaktoru reakci po půl hodině bezpečně zastavil. Bylo známo, že kadmium je prvek, který silně pohlcuje neutrony, proto byla nad reaktorem připravena „parta sebevrahů“, kteří měli za úkol, v případě nekontrolovatelného rozběhu řetězové reakce, „uhasit“ reaktor kbelíky s kadmíem.



Atomový milíř E. Fermiho

Největšího pokroku ve výzkumu štěpení bylo dosaženo, bohužel, během projektu Manhattan. Na projektu vývoje první jaderné bomby se podíleli nejvýznamnější fyzici, mnozí budoucí nositelé Nobelovy ceny. Jeden z nich – Richard Feynman, popisoval první ostrý test, který proběhl v červenci 1945 takto: „Pak přišla ta chvíle a tam v dálce se objevil děsivý záblesk. Viděl jsem, jak se bílá záře mění na žlutou a oranžovou. Mračna kouře se vytvářela a zase zanikala, tak jak se tlaková vlna stlačuje a rozpíná. Nakonec velká oranžová koule, jejíž střed tak zářil, začíná stoupat, trochu se rozpíná a na okrajích černá a člověk vidí, že je plná ohně a kouře a plameny z ní šlehají ven“. Tento Feynmanův zážitek trval necelou minutu. Výbuch byl čtyřikrát silnější, než vědci očekávali a teplota v epicentru byla třikrát vyšší než v nitru Slunce. Tehdy si vědci uvědomili, že s tímto druhem energie si není radno zahrávat. Na dlouhá léta potom na jadernou energii vrhaly neblahý stín výbuchy v Hirošimě a Nagasaki.

## Katastrofa v Černobylu

Když už lidé začali jadernou energii brát jako přijatelnou, přišla rána z čistého nebe. 26. dubna 1986 vybuchl reaktor 4. bloku černobylské elektrárny. Protijaderní aktivisté často používají tuto katastrofu k útokům proti jaderné energii jako takové. Dnes ale už i středoškoláci vědí, že černobylské reaktory typu RBMK jsou konstrukčně i principiálně zcela odlišné od dnes ve světě nejrozšířenějších typů reaktorů. RBMK (reaktor balšoj moščnosti kanalnyj) je konstruován na principu samostatných palivových kanálů, v nichž jsou umístěny palivové články. Kanály kolmo procházejí velkými cylindrickými grafitovými bloky, které slouží ke zpomalování neutronů. Do kanálů se zespodu přivádí voda, která se průchodem ohřívá a mění na páru, která je vedena na separátory a dále přímo na turbínu. Tento typ reaktorů se stavěl pouze v bývalém Sovětském svazu. Nejrozšířenějšími reaktory na světě jsou tzv. tlakovodní reaktory. Mezi ně patří i naše dukovanské a temelínské. Ty jsou konstruovány jako tlakové nádoby, ve kterých jsou v těsném uspořádání umístěny palivové soubory. Jako chladivo i moderátor je použita voda o vysokém tlaku (v případě Dukovan je to přibližně 12 MPa). Do prostoru dna tlakové nádoby se přivádí voda o teplotě kolem 270 stupňů Celsia, která se průchodem aktivní zónou ohřeje o 40 stupňů. Pára se vyrábí až v tepelném výměníku zvaném parogenerátor. Jde o zcela odlišnou konstrukci – jako chladivo i moderátor se používá voda. Výhodou tlakovodních reaktorů jsou