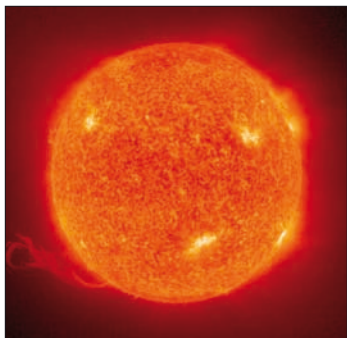


Termojaderná fúze – naděje pro devět miliard

Ing. Jiří Kohutka, redakce Elektro



Nevyhnutelný růst poptávky po elektrické energii, který je již v současné době celosvětově avizován a který lze reálně očekávat v druhé polovině a na konci 21. století, předpokládá zvládnutí průmyslové výroby elektrické energie i jinými prostředky, než jaké jsou k dispozici dnes. Ani jaderná energetika v dnešním pojetí nestačí pokrýt zvyšující se industriální potřeby lidstva. Jeho potřebu elektrické energie totiž nemohou pokrýt ani všechny známé obnovitelné zdroje energie, ale ani neekologické a nadto v brzké době vyčerpitelné světové zásoby fosilních paliv. Proto je pro předpokládaných devět miliard lidí nadějí další „jaderná“ technologie – termojaderná fúze.

Z fyzikálního hlediska je tento proces již velmi dobře znám. Probíhá neustále například na Slunci i ve hvězdách a v jeho průběhu se uvolňuje obrovské množství energie. Podle nejmodernějších vědeckých hypotéz představuje jednu z nadějných možností, jak v budoucnu získat téměř neomezený zdroj energie, a proto se o jeho dosažení a zvládnutí v pozemských podmínkách snaží i vědecké týmy vyspělých zemí.

Doposud nejvýznamnějším a nejpokročilejším pokusem tohoto druhu je fúzní projekt ITER. První bližší informace o projektu ITER, o vzniku a průběhu termojaderné fúze jsme přinesli v článku Experimentální reaktor pro termojadernou fúzi v Elektro č. 3/2008, str. 42. V tomto článku se blíže podíváme na vlastní reaktor ITER.

Termonukleární reaktor ITER (původně *International Thermonuclear Experimental Reactor*, Mezinárodní termonukleární experimentální reaktor; dnes Iter - latinsky cesta) je dosud nejdražší pozemský vědeckotechnický projekt na světě – stál (údajně) šest miliard dolarů.

K čemu slouží a jaký je jeho účel? Jeho vývoj má za prvé prokázat vědeckou a technologickou úspěšnost předních vědeckotechnických mocností. A za druhé a hlavně - má prokázat možnost výroby elektrické energie jinou metodou, než je obvyklá v jaderných elektrárnách (řízená jaderná reakce založená na štěpení jader), a to **termojadernou fúzí** (termonukleární reakce, při níž se spojují - fúzí - jádra lehkých atomů, aby vytvořila těžší jádro).

Termojaderná fúze je totiž jednou z mála možností, jak v budoucnu získat téměř neomezený zdroj energie. Tento z fyzikálního hlediska jednoduchý princip je však z hlediska technické realizace vysoce náročný. Nicméně, a to je hlavní, oproti doposud zvládnutému provozu jaderných elektráren má proces termojaderné fúze několik podstatných výhod:

- nepotýká se s problémy s nedostatkem paliva ani s emisemi skleníkových plynů,
- neprodukuje žádné jaderné odpady, jež by bylo třeba skládat,
- nehrozí explozí a nekontrolovaným šířením štěpných materiálů.

