

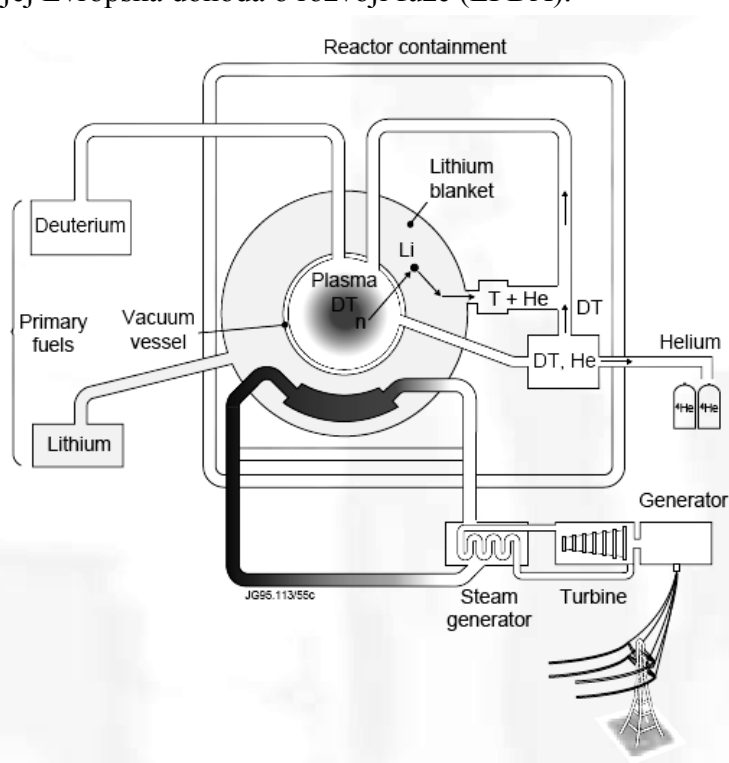
Výzkumné zařízení JET

Martin Přeček*, *Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT v Praze*

V říjnu 2005 jsem měl možnost navštívit v britském Culhamu nedaleko Oxfordu středisko se zatím největším zařízením pro výzkum řízené termojaderné fúze na světě – JET. Na následujících řádcích stručně popíšu hlavní technické aspekty tohoto zařízení, ale jinak všem čtenářům doporučuji stránky www.jet.efda.org, na kterých se dozví mnohem více. Zkratka JET označuje Joint European Torus, tedy v překladu Sdružený evropský torus. Nejdůležitějším prvkem zařízení je totiž „tokamak“ – nádoba tvaru toroidu (či jinak anuloidu nebo laicky pneumatiky) obmotaná cívkami, které vytváří magnetické pole sloužící k udržení vysokoteplotního plazmatu (plynu kladných iontů a elektronů). Výzkumné středisko spravuje Komise pro atomovou energii Spojeného království (UKAEA), nicméně výzkumu zde se účastní vědci z celé Evropy (i z Česka) a zastřešuje jej Evropská dohoda o rozvoji fúze (EFDA).

Výzkum termojaderné fúze směřuje k mírovému využití jaderné energie, která se uvolňuje při slučování (fúzi) lehkých atomových jader (prozatím do úvahy připadají lehký vodík – protium ^1H , těžký vodík – deuterium ^2H označované D, velmi těžký vodík – tritium ^3H značený jako T, lehké helium ^3He , izotopy lithia ^6Li a boru ^{11}B). Technologicky nejnáze dosažitelnou je tzv. D-T fúze, kterou popisuje termojaderná reakce: $\text{D} + \text{T} \rightarrow ^4\text{He} + \text{n}$. Asi 80 % energie z této reakce odnáší nenabíý neutron. Jedná se o velmi energetickou reakci, energie reakce 1 kilogramu směsi D+T je rovna teplu uvolněného spálením 8 milionů litrů kvalitního benzínu. Zatímco deuteria je v přírodě velmi hodně (asi 1 kg deuteria je v každých 60 tunách obyčejné vody, což je množství, jež proteče za necelou sekundu řekou Vltavou v Praze), tritium je radioaktivní o poločasu 12,3 let, a tudíž se vyskytuje v přírodě jen ve stopových koncentracích. Proto jej fúzní elektrárna bude muset sama vyrábět reakcí vzniklých neutronů s lithiem: $\text{n} + ^6\text{Li} \rightarrow \text{T} + ^4\text{He}$, jehož zásoby jsou dostatečně hojné.

