

Princip tokamaku

Ondřej Kudláček
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Břehová 7
115 19
Praha 1
KudlacekO@seznam.cz

Abstrakt

V příspěvku se zabývám principem tokamaku, tedy pravděpodobně i principem budoucí termojaderné elektrárny. Chtěl bych zde sdělit základní poznatky o udržení plazmatu, ohřevu plazmatu a také o tom, jak bude fungovat palivový cyklus v budoucí termojaderné elektrárně.

1 Úvod

V současné době roste po celém světě hlad po energii. Během 50 let by při zachování současných trendů měly být vyčerpány veškeré zásoby ropy a zemního plynu. Zásoby uhlí a uranu se budou již také povážlivě tenčit. Alternativní zdroje energie nemohou ve většině zemí pokrýt dominantní část spotřeby. Proto musí lidstvo najít zcela nový zdroj energie. Jednou z možností je zvládnutí řízené termojaderné fúze. Zatím se jeví jako nejlepší cesta k úspěchu zařízení zvané tokamak. Právě o jeho principu bude pojednávat následující článek.

2 Udržení plazmatu

Tokamak je jedno ze zařízení, které plazma udržuje v uzavřené nádobě. Tato uzavřená nádoba v podstatě vypadá jako více či méně deformovaná nafouknutá pneumatika. Částice jsou v ní drženy magnetickým polem. Indukční čára magnetického pole přitom vůbec neopouští magnetickou nádobu. To zajišťuje především hlavní pole vytvářené vnějšími cívkami. Toto pole se nazývá toroidální. Nabitá částice by tedy teoreticky nikdy neměla opustit magnetickou nádobu. Jenže díky srážkám mezi částicemi, místní nehomogenitě magnetického pole a odstředivé síle může částice opustit prostor, ve kterém ji chceme mít.

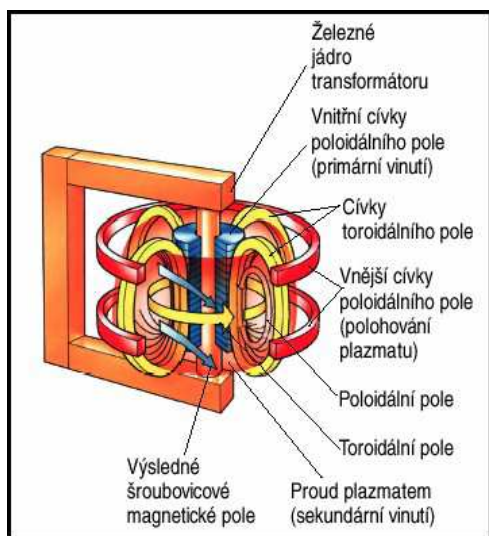
Jako velice účinný způsob omezení tohoto úniku se ukázalo vytvoření dalšího magnetického pole okolo plazmatu (viz Obr. 1). Toto pole se nazývá poloidální. Způsob vytvoření poloidálního pole spočívá v tom, že v plazmatu indukujeme elektrický proud. Druhou možností je vytvoření tohoto pole pomocí vnějších cívek. Prvním způsobem vytváří poloidální pole tokamak. Pokud poloidální pole složíme s polem toroidálním, dostaneme magnetické pole ve tvaru šroubovice. V důsledku působení tohoto magnetického pole se částice při každém průletu okolo celé nádoby posune o kousek dále po poloidálním průřezu. Jak se částice posouvá v poloidálním řezu po kružnici čím dál více k vnitřnímu okraji nádoby, dochází ke zhuštění magnetických siločar, jak je vidět na obrázku 1. Právě proto musí částice rychleji rotovat kolem své magnetické indukční čáry a jejich příčná energie se zvyšuje na úkor energie podélné. Některé částice mají podélnou energii natolik nízkou, že nejsou schopny proletět okolo celé nádoby, v určitém místě se otočí a opisují trajektorii, jejíž průmět do roviny je podobný banánu, která se právě díky svému tvaru nazývá banánová trajektorie. Pokud se částice, která opisuje banánovou trajektorii, čelně srazí s jinou částicí, dostane se na „sousední“ banánovou trajektorii. Tento posun tvoří až několik desítek centimetrů, takže se částice může dostat až do okrajové části magnetické nádoby. V okrajové části jí musí být zabráněno v nárazu do hmotné stěny nádoby a proto je jí zabráněno i v dalším pohybu. O tom jak pojednává článek dále. Díky tomu je jí ale zabráněno účastnit se další fúzní reakce, což je nežádoucí. Mimoto odnese částice i svou energii a způsobí tak i ztráty tepelné.