Počátky výzkumu termojaderné fúze

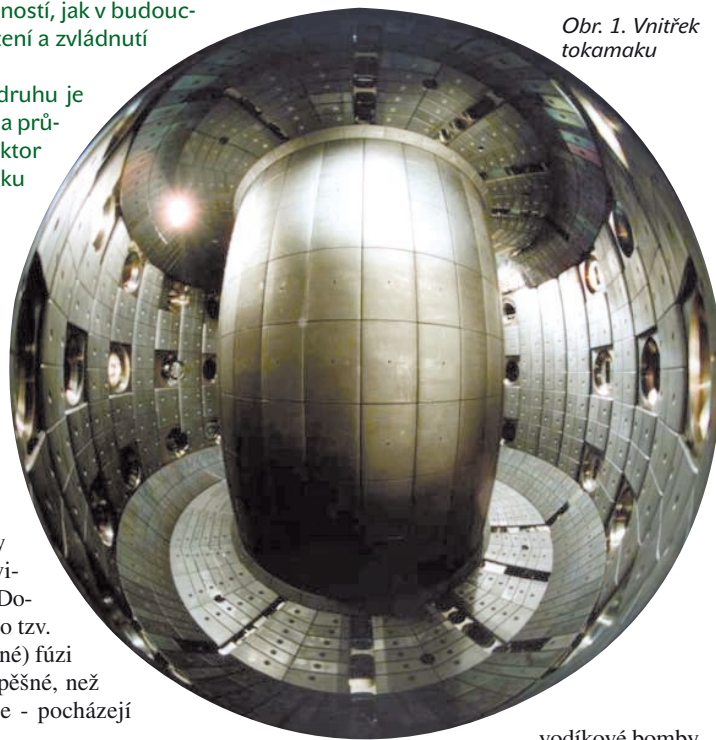
První systematické fyzikální pokusy o dosažení termojaderné fúze byly zahájeny již v polovině minulého století. Do konce první zmínky o tzv. elektrolytické (studené) fúzi – mnohem méně úspěšné, než je dnešní horká fúze - pocházejí už z roku 1924.

Již ve třicátých letech minulého století pozoroval jeden z otců televize, Philo T. Farnsworth, zářící prostor v potenciálové jámě kulové diody – multipactoru. Až mnohem později (1964) však dospěl k názoru, že v tomto prostoru by se mohly vytvořit podmínky pro slučování atomových jader.

První fúzi jader deuteria (izotopu vodíku) v laboratoři uskutečnili pomocí elektrostatického urychlovače vědci Ernst Rutherford, Hartec a Oliphant v roce 1934. V padesátých letech výzkumy pokračovaly a vědecký tým kolem tehdy největšího fúzního zařízení ZETA v anglickém Harwellu ohlásil dosažení termojaderné fúze v roce 1956. Ve skutečnosti však tehdy nešlo o dokonalou termojadernou fúzi, protože nebylo dosaženo energeticky ziskového tepelného chaosu.

Termojaderná fúze koncem první poloviny 20. století. V roce 1949 poslal seržant Rudé armády O. A. Lavrentěv ze Sachalinu výzkumnou zprávu J. V. Stalinovi (a o rok později i ústřednímu výboru KSSS) s informací, že zná princip termojaderného reaktoru. V dopisu O. A. Lavrentěva bylo navrženo dosáhnout potřebné hustoty ve sférické diodě fokusací a energie k urychlení iontů dosáhnout elektrickým polem. A. D. Sacharov, který v té době pracoval na vývoji

Termojaderná fúze koncem první poloviny 20. století. V roce 1949 poslal seržant Rudé armády O. A. Lavrentěv ze Sachalinu výzkumnou zprávu J. V. Stalinovi (a o rok později i ústřednímu výboru KSSS) s informací, že zná princip termojaderného reaktoru. V dopisu O. A. Lavrentěva bylo navrženo dosáhnout potřebné hustoty ve sférické diodě fokusací a energie k urychlení iontů dosáhnout elektrickým polem. A. D. Sacharov, který v té době pracoval na vývoji



Obr. 1. Vnitřek tokamaku

vodíkové bomby a který Lavrentěvův návrh posuzoval, sice ocenil invenci mladého poddůstojníka, po konzultaci se svým učitelem, I. J. Tammem, však nahradil izolaci polem magnetickým. Počátkem padesátých let se tak zrodil dnes nejúspěšnější princip termojaderného zařízení – tokamak (z ruského *toroidalnaja kamera s magnitnymi katuskami* - toroidní komora s magnetickými cívkami). Tokamak (obr. 1) je zařízení vytvářející toroidní magnetické pole, používané jako „magnetická nádoba“ pro uchování vysokoteplotního plazmatu (ionizovaného plynu).

