

Experimentální reaktor pro termojadernou fúzi bude v Cadarachu

Ing. Karel Kabeš

Málokterá vědecká událost byla ve světě tak medializována jako uzavření mezinárodní dohody o výstavbě experimentálního reaktoru pro termojadernou fúzi ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), ohlášené v roce 2005. Po dlouhém dohadování mezi Japonskem a Evropou, kde umístit reaktor, padla konečná volba na francouzský region Cadarache (obr. 1), asi 100 km od Avignonu, který prosazovala Evropská unie. Zatímco se v tomto regionu rozebíhala veřejná debata k představení projektu, která musí být podle francouzských zákonů ukončena dříve, než bude uděleno konečné stavební povolení, formují se první mezinárodní vědecké týmy a mezi sedmi partnery mezinárodního projektu probíhají intenzivní konečná jednání. Je to dobrá příležitost k tomu, provést inventuru stavu přípravých prací a vědeckých a technologických požadavků, jejichž splnění stavba experimentálního reaktoru ITER vyžaduje.



Obr. 1. Stanoviště pro vybudování experimentálního reaktoru ITER v Cadarachu (foto: Iter)

Z hlediska nevyhnutelnosti růstu celosvětové poptávky po elektřině, který lze očekávat v druhé polovině a na konci 21. století, je společenská závažnost průmyslového zvládnutí výroby elektrické energie na principu termojaderné fúze velmi dobře známa. Termojaderná fúze je totiž jednou z mála možností, jak v budoucnu získat téměř neomezený zdroj energie, který se nepotýká s problémy s nedostatkem paliva ani s emisemi skleníkových plynů, neprodukuje žádné jaderné odpady, jež by bylo třeba skladovat, ani nehrozí explozí a nekontrolovaným šířením štěpných materiálů, a přitom by mohl převratným způsobem vyřešit energetické dilema, před kterým bude stát lidstvo čítající v té době více než devět miliard obyvatel. Jeho potřebu elektrické energie totiž nemohou pokrýt ani všechny známé obnovitelné zdroje energie, ale ani neekologické a nadto v brzké době vyčerpané světové zásoby fosilních paliv. Spl-

nění prometeovského snu, že člověk ovládne energii Slunce, je sice ještě hodně daleko, ale vybudovat experimentální reaktor jaderné fúze ITER (podle latinského slova iter – cesta) je jedna z cest, která by mohla k tomuto cíli vést.

Trochu historie na úvod

Myšlenka na vybudování společného experimentálního reaktoru jaderné fúze ITER poprvé zazněla na ženevské vrcholné konferenci v listopadu 1985, kde premiér Gorbačov po diskusi s francouzským prezidentem Mitterandem přesvědčil amerického prezidenta Reagana o nutnosti otevřít mezinárodní projekt zaměřený na využití energie termojaderné fúze pro mírové účely. Krátce nato se začal projekt ITER realizovat ve spolupráci tehdejšího Sovětského svazu, USA, Evropského společenství (prostřednictvím Euratomu) a Japonska. V roce 1988 začaly práce na návrhu koncepce a po nich byla v roce 1992 zahájena etapa vypracování technického projektu. Dne 21. července 2001 byl technický projekt experimentálního reaktoru ITER úspěšně dokončen a závěrečná zpráva o projektu byla předána všem zúčastněným partnerům.