Toroidální pole je vytvářeno vnějšími cívkami. Tyto cívky budou v budoucnu supravodivé. Magnetická indukce uvnitř magnetické nádoby musí být několik tesla. Mimo cívek toroidálních se v tokamaku nacházejí ještě cívky poloidální. Může se zdát, že při této konfiguraci magnetického pole je problém udržení plazmatu již v podstatě vyřešen. Opak je

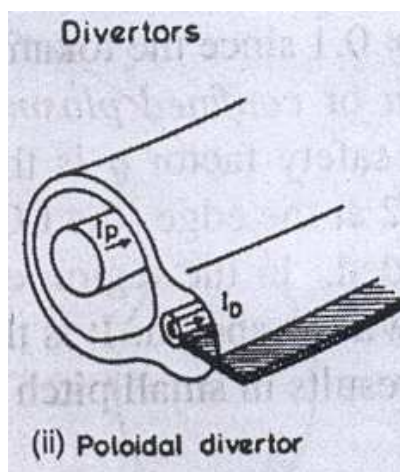
ale pravdou. V tomto ohledu panuje řada záhad a nedořešeností. První záhadou je, že tokamak může ztrácet energii ve dvou ztrátových módech. Prvním je L-mod, druhým je H-mod. H-mod se vyznačuje lepším udržením částic i energie. Plazma ztrácí energii nejdříve v L-modu a poté, co mu dodáme určité množství energie, začne ztrácet energii v H-modu. Existuje řada nestabilních fyzikálních jevů, vedoucích k náhlé poruše udržení, které je do budoucna nutné zvládnout. Jde např. o takzvané ELM (edge localized modes), které s určitou frekvencí vyvrhují z plazmatu částice na stěnu nádoby. Tyto módy mohou vyvrhnout s částicemi až 10 % vnitřní energie plazmatu. Tyto pulzní jevy negativně působí na stěnu komory a samozřejmě také na průběh reakce (ochlazují plazma). Tyto ELMy však není dobré (a pravděpodobně ani možné) úplně odstranit. V budoucnu totiž pravděpodobně půjde o nejlepší způsob, jak odvádět z plazmatu „kouř“ v podobě vzniklého helia. ELMy nejsou jedinými nestabilitami. Jejich popis je v tomto článku velice stručný a slouží hlavně pro lepší představu o složitosti problematiky. Právě v nepředvídatelném chování plazmatu lze hledat hlavní důvod dosavadního nenaplnění snu o termojaderné elektrárně. Chování plazmatu dnes zaměstnává řadu odborníků a dodnes v něm není jasno. Proto přejdu k dalšímu tématu.

Díky magnetickým poruchám a difúzi se některé částice mohou dostat blízko okrajů nádoby. Je však nutné zabránit dotyku horkého plazmatu se stěnami nádoby. Je třeba si uvědomit, že rychlost pohybu v toroidálním směru je mnohonásobně větší, než rychlost pohybu napříč magnetickými siločarami (tj. difúze). Částice, která se dostane do okrajové zóny plazmatu, proto nejdříve obletí mnohokrát nádobu kolem dokola a až po delší době narazí do stěny. Částice, které se pohybují v „zakázané zóně“, je tedy nutné buďto odklonit do určitého místa a nebo jim postavit do cesty nějakou překážku. Zařízení, které odklání částice se nazývá divertor. Druhý typ zařízení se nazývá limiter. Divertor je zařízení, které pracuje s vlastním magnetickým polem. Magnetické pole divertoru působí na okraji plazmatu opačným směrem, než magnetické pole tokamaku. Magnetické pole divertoru se složí s magnetickým polem tokamaku. Za určitým magnetickým povrchem (tzn. separatrix) se již indukční čáry neuzavírají, nýbrž navedou částice mimo magnetickou nádobu do prostoru divertoru. Nakonec narazí do míst, jejichž konstrukce je tomu uzpůsobena. Existují tři základní možnosti, jak divertor konstruovat. Jako nejlepší možnost se jeví konstrukce tzn. poloidálního divertoru (viz. Obr. 2).