Zatímco sovětská škola od padesátých let konstruovala tokamaky lineárně, resp. toro-

idně, a kladla cívky se vsřícným magnetickým polem za sebe tak, že jejich hlavní rotační osy splývaly, americká škola konstruovala polywellly (polyhedron – well – jáma) polywellly (polyhedron – well – jáma) polywellly – kladla magnetické cívky do tvaru mnohostěnu, a přibližovala se tak kulové ploše – osy cívek se protínaly ve středu (1964, asistent Ph. T. Farnswortha R. Hirsch a poté R. W. Bussard vycházeli z modelu kulové diody, obr. 2).

Od roku 1968 však získaly vítěznou palmu toroidní tokamaky – oproti polywellům mají totiž některé nezanedbatelné výhody:

- tvar magnetických siločar nepovoluje existenci velmi nebezpečné magnetohydrodynamické nestability,
- vzhledem k absenci magnetického pole v interakčním prostoru zde neexistují ztráty cyklotronním vyzařováním,
- je zde pravděpodobnější, resp. není vyloučena přímá přeměna fúzní energie na elektrickou – ad.

Velkým úspěchem bylo zejména vybudování dosud největšího experimentálního reaktoru jaderné fúze na bázi tokamaku na světě JET (Joint European Torus), který je od roku 1983 v provozu v Oxfordu ve Velké Británii. Vědcům se zde poprvé podařilo zvládnout termojadernou fúzi v plazmě, tj. v ionizovaném plynu při teplotě přesahující milion kelvinů. Toto plazma se skládalo ze dvou izotopů vodíku: deuteria a tritia. V roce 1997 se zde podařilo na deset minut spustit fúzní reakci a během ní generovat zhruba dvanáct megawattů energie.

ITER - rok nula

Mezinárodní vědecké společenství dospělo koncem osmdesátých let minulého století k názoru, že je třeba přestat dílet problémy termojaderné fúze zkoumat odděleně ve specializovaných zařízeních, a naopak začít všechny problémy řešit komplexně, s celosvětovou podporou a v jednom společném zařízení, kde se sloučí a využijí všechny dosavadní výsledky výzkumu a technologie zúčastněných partnerů. Koncepční úvahy o stavbě reaktoru na termojadernou fúzi spadají do roku 1985. V roce 1992 byla zahájena etapa vypracování technického projektu – ten byl zdárně dokončen 21. července 2001. Šlo o projekt patnáctimegaampérového reaktoru s fúzním výkonem 500 MW a koeficientem zesílení $Q = 10$. Měl za úkol dokázat životaschopnost termojaderné fúze jako zdroje energie.

V roce 2006 padlo rozhodnutí o umístění termojaderného reaktoru v Evropě, v jiho-francouzském Cadarache.

Rozhodnutí o výstavbě společného experimentálního reaktoru ITER tak představuje významný kvalitativní skok ve výzkumu termojaderné fúze a jejím využití v reálných provozních podmínkách.

Japonsku byl přidělen úkol připravit lokalitu pro demonstrační reaktor, další krok na cestě k průmyslovému využití termojaderné fúze. Demonstrační reaktor bude vybudován



Obr. 2. Pohled na poslední verzi fúzního zařízení polywell WB-6 R. Bussarda

až po dokončení a zkušebním provozu experimentálního reaktoru ITER.

Fúzního projektu ITER – tedy výstavby termonukleárního reaktoru ITER - se dnes účastní sedm států: Evropská unie (společensví států), Rusko (původně Sovětský svaz), USA (v roce 1999 odstoupilo, znovu od 2003), Japonsko, Čína a Jižní Korea (obě od 2003) a Indie (od 2005).

O vstup do projektu projevil zájem i Kazachstán, který má značné zásoby beryllia – prvku, který je používán pro krytí tzv. první stěny vakuové komory. O užší formu spolupráce projevil zájem i Austrálie a Brazílie.