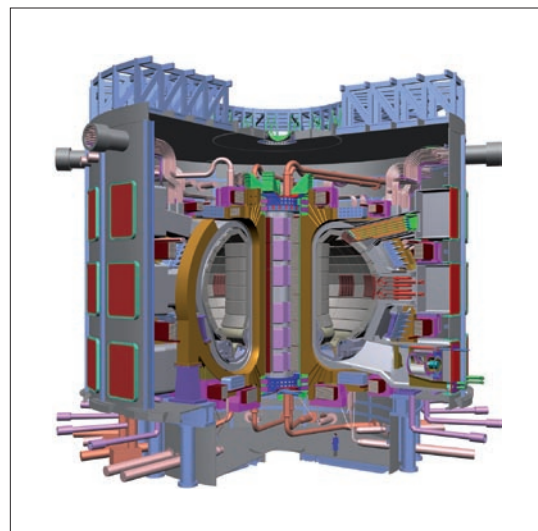
Během všech těchto prací nastalo mnoho změn ve složení účastníků mezinárodního projektu ITER. Po rozpadu Sovětského svazu zaujalo jeho místo v projektu Rusko. USA z projektu v roce 1999 dočasně odstoupily, ale znovu se do mezinárodní spolupráce zapojily v roce 2003, kdy se k účasti připojily také Čína a Jižní Korea. V roce 2005 se mezi účastníky mezinárodního projektu ještě zařadila Indie. V současné době tedy mezinárodní organizace ITER sdružuje sedm partnerů – Evropskou unii, Japonsko, USA, Jižní Koreu, Rusko, Čínu a Indii.

Vhodné místo pro vybudování experimentálního reaktoru ITER se vybíralo několik let a rozhodnuto o něm bylo v roce 2005. V poslední fázi se rozhodovalo mezi japonským Rokkasho-Mura a francouzským Cadarache. Dne 28. června 2005 mezinárodní konsorcium oficiálně oznámilo, že experimentální reaktor ITER bude vybudován v Evropské unii v regionu Cadarache na jihu Francie. Po více než třiceti letech intenzivního výzkumu se tak projekt konečně do-

stal do prováděcí fáze. Nyní vědci očekávají, že jim pomůže zodpovědět mnoho jejich otázek. Nalézt odpovědi na naléhavé otázky jimí vznášené je nejenom pro vědce, ale pro celou dnešní společnost velkým závazkem budoucím generacím.

Ojedinelá mobilizace prostředků a sil

Splnit tento závazek ale vyžaduje mezinárodní mobilizaci finančních prostředků a tvůrčích sil dosud nevídaného rozsahu. Celkové



Obr. 2. Schematický řez experimentálním reaktorem ITER (foto: Iter)

nálkady na stavbu a provoz experimentálního reaktoru, které bude nutné vynaložit během čtyřiceti let, odhadují odborníci na více než deset miliard eur. Zajistit by je měla mezinárodní organizace ITER, která experimentální reaktor postaví a bude provozovat. Sedm současných partnerů zformulovalo zásady pro vytvoření mezinárodní organizace ITER a koncem roku 2006 podepsalo rámcovou mezinárodní dohodu o spolupráci. Ta nyní musí být ratifikována národními parlamenty zúčastněných zemí, aby mohla vstoupit v platnost a nahradit dosavadní řídicí tým odborníků složený ze zástupců všech partnerů. Součástí dohody o umístění reaktoru je odsouhlasené rozhodnutí, že Japonsko obsadí 20 % míst ve vrcholovém managementu mezinárodní organizace ITER včetně funkce generálního ředitele projektu, kterým se stal Kaname Ikeda, dřívější velvyslanec Japonska v Chorvatsku. Hlavním konstruktérem projektu byl jmenován německý vědec Dr. Norbert Holtkamp.

V současné době partneři sestavují rozpočet (tab. 1) a předběžně se již také dohodli na rozdělení nákladů. Téměř 50 % nákladů připadne na Evropskou unii, která se zavázala zajistit zejména výdaje spojené se stavbou zařízení, zatímco na ostatní účastníky projektu

pů vodíku: deuteria a tritia. V roce 1997 se zde podařilo na deset minut spustit fúzní reakci a během ní generovat zhruba dvanáct megawattů energie.