záporné zpětné vazby – když se voda více ohřívá, vede to k horší moderaci a tedy k utlumení štěpné řetězové reakce. Pokud by se v reaktoru začala voda vařit, ubývalo by moderátoru a vedlo by to také k utlumování štěpení. Jednoduché fyzikální principy tak zajišťují bezpečnost reaktoru. Černobylský typ reaktoru se však vyznačoval kladnou zpětnou vazbou – takzvaným kladným dutinovým koeficientem reaktivity. Pokud se voda vypařovala více, vedlo to ke zlepšování moderování (moderátorem nebyla voda, ale grafit) a tím k dalšímu rozvoji řetězové reakce. Při dodržování předpisů nebyl problém tyto reaktory regulovat a i při tomto nedostatku se nedaly označit za nebezpečné. Černobylskou katastrofu způsobila až kombinace nevhodné konstrukce s hrubým porušením provozních předpisů. K neštěstí nedošlo za normálního provozu, ale během experimentu, který měl prověřit, jak dlouho bude elektrický generátor, po uzavření přívodu páry na turbínu, schopen svým doběhem napájet čerpadla havarijního chlazení. Podle plánovaného průběhu experimentu mělo dojít ke snížení výkonu reaktoru na 700-1000 MW tepelných, následně se měly odpojit čerpadla havarijního chlazení, aby nenajela během testu a poté mělo následovat uzavření přívodu páry na turbínu. Zahájení testu bylo na požadavek dispečinku odloženo o 9 hodin – blížil se svátek práce, podniky chtěly splnit své závazky, takže byla zvýšená spotřeba elektřiny. V následném průběhu testu pak na příkaz vedoucího směny operátoři hrubě porušili několik předpisů. Výkon reaktoru klesl v důsledku odkladu až na 30 MW. Operátoři výkon zvýšili na 200 MW vytažením regulačních tyčí (v reaktoru jich zůstala polovina povolené hodnoty). Při této výkonové hladině je reaktor silně nestabilní a je hluboko pod minimálním výkonem povoleným pro test. Po uzavření průtoku páry na turbínu se snížil i průtok vody do reaktoru – teplota začala stoupat a s rostoucím množstvím páry se začal projevovat zmiňovaný kladný dutinový koeficient, který vedl k dalšímu zvyšování výkonu. Katastrofa už byla neodvratná. Posledním impulsem bylo paradoxně havarijní odstavení reaktoru, ke kterému se operátoři rozhodli. Přispěla k tomu další konstrukční vada reaktoru – spodní část regulačních tyčí byla vyrobena z grafitu, takže při zahájení zasouvání tyčí se do reaktoru nejprve zasouval grafit a došlo k dalšímu zlepšení moderace a dalšímu razantnímu zvýšení výkonu. Poté došlo po sobě ke dvěma mohutným výbuchům. Výkon byl tak velký, že pára odsunula horní betonovou desku reaktoru o váze 1000 tun. Do reaktoru vnikl vzduch a reakcí vodní páry s rozžhaveným grafitem vznikl vodík, který vzápětí explodoval a rozmetl do okolí palivo a 700 tun radioaktivního hořícího grafitu. Nedošlo tedy k jadernému výbuchu (jak se mnozí laici domnívají), ale k výbuchu páry a vodíku. Následky však byly nepředstavitelné.