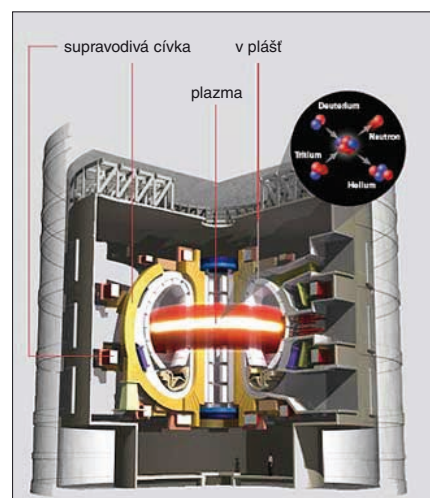
Stavba započne v roce 2009, dokončena by měla být v roce 2016. V současné době pracuje na místě budoucího reaktoru přibližně tři sta osob z 38 zemí celého světa. První plazma by mělo ve vakuové komoře zazářit v roce 2018.

Vědecké znalosti a znalosti technologie, které byly nutné pro vypracování technického projektu experimentálního reaktoru ITER, se opírají o výsledky mnoha výzkumných programů, které byly v oblasti termojaderné fúze především v Evropě v posledních třech desetiletích řešeny a v konečné fázi umožnily upřesnit konstrukční a prováděcí dokumentaci pro výstavbu ITER.

Za sedm let od návrhu ITER bylo dosaženo mnoha nových poznatků, z nichž většina bude aplikována ve vlastní výstavbě experimentálního reaktoru v Cadarache. Jde zejména o kontrolu protuberancí plazmatu na stěny vakuové nádoby, instalaci dodatečných cívek vertikální stability plazmatu a výzkum hmot na bázi wolframu pro nejvíce namáhané části vakuové komory.

Dvacetimegaampérový experimentální reaktor ITER je založen na koncepci tokamaku, ve kterém silné toroidní magnetické pole uzavírá horké plazma v nádobě ve tvaru anuloidu - obr. 3. Jeho hlavním úkolem je poprvé na světě vyrobit magneticky odstíněné a trvale se udržující, stabilní plazma a potvrdit využitelnost termojaderné fúze pro komerční výrobu elektrické energie. Přitom je třeba dosáhnout především toho, aby reaktor vyráběl více energie, než spotřebuje. To je dáno hodnotou koeficientu výkonového zesílení Q , který specifikuje poměr mezi množstvím energie vyrobené s využitím termonukleární reakce a množstvím energie vynakládané na udržení podmínek fúze. Při fúzi deuteriových a tritiových jader vznikají částice alfa (jádra helia), neutrony a energie 17,6 MeV.

Je-li $Q < 1$, znamená to, že k ohřevu plazmatu třeba dodat víc energie, než kolik jí vzniká při fúzi. Provoz je rentabilní teprve od okamžiku, kdy se plazma samo udrží, tzn. když většina energie pro



Obr. 3. Schematický řez experimentálním reaktorem ITER (foto: Iter)

ohřívání plazmatu přichází z vlastní fúzní reakce a hodnota $Q \geq 1$. Tuto podmínku ještě žádné experimentální zařízení nesplnilo. Rekord prozatím drží tokamak JET s hodnotou koeficientu výkonového zesílení $Q = 0,65$, ale i to je ještě hodně daleko pod kritickým koeficientem 1. Pro dosažení hodnoty $Q \geq 1$ je mimo jiné třeba překročit kritickou velikost reaktoru (viz obr. 4). Objem obřího reaktoru ITER je osmkrát větší než dosud používaná zařízení a projektanti očekávají, že bude při výkonu 500 MW pracovat s koeficientem výkonového zesílení $Q = 10$, a dokáže tedy dodat desetkrát větší výkon, než je zapotřebí pro jeho provoz.

Čísla

Reaktor ITER bude tzv. celosupravodivý. Dosud mají na světě celosupravodivý tokamak pouze Čína (EAST, *Experimental Advanced Super Conducting Tokamak*, 2006) a Jižní Korea (KSTAR, *Korean Superconductivity Thermonuclear Advanced Research*, 2008). Indie celosupravodivý tokamak teprve staví.