Experimentální zařízení s označením *Tore Supra*, zhotovené ve Francii, bylo prvním vel-

s plazmou stejného druhu jako ITER; s jeho pomocí byly vyvinuty různé způsoby odstínění plazmy, které budou ověřeny na reaktoru ITER. Experimentální zařízení FTU v Itálii umožňuje podrobně studovat intenzivní magnetická pole a zařízení MAST ve Velké

Tab. 1. Náklady na stavbu a provoz experimentálního reaktoru ITER

Etapa	Náklady
stavba včetně vybavení a budov	4 015 mil. eur
V+V a personál	710 mil. eur
provoz reaktoru	4 800 mil. eur
demontáž reaktoru	530 mil. eur
celkem (za 40 let)	10 055 mil. eur

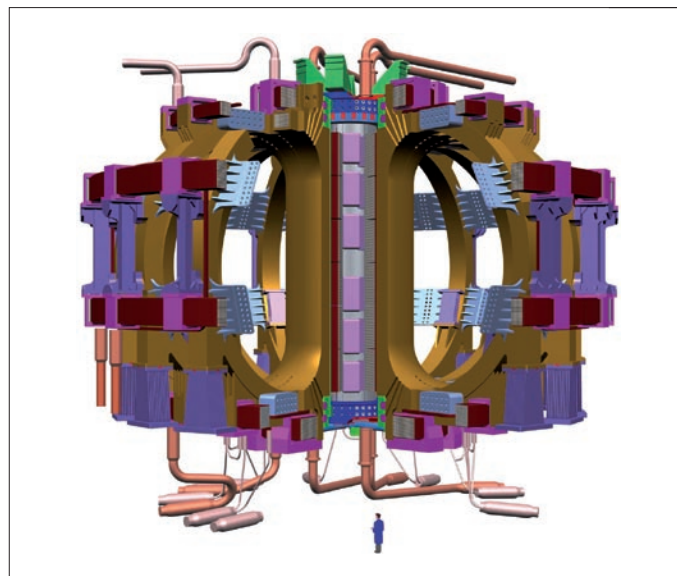
případně zhruba po 10 %. Příspěvky každého ze zúčastněných partnerů budou převážně v podobě dodávek konkrétních komponent mezinárodní pracovní skupině, která z nich bude experimentální reaktor ITER sestavovat. Řízení dodávek bude v každé partnerské zemi zajišťovat k tomu určená agentura. Agentura Evropské unie, která bude řídit a koordinovat evropský podíl na výstavbě experimentálního reaktoru ITER, bude sídlit v Barceloně. Pro dodávky velkých stavebních dílů budou vypsána průhledná výběrová řízení, kterých se budou moci zúčastnit všechny evropské průmyslové podniky.

Stavba experimentálního reaktoru ITER bude trvat několik let. Spadají sem všechny práce – od budování mohutných betonových základů, které mají být po vydání územního rozhodnutí a stavebního povolení postaveny v letech 2008 až 2009, až po uvedení obřího reaktoru do provozu v roce 2016. Pro názornější představu o rozsahu projektu se uvádí, že např. množství kabelů potřebných pro výrobu supravodivých cívek reaktoru odpovídá jejich roční světové produkci.

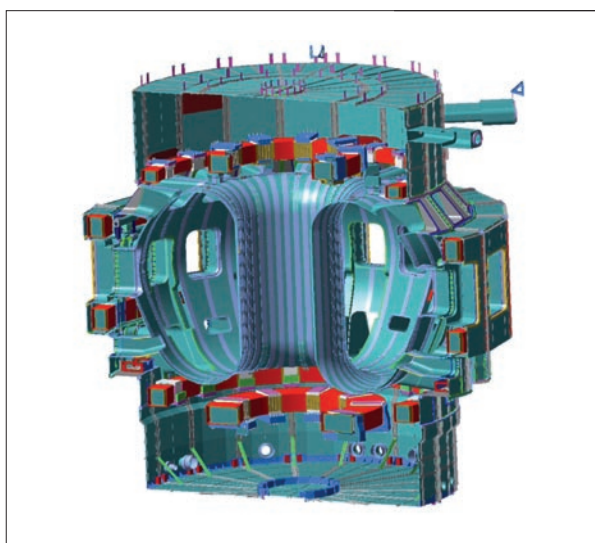
Experimentální reaktor ITER má na co navázat

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.