Věnoval jsem se černobylské katastrofě možná více, než jsem měl původně v úmyslu, ale pokud píšu článek o perspektivách jaderné energetiky v dubnu roku 2006, nemohu se tomuto tématu vyhnout. Po černobylské havárii došlo k velkému tlaku na zvyšování bezpečnosti stávajících reaktorů. Pravděpodobnost úmrtí v důsledku havárie jaderného reaktoru je dnes srovnatelná

s pravděpodobností, že vás trefí do hlavy meteorit. Je to pravděpodobnost o mnoho a mnoho řádů menší, než riziko spojené s automobilismem a dalšími činnostmi, kterým se denně věnujeme. Žádná průmyslová technologie není bez rizika, je třeba zvažovat, jaká úroveň rizika je pro lidstvo přijatelná.

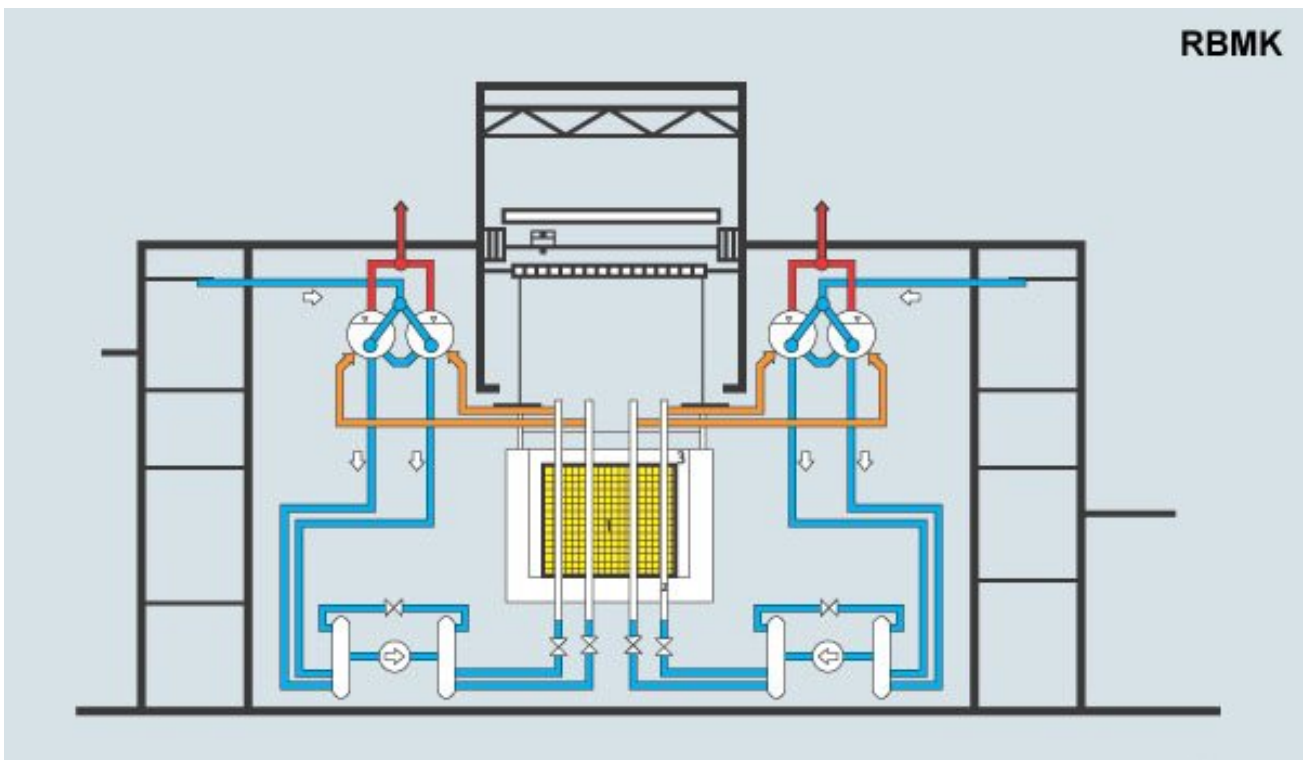


Schéma bloku s reaktorem RBMK

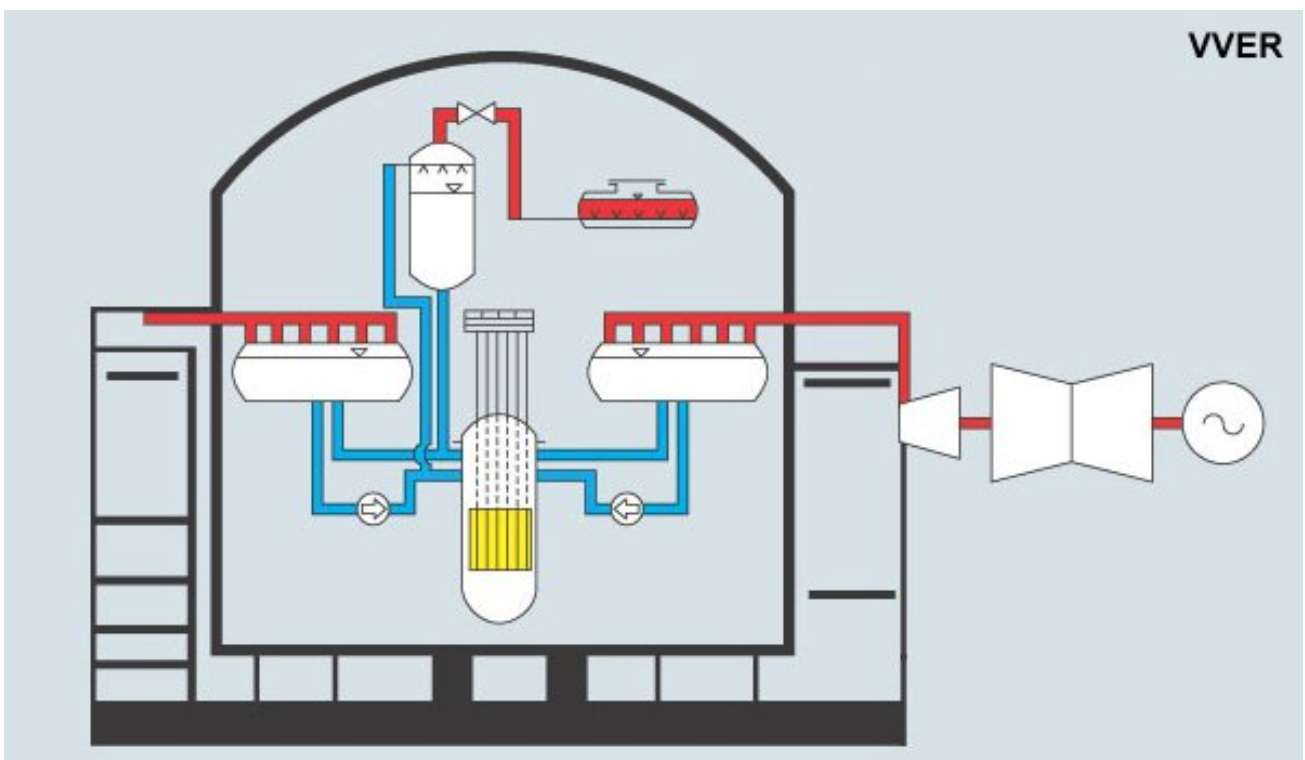


Schéma bloku s reaktorem VVER

## Perspektivy jaderné energetiky

Podle Světové rady pro energii (World Energy Council) se globální potřeba zdrojů elektřiny během příštích 25 let zdvojnásobí ze současných 3,5 na 7,1 terawatt, což představuje růst 2,4 % ročně. Česká republika není výjimkou – v roce 2005 byla u nás spotřeba elektřiny dokonce o 3,9 % vyšší než v předcházejícím roce. Musíme se samozřejmě zaměřit na úspory energií a na zavádění moderních (méně energeticky náročných) technologií, ale představa, že nás úspory zachrání od potřeby výstavby nových zdrojů, je krajně naivní. Přírodní podmínky a přístup k surovinám je v různých částech světa rozdílný, ale obecně můžeme říci, že jedinými zdroji, které mohou uspokojit stále rostoucí hlad po elektřině jsou uhlí a jádro. Plyn je příliš