Přestože termojaderná puma byla funkčně otestována již v roce 1952, pouhých sedm let po vyzkoušení (a použití) první štěpné jaderné zbraně, nestojí zatím žádné fúzní elektrárny, zatímco štěpné elektrárny již fungují přes půl století. Příčinou tohoto rozdílného stavu jsou odlišné fyzikální podmínky, za kterých je možné tyto rozdílné jaderné reakce provozovat. Zatímco štěpné reakce probíhají v relativně širokém rozsahu teplot a tlaků zahrnujících normální pozemské podmínky, k fúzním reakcím dochází pouze při extrémně vysokých teplotách anebo tlacích (hustotách). V přírodě probíhají fúzní reakce například ve středu hvězd a v případě



Přestože termojaderná puma byla funkčně otestována již v roce 1952, pouhých sedm let po vyzkoušení (a použití) první štěpné jaderné zbraně, nestojí zatím žádné fúzní elektrárny, zatímco štěpné elektrárny již fungují přes půl století. Příčinou tohoto rozdílného stavu jsou odlišné fyzikální podmínky, za kterých je možné tyto rozdílné jaderné reakce provozovat. Zatímco štěpné reakce probíhají v relativně širokém rozsahu teplot a tlaků zahrnujících normální pozemské podmínky, k fúzním reakcím dochází pouze při extrémně vysokých teplotách anebo tlacích (hustotách). V přírodě probíhají fúzní reakce například ve středu hvězd a v případě

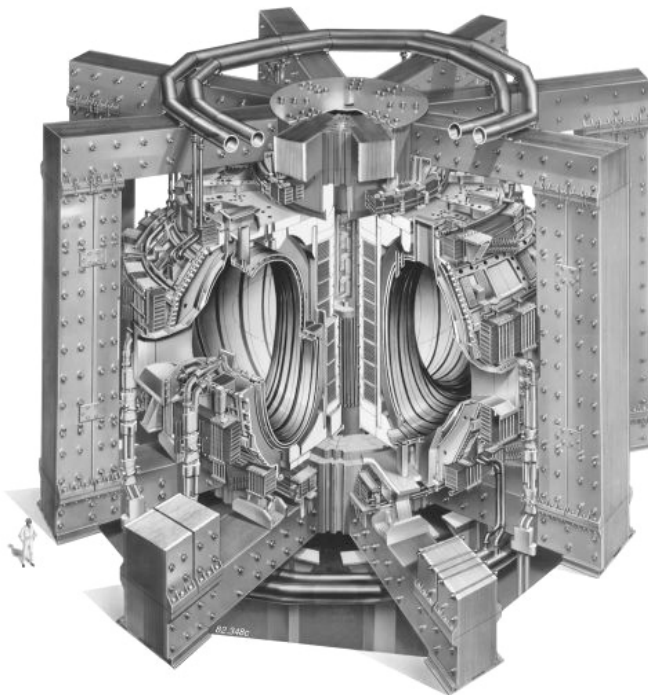
* MARTIN@PRECEK.cz

našeho Slunce je jeho vnitřní teplota asi 15 milionů kelvinů při hustotě 130 kilogramů na jeden litr. Naše civilizace zatím není schopna účinně reprodukovat tyto podmínky po dobu dostatečně dlouhou k zužitkování energie, jež se z hmoty v tomto stavu uvolňuje. Nicméně během posledního půlstoletí byl učiněn velký pokrok při vývoji fúzní technologie.

