



**Budoucnost?** Takto bude výzkumné středisko Cadarache vypadat, až bude hotové. Reaktor ITER s výškou 29 metrů a průměrem 28 metrů bude umístěn v oranžové budově.

Ilustrace: ITER

# Reaktor má užít energii hvězd

Děni kolem japonských jaderných reaktorů znovu otevírá debaty o **budoucnosti jaderné energetiky**. Na výzkumu se podílejí i čeští vědci.

Již desítky let pracují fyzikové na jiném konceptu využití jaderné energie, který by měl zajistit světu dostatek energie, ale není založen na štěpení uranu nebo plutonia, jak je známe z jaderných elektráren. Říká se mu jaderné slučování či jaderná fúze. Tímto způsobem vyrábějí energii hvězdy.

Při této reakci se slučují jádra vodíku a uvolňuje se energie. Vědci však tuto reakci stále nedokážou kontrolovatě napodobit tak, aby se uvolnilo více energie, než kolik se spotřebuje na provoz laboratoře. V současné době se připravuje zatím největší světový experiment, který by měl napovědět, jestli inženýři a fyzikové dokážou jadernou fúzi přece jenom zvládnout.

V roce 2006 se Evropská unie, Japonsko, USA, Rusko, Čína, Jižní Korea a Indie, tedy země, v nichž žije polovina obyvatel světa, definitivně dohodly na stavbě Mezinárodního termojaderného experimentálního reaktoru (ITER). Ten má prokázat, že je možné vyrábět slučováním vodíku na helium energii, která navzdory zachráněním lidstvo před energetickou krizí. Pokusný reaktor má zároveň umožnit technický vývoj komponent pro budoucí fúzní elektrárny.

Zařízení bude stát ve francouzském výzkumném středisku Cadarache nedaleko Marseille. Jeho provoz by měl začít v roce 2019. Pokud se osvědčí, někdy v polovině století by snad mohla konečně být postavena první komerční elektrárna založená na jaderné fúzi, která bude dodávat elektřinu do sítě.

## Baterie a vana vody

Fyzikové se už od padesátých let snaží tuto reakci ovládnout. Vědí, že potřebují udržet v magnetickém poli vodík rozpálený na miliony stupňů, v němž se elektrony odtrhly od jader. V této směsi, nazývané plazma, se jádra vodíkových atomů srážejí, vytvářejí helium a uvolňují energii.

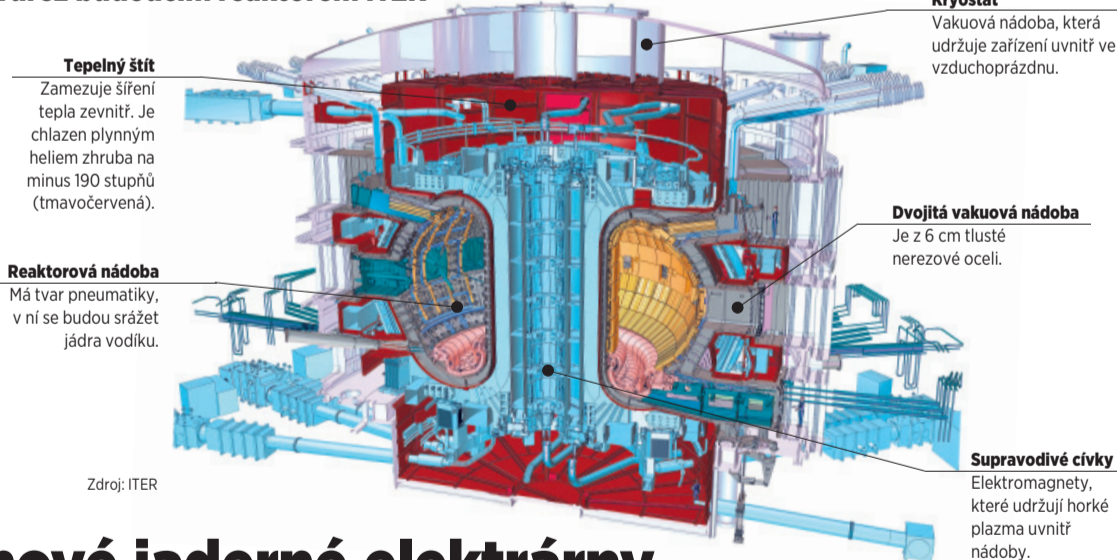
Vědci mají i příslušné reaktory, těm nejnadějnějším se říká tokamak. Dva pracují v České republice, jejíž fyzikové se podílejí i na přípravě projektu ITER. Avšak v tokamaku zatím reakce probíhá jen slabě a pár vteřin. Nestací

to k tomu, aby mohla vyrábět energii do sítě.

Jinak však má fúzní reaktor samé výhody. Nevypouští skleníkové plyny ani jiné exhalace. Nevznikají v něm vysoce radioaktivní odpady. A suroviny pro něj nejsou nedostatkové. Vědci zatím neumějí používat v tokamaku běžný vodík, jako tomu je ve Slunci. Potřebují jeho těžší izotopy deuterium a tritium. První se dá získat přímo z vody, druhý se obvykle vyrábí bombardováním lithia neutrony v jaderném reaktoru, nejlépe přímo v tokamaku. Vody je všude dost a lithia vcelku také. A ani ho není zapotřebí mnoho.