drahý a máme navíc ještě v živé paměti, jak zranitelnou se ukázala Evropa, když Ukrajina bojovala s Ruskem o ceny této suroviny. Slunce, voda, vítr nebo biomasa budou vítaným doplňkem velkých zdrojů, ale například v České republice se stěží podaří splnit náš závazek výroby 8 % v obnovitelných zdrojích. Dokud bude dostatek uhlí, bude vhodné, v zájmu diverzifikace zdrojů, stavět uhelné i jaderné elektrárny. Musíme si však uvědomit, že tu uhlí nebude věčně a že v zájmu snižování emisí skleníkových plynů by se současný poměr uhlí:jádro měl otočit ve prospěch jaderných elektráren. Tento trend už se dá v současnosti ve světě pozorovat. Například Čína od roku 2002 vybudovala šest jaderných elektráren a v příštích 15 letech jich plánuje postavit dalších třicet. Do roku 2050 chce mít celkem 150 reaktorů. Japonsko plánuje do roku 2011 zvýšit podíl elektřiny z jádra na 30 %. Tohoto cíle chce dosáhnout výstavbou dalších elektráren o celkové kapacitě 17,5 GW. Nové jaderné zdroje se uvádějí do provozu i v Rusku. Evropa je, stejně jako Spojené státy, zatím ještě zdrženlivá, ale je to dáno tím, že v současnosti zatím nepocítíme takový nedostatek elektřiny, jako je tomu v rychle rostoucích asijských ekonomikách. První evropskou vlaštovkou je Finsko, kde se staví jaderná elektrárna v lokalitě Olkiluoto, o nových jaderných blocích se začíná mluvit ve Francii, ale i dalších evropských zemích. Německo začíná přehodnocovat svoje plánované odstoupení od jaderné energie. Prezident Bush prohlásil, že Amerika začne opět stavět nové jaderné elektrárny do konce této dekády.