Udržení podmínek po dobu dostatečnou k účinnému průběhu reakce je klíčovým problémem ve výzkumu termojaderné fúze. Byly přijaty dva druhy přístupu k této problematice. První přístup spočívá v tzv. inerciálním (setrvačném) udržení plazmatu. Ten dosahuje termojaderné fúze pomocí prudkého stlačení a zahřátí malého množství deuteria a tritia rázovou vlnou výbuchu obálky, v níž jsou oba izotopy vodíku umístěny. Výbuch je vytvořen intenzivním impulzem energie (většinou využívány vysokovýkonové laserové svazky) soustředěným ze všech stran na malou kapsli s termojaderným palivem. Tento přístup dosahuje velmi vysokých teplot a hustot, které v nejnovějších experimentech postačují ke „spálení“ několika procent původně přítomného deuteria a tritia. Přestože v relativní části spáleného paliva je tento přístup úspěšný, není příliš spojován s budoucím využitím v energetice.

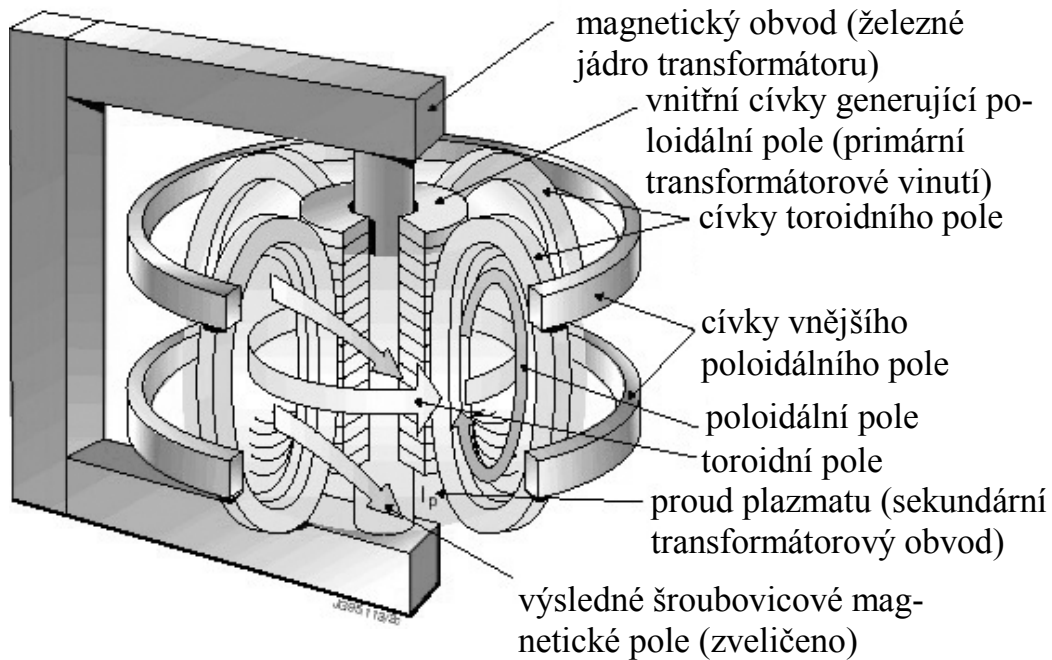
Druhý způsob využívá tzv. magnetického udržení. Plazma je složeno z nabitých částic, jež díky svému náboji nemohou prostupovat kolmo na siločáry dostatečně intenzivního magnetického pole. Jeden z nevhodnějších tvarů magnetického pole pro takové udržení je právě toroid či jeho mírně deformované podoby. V tomto uspořádání jsou totiž všechny siločáry magnetického pole uzavřené, a pokud by nedocházelo k dalším jevům (ono k nim totiž bohužel dochází), plazma by z magnetické „nádoby“ nemohlo uniknout. Kromě původně ruského „tokamaku“ (v překladu z ruštiny „toroidální komora v magnetických cívkách“) existuje ještě „stelarátor“ původem z USA. Přes některé výhody stelarátorů jsou však pro výzkum fúzní energetiky uvažovány zatím spíše tokamaky kvůli své větší flexibilitě. V tokamaku lze principiálně dosáhnout udržení stálé kontrolovatelné termojaderné reakce, čímž se pravděpodobně hodí pro energetiku více než impulzní metody, které jsou však o něco napřed na cestě k procesu, ze kterého se uvolní více energie, než se spotřebuje.