Evropský program výzkumu termojaderné fúze řídil a koordinoval Euratom. Je účelné si zde některé jeho výsledky připomenout. 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. Tato plazma se skládala ze dvou izoto-



Obr. 3. Magnetický systém reaktoru s trubicemi kryogenického chladiva; jeho velikost vynikne v porovnání s postavou člověka v popředí (foto: Iter)



Obr. 4. Tepelné stínění mezi cívkami a horkými povrchy (foto: Iter)

kým reaktorem (tokamakem), který k odstínění plazmy využívá techniku supravodivých magnetů a specializuje se na výzkum dlouhotrvající vysokoenergetické plazmy. Německý výzkum termojaderné fúze, který je důležitou součástí evropského programu, probíhá ve třech velkých výzkumných zařízeních: v Ústavu pro fyziku plazmatu Maxe Plancka v Garchingu, ve Výzkumném centru Jülich a v Centru pro jaderný výzkum v Karlsruhe. Například experimentální tokamak TEXTOR (*Torus Experiment for Technology Oriented Research*) ve jüličském výzkumném ústavu je určen zejména pro výzkum vzájemného působení mezi plazmou a vnitřními stěnami reaktoru. Zařízení ASDEX Upgrade v Centru pro jaderný výzkum v Karlsruhe pracuje

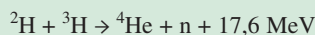
Británii, vyšetřovat potenciál kulového tokamaku apod.

Během projektování experimentálního reaktoru ITER pokračoval intenzivní výzkum především na hlavních pracovištích v lokalitách Garching (Německo), Naka (Japonsko) a Cadarache (Francie) a soustředil se zejména na vývoj prototypů všech klíčových technických komponent, jako jsou supravodivé cívky a magnety, systémy pro dálkovou manipulaci nebo díly s velkou odolností proti vysokým teplotám, a na seriózní ověření jejich výrobitelnosti a připravenosti pro průmyslovou výrobu. Výsledky dosažené ve výzkumných programech mezinárodních partnerů poskytují záruku a potřebné know-how, umožňující přikročit ke stavbě experimentálního re-

Co je termojaderná fúze?

Termojaderná fúze či termonukleární reakce je proces, při němž se spojují jádra lehkých atomů, aby vytvořila těžší jádro (obr. 5). Tento proces, během kterého se uvolňuje velké množství energie, probíhá neustále na Slunci i hvězdách. Vědci se snaží vyvolat termojadernou fúzi na Zemi a udržet ji pod kontrolou, protože v ní vidí jednu z nadějných možností, jak v budoucnu získat téměř neomezený zdroj energie.

Termojadernou fúzi lze nejlépe realizovat jako termonukleární reakci dvou izotopů vodíku známých jako deuterium (^2H) a tritium (^3H). Jejich spojením vznikne helium a neutron a přitom se uvolní velké množství energie podle rovnice (www.wikipedia.org):



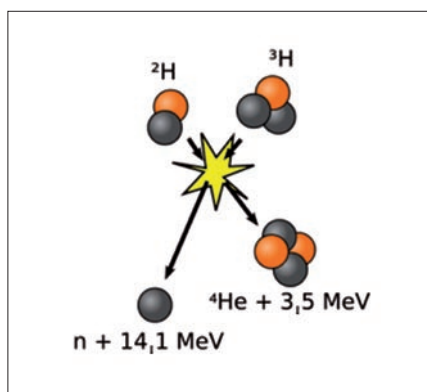
Na první pohled vypadá proces jednoduše, ale technicky ho realizovat není tak snadné. Jádra atomů jsou totiž elektricky kladně nabitá a navzájem se odpuzují. Spojení může nastat jenom tehdy, když je jejich vzdálenost tak nepatrná, že mezi nimi převažují vazebné síly. Oba izotopy vodíku na sebe proto musí dopadat mimořádně velkou rychlostí, přičemž jejich odpudivá síla se překoná teprve při teplotě nad 100 milionů kelvinů. Při tak vysokých teplotách se atomy vodíku rozkládají na své složky, jádra a elektrony. Vzniká silně ionizovaný plyn, který má na rozdíl od běžných plynů velkou elektrickou vodivost a nazývá se plazma. V plazmě se pohybují atomová jádra náhodně a neustále do sebe narážejí. Když na sebe naráží mnoho jader s dostatečnou rychlostí a současně nedochází k přílišnému vyzařování tepla do okolí, začíná vodíková plazma termonukleárně hořet. Potom vytváří nejméně tolik energie, kolik jí je zapotřebí pro její udržení.