Prognóza vývoje světové spotřeby elektřiny (v miliardách kWh)

## Nové generace reaktorů

Často se v souvislosti s přípravou nových projektů hovoří o reaktorech III. a IV. generace. Co toto označení znamená? Nová generace jaderných reaktorů je založena na zdokonalení existujících typů a využívá ověřené konstrukční prvky a dostupná technologická vylepšení. Třetí generace jaderných reaktorů se vyznačuje zvýšenou bezpečností a spolehlivostí zařízení. K důležitým

parametrům III. generace reaktorů patří nižší investiční náklady, kratší doba výstavby, delší životnost, méně radioaktivního odpadu a celkově vyšší efektivnost provozu. Do III. generace reaktorů můžeme zařadit například projekt EPR – Evropský tlakovodní reaktor (AREVA – Framatom ANP), který se v současnosti staví ve Finsku. Nejde tedy o žádné sci-fi, ale o projekty připravené ke komerčnímu využití. Do této generace můžeme zařadit i americký projekt AP 600 (BNFL – Westinghouse) nebo varné reaktory SWR-1000 (AREVA – Framatom ANP) a ABWR (General Electric – 2 běží a 2 jsou ve výstavbě v Japonsku). I u nás známé reaktory VVER mají své následovníky III. generace – jsou to projekty VVER-1000 typ V-392 nebo VVER-640 typ V-407 (Atomstrojexport). Všechny zmíněné projekty se vyznačují zjednodušenou konstrukcí v porovnání se svými předchůdci. Některé z nich jsou konstruovány dokonce jen jako dvousmyčkové (dva parogenerátory) namísto dnešních čtyřsmyčkových (Temelín) nebo dokonce šestismyčkových (Dukovany). Tyto bloky tak mají méně potrubí, méně ventilů a čerpadel a méně kabeláže, což vede ke zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti. Jejich hlavním rysem je ale vyšší využití pasivních bezpečnostních prvků. Jde například o pasivní chlazení aktivní zóny, které může fungovat i několik dní bez dodávky elektrické energie. V neposlední řadě byl kladen důraz i na zvýšení efektivnosti provozu, takže tyto reaktory ušetří téměř jednu pětinu paliva a vyprodukují o 15 % méně radioaktivních odpadů, než jejich současní předchůdci. Projektová životnost těchto reaktorů bude minimálně 60 let.

Ale ani s těmito moderními projekty se odborníci nesmířili. Již dnes se na mezinárodní úrovni rozvíjí spolupráce na projektech IV. generace reaktorů. Ty by měly přijít na řadu po roce 2030. Jejich projekty musí splňovat přísná kritéria bezpečnosti, spolehlivosti a ekonomičnosti. Zároveň nesmí (stejně jako současné reaktory) ohrožovat dohodu o nešíření jaderných zbraní. Do kategorie ekonomičnosti spadá například přijatelné riziko pro investory, časový úsek výstavby elektrárny ne delší než tři roky či cenová konkurenceschopnost výroby elektřiny ve srovnání s ostatními zdroji v regionu. Pro bezpečnost byly zase určující faktory jako například mizivá pravděpodobnost poškození aktivní zóny reaktoru nebo tolerance reaktoru k chybám lidské obsluhy. Zatímco v současnosti je běžná provozní teplota v lehkovodních reaktorech do 330 stupňů Celsia, u reaktorů IV. generace se pohybuje od 510 do 1000 stupňů. Reaktory by tak dokázaly zajistit dostatečně vysoké teploty nutné k termochemickým postupům výroby vodíku.

### Kam s ním?

Na začátku 90. let minulého století se odpůrci jaderné energetiky soustředovali především na kritiku bezpečnosti. Záhy ale pochopili, že bezpečnost jaderných elektráren je na velmi vysoké úrovni, která nemá v žádném jiném oboru lidské činnosti obdoby. Proto se následně zaměřili na poukazování na neefektivnost výroby elektřiny v těchto zdrojích. Realita však ukázala, že i tyto argumenty jsou liché. Jaderná elektrárna Dukovany patří k nejlevnějším výrobním zdrojům společnosti ČEZ. V dnešní Evropě už také pomalu ale jistě jaderné elektrárny poráží ve výrobních nákladech ostatní zdroje. Podobně je tomu i ve Spojených státech. Japonsko a Čína nestaví nové a nové jaderné bloky z plezíru, ale pro jejich vysokou efektivitu a snížení závislosti na fosilních zdrojích.