„Vezměte lithium z jedné baterie pro přenosný počítač. K tomu přidejte deuterium asi z půlky vany naplněné vodou. A máte suroviny, ze kterých v termojaderném reaktoru vyrobíte tolik elektřiny, kolik stačí jednomu obyvateli západní Evropy na třicet roků,“ popsal naději vědci Christopher Llewellyn Smith, přední britský odborník, který se na přípravě projektu ITER podílel.

## Průřez budoucím reaktorem ITER



**Tepelný štít**  
Zamezuje šíření tepla zevnitř. Je chlazen plyným heliem zhruba na minus 190 stupňů (tmavočervená).

**Reaktorová nádoba**  
Má tvar pneumatiky, v ní se budou srážet jádra vodíku.

**Kryostat**  
Vakuová nádoba, která udržuje zařízení uvnitř ve vzduchoprázdnu.

**Dvojitá vakuová nádoba**  
Je z 6 cm tlusté nerezové oceli.

**Supravodivé cívky**  
Elektromagnety, které udržují horké plazma uvnitř nádoby.

Zdroj: ITER

## Vědci vyvíjejí nové jaderné elektrárny

Jaké budoucí jaderné elektrárny by se měly stavět, aby se jejich potenciální rizika dále snížila?

Podle Mezinárodní agentury pro atomovou energii pochází celosvětově asi 15 procent elektřiny z jaderných reaktorů. Po jaderné nehodě v Japonsku se ukáže, jestli toto číslo poklesne.

„V příštích desetiletích zůstane jaderná energetika jediným energetickým zdrojem schopným vyrobit dostatek finančně dostupné elektřiny a přitom nevypouštět do ovzduší oxid uhličitý, jenž se podílí na globální změně klimatu a který produkuje uhelné, ropné i plynové elektrárny,“ říká Roland Schenkel, donedávna generální ředitel Společného výzkumného střediska Evropské unie (JRC).

### Generace IV v přípravě

Vědci v nejvyspělejších zemích světa pracují na vývoji reaktorů, jimž se

říká Generace IV. Projekt jejich vývoje navrhlo Mezinárodní fórum pro přípravu Generace IV (GIF) v roce 2000. Jeho členy je nyní devět zemí světa a Evropská unie.

„Připravíme nové reaktory tak, aby byly ekonomicky výhodnější a současně výrazně spolehlivější a bezpečnější než ty současné,“ prohlašuje Jacques Bouchard, francouzský jaderný fyzik a předseda GIF. Vědci soudí, že by v Generaci IV mělo být šest typů reaktorů. Časem se ukáže, které budou nejslibnější a vývoj kterých se naopak zbrzdí.

Ve hře jsou tři různé nové typy takzvaných rychlých reaktorů, jimž se také říká množivé, které mají být chlazené sodíkem, olovem nebo heliem. Jejich podstatou je, že se v nich vytvoří více štěpného materiálu, než se spotřebuje. V reaktoru se uran 238 změní v plutonium, které lze využít jako palivo. Přebývajícím plutoniem se pak dá použít v jiných

reaktorech. Základní princip i provozní vlastnosti rychlých reaktorů už ověřilo zejména Rusko a Francie.

Teď je však nutné tuto koncepci upravit do technicky i ekonomicky nejvýhodnější podoby. Výhodou je možnost využívat v takových reaktorech jako palivo izotop uranu

# 15 %

elektřiny spotřebované ve světě pochází z jaderných elektráren.

238, kterého je na světě mnohem víc než dnes užívaného uranu 235. Izotop 235 totiž tvoří jen 0,7 procenta přírodního uranu.

### Teplota pro vodík

Do Generace IV dále patří jeden typ reaktoru, který bude využívat vyso-

ké teploty – takzvaný vysokoteplotní reaktor. Tím by se zvýšila účinnost výroby elektřiny nebo by mělo být možné využít dosažené teploty k výrobě vodíku. Právě o vodíku se totiž někdy uvažuje jako o palivu, které nahradí benzin a naftu pro automobily. Jeho výroba je dnes drahá. Vysokoteplotní jaderné reaktory by ji mohly zlevnit. Chladicím médiem v těchto reaktorech má být helium horké až tisíc stupňů.

Dalším navrhovaným typem je reaktor chlazený takzvanou superkritickou vodou, což je podobné současným reaktorem. Nadkritický či superkritický stav vody nastává při teplotě nad 374 stupňů a při vysokém tlaku, kdy není prakticky rozdíl mezi kapalnou vodou a párou. Tento reaktor má zvýšit účinnost výroby elektřiny zase o několik procent.

Pro budoucí provoz je potřebné prozkoumat, jak na materiály, které budou s horkým heliem nebo su-

Podobné výpočty říkají, že pouhých 600 kilogramů vodíku by ve fúzním reaktoru stačilo zajistit tolik energie, kolik potřebuje celá Česká republika na celý rok.