Hlavní parametry, kterými je možné popsat tokamak JET, jsou jeho rozměry. Toroidální nádoba je 4,2 metrů vysoká a má 6 metrů v průměru, přičemž průřez tubusem není kruhový, ale ve tvaru D – tzv. poloidální (půlměsíčkový), o svislém průřezu 4,2 metry a vodorovném 2,5 metru. Nádobu vodorovně obepíná 32 měděných cívek tvaru D, vytvářejících základní toroidální pole. Strukturu však dominuje 8 ohromných sružených železných rámu, v nichž je jako v kleci uvězněna nádoba i s cívkami. Rámy tvoří transformátorové jádro pro první ze systémů pro ohřev plazmatu. Cívka primárního vinutí je obtočená okolo sružené „nohy“ rámu, kterou prochází svislá středová osa celého zařízení. Sekundárním vinutím transformátoru je vodivé plazma samotné. Indukované proudy produkované tímto systémem vytváří tzv. poloidální magnetické pole a dosahují několika milionů ampér, kdy se začne citelně projevovat tepelná energie produkovaná ohmickým odporem plazmatu. Poslední skupina šesti cívek vodorovně obtáčí nádobu a slouží k úpravě a stabilizaci tvaru výsledného helikálního (šroubovitého) pole.



toroidální pole. Strukturu však dominuje 8 ohromných sružených železných rámu, v nichž je jako v kleci uvězněna nádoba i s cívkami. Rámy tvoří transformátorové jádro pro první ze systémů pro ohřev plazmatu. Cívka primárního vinutí je obtočená okolo sružené „nohy“ rámu, kterou prochází svislá středová osa celého zařízení. Sekundárním vinutím transformátoru je vodivé plazma samotné. Indukované proudy produkované tímto systémem vytváří tzv. poloidální magnetické pole a dosahují několika milionů ampér, kdy se začne citelně projevovat tepelná energie produkovaná ohmickým odporem plazmatu. Poslední skupina šesti cívek vodorovně obtáčí nádobu a slouží k úpravě a stabilizaci tvaru výsledného helikálního (šroubovitého) pole.

Na dně nádoby se nachází nejzajímavější část JET – tzv. divertor, který slouží k odběru „spalin“ termojaderné reakce, které by ji jinak „uhasily“, a tudíž je pro vývoj kontinuálně pracující termojaderné elektrárny nepostradatelný.



Kovová vakuová nádoba je zevnitř pokrytá zvláštními bloky tvořenými převážně uhlíkem, které však na povrchu v kontaktu s plazmatem mají vrstvičku berylia. Berylium je prvek s nejnižším protonovým číslem, který již je jako kov použitelný pro konstrukční účely. Právě berylium a uhlík se vyznačují nízkými protonovými čísly ($Z = 4$, resp. 6), což je nesmírně důležité pro snadné udržování plazmatického výboje po delší dobu. Kontaktem plazmatu se stěnami nádoby se povrchové části zplyní, ionizují, a stávají se tak jeho součástí. Atomová jádra s vysokým protonovým číslem však plazma výrazně ochlazují, proto je přítomnost jim příslušných chemických prvků ve vnitřním pokrytí nádoby nežádoucí. Berylium je navíc důležité pro množení počtu neutronů vzniklých termojadernými reakcemi. Jadernou reakcí berylia s rychlým neutronem (${}^9\text{Be} + n \rightarrow 2\text{}^4\text{He} + 2n$) vznikají kromě dvou jader helia dva rychlé neutrony. V budoucnosti uvažované termojaderné elektrárně bude tedy docházet ke zvyšování neutronového toku procházejícího beryliem, aby množství neutrony vyprodukovaného tritia bylo stejné jako množství, které se spotřebuje v termojaderných reakcích s deuteriem (pokud totiž uvažujeme ztráty neutronů absorpcí, pak by byla produkce tritia v lithiovém blanketu bez berylia nedostatečná, v současnosti mimochodem tritium v dostatečném množství pro pokusy s fúzí i pro jiné účely produkují kanadské těžkovodní štěpné jaderné reaktory CANDU zachytem neutronů na deuteriu v těžké vodě D_2O). Protože berylium je velmi toxický prvek a v průběhu fúzní reakce dochází k aktivaci komponent zařízení, byl vyvinut dálkově ovládaný robotický systém pro manipulaci s komponentami uvnitř nádoby.