Posledním, i když diskutabilním, argumentem, který zůstává zeleným v rukou je problematika jaderného odpadu. Materiáloví inženýři tvrdí, a nemám důvod jim nevěřit, že dokáží připravit materiály pro kontejnery odolné po tisíce let, geologové dokáží najít lokality, kde mohou zajistit stabilní prostředí po statisíce let. Není tedy problém oddělit vyhořelé palivo od biosféry po potřebně dlouhou dobu (dokud nepoklesne jeho radioaktivita na přijatelnou úroveň). Přiznám se ale, že nejsem fanouškem trvalého ukládání. Vyhořelé jaderné palivo totiž obsahuje ještě velké množství štěpitelných izotopů a je tak velmi cennou surovinou. Italský nositel Nobelovy ceny Carlo Rubia před lety navrhl metodu takzvaných transmutací. Tyto systémy se dnes vyvíjejí v široké mezinárodní spolupráci a Česká republika patří na přední místo. Jde o systémy známé pod zkratkami ADTT (Accelerator Driven Transmutation Technology), čili urychlovačem řízené transmutační systémy. Vysoce radioaktivní prvky (s dlouhým poločasem rozpadu) jsou vystaveny

silnému toku neutronů, přičemž dochází k jejich transmutaci – vznikají z nich izotopy se středními nebo dokonce krátkými poločasy rozpadu. To znamená, že z materiálu s poločasy rozpadu v řádu tisíců nebo desetitisíců let dostáváme prvky s poločasy do 30 let. Současně v těchto reaktorech dochází ke štěpení, takže mohou být využívány pro výrobu elektřiny. Je jasné, že uložení materiálu, který by vyžadoval oddělení od biosféry po dobu 150 let (radioaktivní materiál se považuje za zcela rozpadlý po uplynutí přibližně pěti poločasů rozpadu) si už dovedeme představit snáze. Realisté odhadují možnost výstavby prvního prototypu takového zařízení po roce 2020.

Každopádně mezisklady v lokalitách našich jaderných elektráren jsou projektovány na dobu 60 let, takže budeme mít dostatek času se rozhodnout, zda vyhořelé palivo ukládat, přepracovávat či transmutovat.

### Po štěpení přijde fúze

Jaderná bomba založená na slučování lehkých prvků (tzv. vodíková) byla vyvinuta vzápětí po bombě štěpné. Řízená termojaderná reakce je však dnes stále ještě v nedohlednu. Abychom přinutili lehká jádra ke slučování, musíme překonat odpuzivé elektrostatické síly (jádra mají kladný náboj). Pokud se nám podaří tyto síly překonat a dostat jádra dostatečně blízko sobě, začnou nad elektrostatickými převládat síly jaderné, které jsou mnohem silnější, ale mají jen velmi malý dosah. Překonat odpuzivé síly můžeme tak, že dodáme jádrům dostatečně velkou kinetickou energii. Jak známo – čím vyšší teplota hmoty, tím je vyšší rychlost částic v ní obsažené. Stačí tedy hmotu (plazmu) zahřát na dostatečně vysokou teplotu. Háček je však ve slůvku dostatečně. Je třeba dosáhnout teploty několika milionů stupňů Celsia. Jsou to podobné podmínky, které panují v nitru hvězd, kde termojaderná fúze probíhá samovolně. Udržet takovou hmotu stabilní je velmi složité. Zatím se to vědcům daří po doby řádově jen několika sekund. Neexistuje materiál, který by dokázal odolávat tak vysokým teplotám. Proto jsou termonukleární reaktory konstruovány, zjednodušeně řečeno, jako uzavřená trubice, ve které je plazma udržována v prstenci silným magnetickým polem, takže se nedotýká stěn. Pro slučování můžeme využít nejrůznějších izotopů lehkých prvků. Můžeme slučovat například izotopy vodíku. Při sloučení dvou jader deuteria vzniká jádro helia a volný neutron nebo jádro tritia a vodíku, nebo můžeme slučovat jádra lithia s jádry deuteria za vzniku dvou jader helia apod. Při těchto reakcích se uvolňuje obrovské množství energie. Výhodou je, že zdroj energie je prakticky nevyčerpatelný. Mořská voda obsahuje v jednom metru kubickém 33 gramů deuteria a 500 kg paliva by stačilo pro roční provoz reaktoru o výkonu 500 MW. Další výhodou je, že při slučování nevznikají dlouhodobě radioaktivní izotopy.