Protože by žádný materiál nevydržel přímý kontakt s hořící fúzní plazmou, obvykle obklopuje silné toroidální magnetické pole fúzní palivo, v jehož nitru je teplota až 200 milionů kelvinů a které udržuje plazmu v určité vzdálenosti od stěny nádrže. Přitom se využívají dvě koncepce technického řešení: tokamak (zkratka ruského výrazu „toroidní komora v magnetických cívkách“) a stela-rátor (odvozeno z latinského výrazu stella – hvězda). V hodně používaném a dokonale propracovaném tokamaku se plazma reagujících nuklidů uzavírá toroidním magnetickým polem vytvořeným superpozicí tří složek magnetického pole různého směru a ohřívá se indukovaným elektrickým proudem. V méně rozšířeném stela-rátoru se k uzavření plazmy používá magnetické pole s technicky jen obtížně realizovatelnou strukturou.

aktoru ITER a učinit další rozhodující krok pro průmyslové využití energie řízené termonukleární fúze.

Hlavní úkoly a cíle experimentálního reaktoru ITER

Mezinárodní vědecké společenství dospělo k názoru, že je třeba přestat dílčí problémy termojaderné fúze zkoumat odděleně ve specializovaných zařízeních a naopak začít všechny problémy řešit komplexně v jednom společném zařízení, v experimentálním reaktoru ITER, kde se sloučí a využijí všechny dosavadní výsledky výzkumu a technologie zúčastněných partnerů. Rozhodnutí o výstavbě společného experimentálního reaktoru



Obr. 5. Termonukleární reakce mezi dvěma izotopy vodíku – deuteriem a tritiem (zdroj: Wikipedia)

ITER tak představuje významný kvalitativní skok ve výzkumu termojaderné fúze a jejím využití v reálných provozních podmínkách.

Experimentální reaktor ITER je založen na koncepci tokamaku, ve kterém silné toroidní magnetické pole uzavírá horkou plazmu v nádobě ve tvaru anuloidu. Jeho hlavním úkolem je poprvé na světě vyrobit magneticky odstíněnou a trvale se udržující, stabilní plazmu 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. Ale tato fúze se udrží, jen je-li udržována dostatečně vysoká teplota plazmy a s využitím energeticky náročných opatření je magneticky dokonale odstíněna. Je-li $Q < 1$, znamená to, že je k ohřevu plazmy třeba dodat víc energie, než kolik jí vzniká při fúzi. Provoz je rentabilní teprve od okamžiku, kdy se plazma sama udrží, tzn. když většina energie pro ohřívání plazmy 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. 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.

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 jejím 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 systémů pro dálkové komplexní řízení.

A co bude dál?

Experimentální reaktor ITER rozhodně není myšlen jako prototyp reaktoru, který bude dodávat elektrickou energii, ale je určen výhradně pro výzkumné účely a pro testování nových postupů, komponent a materiálů v podmínkách blízkých skutečnému provozu. Jeho provozní fáze je plánována na dvacet let a potom bude přibližně roku 2040 opět rozebrán. 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, který bude umístěn v Japonsku a měl by již vyrábět elektrickou energii i pro komerční účely. Podrobné informace s mnoha zajímavými obrázky naleznou zájemci na webově adrese www.iter.org

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