Plazma uvnitř nádoby je třeba zahřívat na velmi vysoké teploty. K tomu slouží celkem tři systémy. Prvním je již zmíněný ohřev transformátorovým proudem, druhým je ohřev pomocí mikrovln generovaných radiofrekvenčním rezonátorem (jako v mikrovlnné troubě) a třetí spočívá v bombardování plazmatu urychlenými neutrálními atomy (kladné protony z urychlovače se neutralizují zachytem elektronu při průchodu neutrálním plynem a jsou vstřelovány přímo do nádoby). Kinetická energie vodíkových atomů je vyšší než střední energie nabitých

částic v plazmatu, takže následnými srážkami zvyšují teplotu plazmatu. Chlazení celého zařízení zajišťuje voda.

Všechny systémy zařízení JET spotřebují velké množství energie. Při průběhu jednoho pulzu – jednoho nejvýše minutového pokusu s plazmatem – je potřeba elektrický příkon asi 500 MW (špičkově až 1 000 MW, což je výkon jednoho bloku v jaderné elektrárně Temelín). Z toho asi polovinu spotřebují měděné cívky toroidálního pole, okolo 100 MW je třeba na poloidální pole (ohmický ohřev a tvarování plazmatu) a dalších 150 MW vyžadují dodatečné ohřívací systémy (urychlené neutrální atomy a radiofrekvenční ohřev). Velká část areálu výzkumného střediska je proto pokryta zařízeními umožňujícími kumulaci, distribuci a transformaci elektrické energie. Je zde velká budova se dvěma elektromechanickými setrvačníky, ohromnými devítimetrovými železnými kolesy o hmotnosti 775 tun, které při „nabitém“ stavu rotují 225krát za minutu. Dále je zde budova s kapacitory – skladovači rozdělených nábojů – a navíc dvě transformátorové stanice pro příjem proudu z národní elektrické sítě (5 kilometrů od JET se nachází obří uhelno-plynová elektrárna Didcot o souhrnném výkonu 3 200 MW). V JET bylo v roce 1997 dosaženo zatím rekordních 16 MW fúzního výkonu, což v poměru k přímému energetickému příkonu do plazmatu 25 MW tvoří 64 % a naznačuje budoucí dosažení bodu soběstačnosti, kdy již plazma vyprodukuje více energie, než se do něj vloží. Většina obřích energetické nároků je však nepřímá a nesouvisí přímo s plazmatem, především je způsobuje užití měděných cívek s relativně velkým odporem. Ve francouzském tokamaku Tore Supra jsou cívky supravodivé a celkové energetické nároky tudíž řádově nižší.

V současnosti směřuje mezinárodní výzkum ke stavbě experimentálního reaktoru ITER ve francouzské Cadarache. V tomto reaktoru budou sloučeny špičkové technologie z předních fúzních experimentů jako Tore Supra (supravodivé cívky, aktivní chlazení stěn nádoby) i z britského JET (divertor, systémy ohřevu, dálková manipulace). Podle plánů dosáhne fúzní výkon v plazmatu 500 tepelných MW při asi 100 MW příkonu, takže vyprodukuje 5krát více energie, než se do něj vloží. Dobu udržení plazmatu zatím odhadují konstruktéři až na desítky minut (v poměru k současné 1 minutě v zařízení JET). Nicméně ani ITER ještě nebude fúzní elektrárnou, tou bude až demonstrační projekt s pracovním názvem DEMO a jeho první prototypový komerční následník PROTO. Odhadovaný časový horizont pro zprovoznění komerční fúzní energetiky je tedy rok 2050. Ještě asi půl století tedy fúzní energetika potřebuje ke svému zprovoznění a právě experimentální zařízení JET odvedlo a ještě odvede velký kus práce vedoucí k tomuto okamžiku.