### Český podíl

„Česká republika má ve výzkumu jaderné fúze dlouholetou tradici a díky tomu je dnes mezi novými zeměmi Evropské unie jediná, která provozuje svůj tokamak,“ připomíná Jan Mlynář z Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd.

Dokonce v Česku fungují hned dvě tato zařízení, pokud vedle moderně vybaveného tokamaku COMPASS v Ústavu fyziky plazmatu počítáme i menší tokamak GOLEM, který funguje zejména pro studenty na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT. Na západ od nás přitom probíhají obdobné a větší experimenty téměř každá země.

Čeští fyzikové budou například ve svých přístrojích předpřipravovat experimenty pro mezinárodní ITER. A drží krok i s druhým směrem výzkumu jaderné fúze, při němž asi milimetrové kulové pelety vodíkového paliva zapaluje laser. Na tomto výzkumu se podílí akademické středisko laserového výzkumu PALS.

Josef Tuček

## Typy jaderných reaktorů

V jaderných elektrárnách dnes pracují různé typy reaktorů. Jejich základní princip je vždy stejný – do těžkých jader atomů uranu, případně plutonia v nich narážejí neutrony, těžká jádra se při nárazu štěpí a uvolňuje se energie.

### Tlakovodní reaktory

Nejrozšířenější typ reaktoru na světě představuje asi 60 procent všech reaktorů. Je známý pod anglickou zkratkou PWR a patří sem i ruské reaktory označované jako VVER. Tento typ reaktoru pracuje i v Dukovanech a Temelíně. Potřebuje jako palivo uran mírně obohacený ve specializovaných závodech. Reaktor ochlazuje obyčejná voda, která je pod tlakem, takže se ani při vysoké teplotě nevaří. Voda také slouží ke zpomalování (moderování) neutronů, které pak díky nižší rychlosti lépe štěpí jádra uranu. Podstatné je, že voda z uzavřeného prvního okruhu, která se ohřívá teplem jaderné reakce, pak předává v parogenerátorech teplo vodě ze sekundárního okruhu, jež teprve vytváří páru, která pohání turbínu a vyrábí elektřinu.

### Varné reaktory

Známé pod anglickou zkratkou BWR. Druhý nejrozšířenější typ reaktorů (asi 20 procent všech světových reaktorů). Používá obohacený uran, případně i palivo obohacené plutoniem. I tady neutrony zpomaluje a reaktor chladí obyčejná voda. Ta se však už v reaktorové nádobě mění na páru a přímo pohání turbínu. Není tu tedy druhý okruh. Tyto reaktory jsou zejména v USA, Německu, Japonsku a Švédsku; šest takových reaktorů pracovalo i v japonské elektrárně Fukušima I, kterou zasáhlo zemětřesení.

### Těžkovodní reaktory

Využívají k chlazení i ke zpomalení neutronů těžkou vodu (s vodíkovým izotopem deuteriem). Jako palivo stačí zcela běžný uran, ve vyhořelém palivu je pak více vojensky využitelného plutonia, což může podnítit šíření jaderných zbraní. Jejich zastoupení ve světě představuje asi 10 procent. Jsou provozovány hlavně v Kanadě, Indii, Jižní Koreji, Rumunsku a Argentíně.

### Plynem chlazené reaktory

Chladí je zpravidla plyný oxid uhličitý nebo helium, neutrony se brzdí v grafitu. Reaktory mohou využívat přírodní uran. Nejsou příliš rozšířené, jsou provozovány jen v Británii.

### Rychlé množivé reaktory

Není v nich moderátor. Jako palivo využívají směs uranu a plutonia; plutonia z reakce vystupuje víc, než do ní vstupuje, a dá se pak využít jako palivo pro další reaktory nebo pro jaderné zbraně. Největší zkušenosti s nimi mají Francie a Rusko, staví se v Indii a Číně.

### Vodou chlazené, grafitem moderované reaktory

Sem patří typ RBMK, který způsobil černobylskou havárii. Již se nestaví, několik těchto reaktorů však funguje v Rusku. (jet)

pak v reaktoru dále štěpí a mění v prvky, které se rychleji rozpadávají. Tímto způsobem by se dalo vyhořelé palivo opět využít, a ještě by se přeměnilo v materiál, který ztratí svoji nebezpečnou radioaktivitu už v průběhu několika set let. Tím by se starosti s ním výrazně snížily.

### Za čtvrt století

Které směry výzkumu se ukážou jako výhodné a od kterých se ustoupí, se teprve ukáže. Jaderný výzkum je dlouhodobá záležitost. Kompletně nové reaktory nebudou připraveny dříve než za čtvrt století – s výjimkou rychlého reaktoru chlazeného sodíkem, s nímž mají vědci větší zkušenosti. Pokud do té doby podstatně nevzroste výroba elektřiny z obnovitelných zdrojů, bude svět jaderné elektrárny s novými, ještě účinnějšími a bezpečnějšími typy reaktorů určitě potřebovat. **Josef Tuček**