ITER bude obsahovat 400 tun supravodivého materiálu Ni_3Sn o celkové délce 82,2 kilometru. Celková hmotnost supravodivého materiálu bude 6 540 tun a vyrobí magnetické pole o indukci téměř 12 T. Jeho výrobcem bude Japonsko.

Teplota plazmatu se vyšplhá nad sto milionů kelvinů. Plazmatem poteče proud 15 MA a magnetické pole bude dosahovat 5,3 T. Na výrobu 500 MW energie bude ITER – International Thermonuclear Experimental Reactor, Mezinárodní termojaderný pokusný reaktor. Předpokládaný výkon reaktoru je 500 MW, bude potřebovat dodávku 50 MW z vnějšku. Prsteneček bude naplněn pouhou polovinou gramu paliva. Tím je směs deuteria a tritia. Okolo aktivní zóny budou uloženy zhruba tři tuny lithia, které bude zachycovat vylétávající neutrony a postupně se přeměňovat na tritium, které se zase využije v reakci

Celková hmotnost reaktoru ITER bude 350 000 tun. Při stavbě budou přemístěny dva miliony krychlových metrů zeminy.

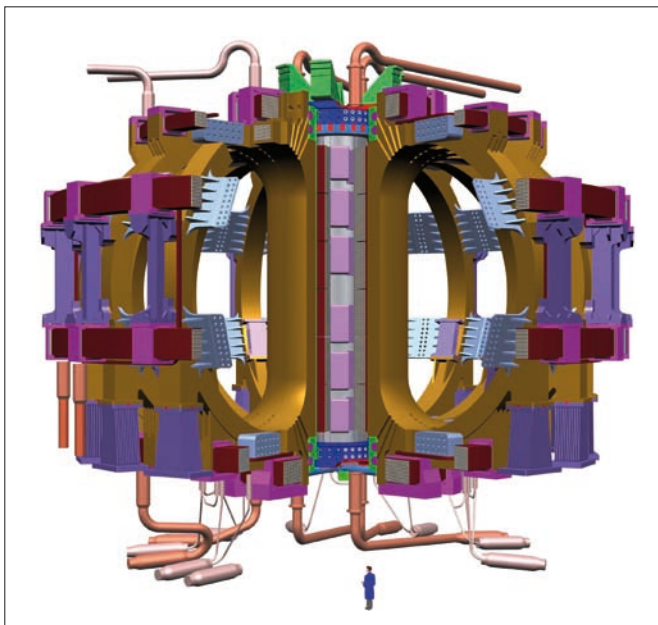
Transport komponent fúzního zařízení ITER z přístavu Berre do sto kilometrů vzdáleného Cadarache bude logistickým oříškem – devět segmentů vakuové komory má hmotnost 600 tun, jedenáct cívek toroidálního pole váží 530 tun. Nejdelsí přepravní komplex bude jedenáct metrů dlouhý. Během stavby bude vypraveno více než dvě stě podobných konvojů. Proto byla zahájena i stavební úprava příjezdové komunikace Iter za 100 milionů eur.

Zkušební provoz

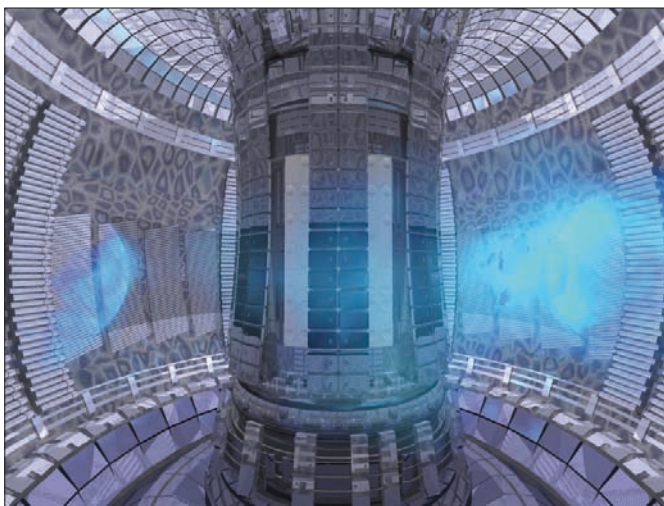
Stavba by měla probíhat šest let. Během prvního roku by se měl reaktor ITER oživit a dalších dvacet let bude probíhat zkušební provoz.