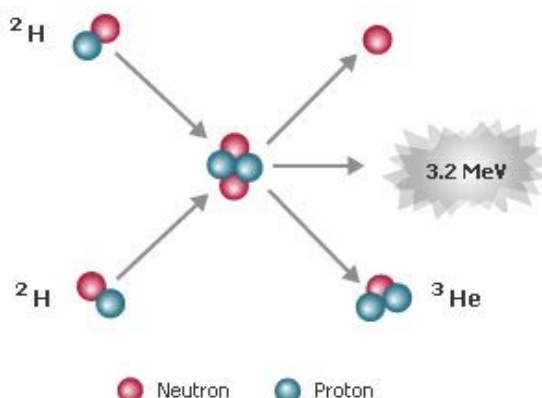


Schéma fúze dvou jader deuteria

Velké naděje jsou vkládány do mezinárodního projektu ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), který by už měl sloužit pro vývoj komerčně využitelných technologií. Bude to jistě běh na velmi dlouhou trať, ale jsem přesvědčený, že se v budoucnosti podaří přivést fúzi k energetickému využití.

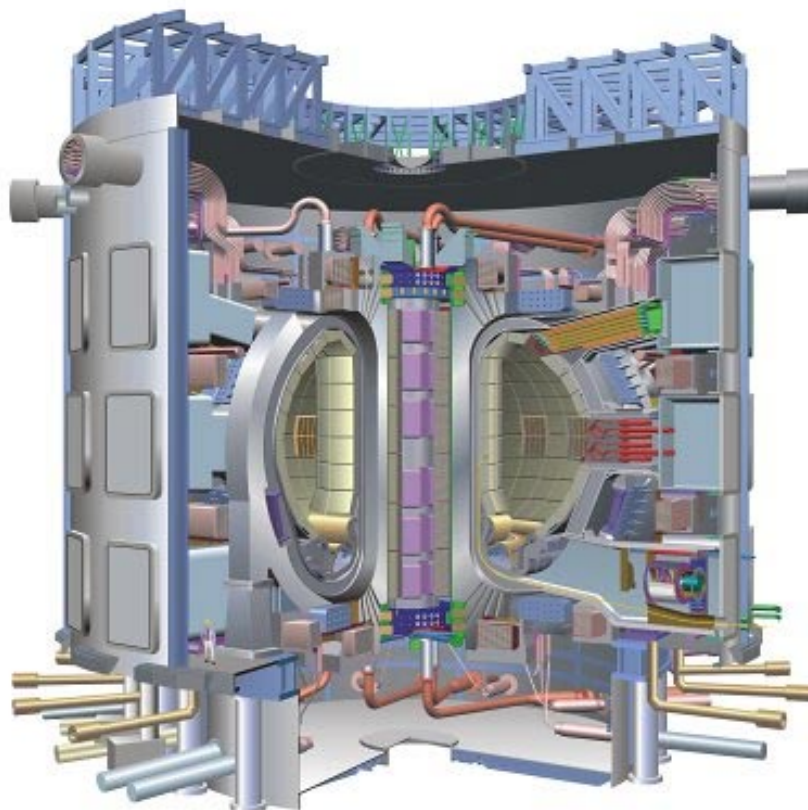


Schéma řezu termojaderným reaktorem ITER

Mohu se závěrem znovu vrátit k nadpisu tohoto článku a dovolit si soukromou prognózu. Jsem přesvědčen, že jedinou seriózní možností pokrytí rostoucích energetických potřeb lidstva v budoucnosti je atom. V první polovině století to budou především nové generace klasických (štěpných) reaktorů a budu-li optimista, mohu očekávat, že ve druhé polovině nebo ke konci století začnou tyto zdroje nahrazovat reaktory fúzní.

Daneš Burket  
člen výboru [České nukleární společnosti](#)

*psáno pro portál [TZB info](#) u příležitosti 20. výročí černobylské havárie*