Deset let bude věnováno hledání optimálního scénáře provozu. Další deset let budou probíhat ve čtyřech fázích vlastní experimen-

ty (vodíková fáze, deuteriová fáze /D/ s malým množstvím tritia /T/, DT fáze s nízkým výkonem, DT fáze s vysokým výkonem). Výběr obalu a zkoušky systému umožňujícího vznik tritia budou velmi důležité, stejně jako prověřování chování materiálů při silném neutronovém záření.



Obr. 4. Magnetický systém reaktoru s trubkami kryogenního chlazení; jeho velikost vynikne v porovnání s postavou člověka v popředí (foto: Iter)



Obr. 5. Virtuální vnitřek reaktoru

Teprve po uvedení experimentálního reaktoru ITER do provozu se odborníci dozvědí, jak se stabilní, samočinně se udržující plazma vlastně chová. Bude to totiž první zařízení na světě, ve kterém bude plazma hořet dostatečně dlouho, aby bylo možné zjistit, jak se projeví hromadění vznikajícího helia ve směsi deuteria a tritia na jeho hoření. Rovněž bude třeba posoudit, zda je možné odpad (popel) vznikající při termonukleární reakci odstranit prostřednictvím speciálně navrženého „odsávacího“ zařízení (tzv. *divertéru*), umístěného

ve spodní části reaktoru. Velmi důležité bude vyšetřit chování materiálů bezpečnostní nádrže reaktoru, které jsou vystaveny obrovskému namáhání vlivem teploty a neutronového záření. V rámci provozu experimentálního reaktoru ITER bude rovněž nutné otestovat koncepci získávání (množení) tritia, nezbytného pro zásobování reaktoru z materiálu s vysokým obsahem lithia, ze kterého je vyroben ochranný plášť obklopující plazmu.

V reaktoru ITER je zapotřebí v reálných podmínkách vyzkoušet a otestovat všechny klíčové technologie a procesy nutné pro fungování budoucích elektráren pracujících na bázi termojaderné fúze – včetně supravodivých cívek a magnetů, komponent schopných odolávat vysokému tepelnému namáhání a systému pro dálkové komplexní řízení.

Během provozní fáze musí mezinárodní organizace ITER pečlivě vyhodnotit všechny získané výsledky a zkušenosti a vypracovat také další postup pro průmyslové zvládnutí termojaderné fúze, jenž bude zaměřen zejména na přípravu stavby demonstračního prototypu reaktoru pro termojadernou fúzi DEMO – demonstrační fúzní elektrárny -, který bude umístěn v Japonsku a měl by již být posledním krokem před připojením fúzní elektrárny do průmyslové distribuční sítě a před výrobou fúzní elektrické energie i pro komerční účely.

Likvidace

Experimentální reaktor ITER rozhodně není myšlen jako prototyp reaktoru, který bude dodávat elektrickou energii, ale je výhradně určen pro výzkumné účely a pro testování nových postupů, komponent a materiálů v podmínkách blízkých skutečnému provozu. Jeho provozně zkušební etapa je plánována na dvacet let a potom bude přibližně roku 2040 opět rozebrán.

Za prvních šest let se budou odstraňovat materiály nasycené tritiem, aktivované zkorodované části a radioaktivní prach. Dalších dvacet let se bude hlídat přirozená deaktivace zasažených materiálů. Posledních šest let se bude prostor vyklízet a upravovat. To už bude v provozu reaktor DEMO v Japonsku.

Podrobné informace s mnoha zajímavými obrázky naleznete na webové adrese www.iter.org

[ITER, richtet sich in Cadarache ein. FTE Info, Mai 2006, č. 49, s. 18–21.]