Limiter je zařízení, které zabránil pronikání částic ke stěně komory tím, že jim postaví do cesty hmotnou překážku. Tato překážka musí být vyrobena z materiálu, který se v důsledku nárazů částic nedostane do plazmatu. To by znamenalo nežádoucí příměs a tím pádem velké ztráty energie. Teploty, které jsou v okrajových částech plazmatu, není schopen vydržet žádný doposud známý materiál. Právě proto musí být limiter intenzivně chlazen. K tomu se obvykle používá demineralizovaná voda. Limiter i při nejdokonalejší konstrukci emituje do plazmatu příměs. Právě proto bude na nových velkých tokamacích použit divertor.



Obr. 1



Obr. 2

3 Ohřev plazmatu

Termojaderná reakce probíhá nejrychleji při teplotách okolo 50 keV. V současnosti je problém s ohřevem plazmatu v tokamacích na tuto teplotu již v podstatě vyřešen. Ohřev se skládá z ohřevu ohmického a z ohřevu dodatečného. Ohmický ohřev zajišťuje proud plazmatem indukovaný pomocí transformátoru. Odpor plazmatu se však díky stále zvyšující se teplotě blíží k nule avšak proud plazmatem se nezvyšuje, protože nemáme dostatečně výkonný zdroj, který by mohl dávat proud jdoucí k nekonečnu. Z tohoto důvodu je další proudový ohřev neúčinný. Proudovým ohřevem dosahují největší tokamaky (JET) teploty přibližně 5 keV. To je však stále málo.

Proto nastupuje ohřev dodatečný (sekundární). Ten se skládá jednak z antén, které ohřívají plazma elektromagnetickými vlnami (některé mohou mít výkon až několik MW), jednak z urychlovačů neutrálních částic. U vlnového ohřevu závisí na volbě vlnové délky. Lze tím totiž ovlivnit, jaká část plazmatu bude ohřána. Zařízení na urychlování neutrálních částic není jednoduché. Není totiž možné urychlit neutrální částici na vysokou energii. Právě proto je částice nejdříve ionizována, poté urychlena a před vletem do plazmatu opět neutralizována. To proto, že nabitou částici by magnetické pole plazmatu otočilo zpět a částice by neohřála plazma nýbrž zničila stěnu. Toto zařízení dodává např. na JETu částice s energií 200 keV, na ITER se počítá s energiemi kolem 1 MeV.

4 Palivový cyklus

Palivo v budoucí termojaderné elektrárně bude tvořit směs deuteria a tritia. V dnešních tokamacích je však zkoumáno především udržení plazmatu, a navíc drtivá většina z nich nemá nejmenší šanci přiblížit se k termojaderným teplotám. Proto se používá pouze obyčejný vodík, který je očištěn od příměsí. Velká zařízení používají směs deuteria. Vznikají v nich již díky reakci D-D neutrony, nicméně o žádném velkém energetickém zisku se zde vůbec nedá hovořit (účinnost oproti D-T reakci je cca 200x menší). Směs deuteria a tritia byla zatím použita pouze ve dvou tokamacích: Prvním je evropský tokamak JET, který krátkodobě produkoval fúzním procesem 65% dodávané energie. Druhým, dnes již demontovaným, byl TFTR (USA), který vyprodukoval 25% dodávané energie. I přes malé množství takových experimentálních zařízení je palivový cyklus budoucí termojaderné elektrárny již z velké části vyřešen. Částice deuteria, existujícího všude tam, kde existuje vodík, jsou do plazmatu vstříkovány jako jeden ze způsobů ohřevu, jak bylo již popsáno výše. Tritium je vyráběno přímo v reaktoru. Používá se k tomu lithium. To bude umístěno bezprostředně za stěnami komory. Při reakci deuteria a tritia vzniká neutron, kterému magnetické pole nijak nebrání v opuštění magnetické nádoby. Pokud neutron splyne s ${}^6\text{Li}$, vznikne helium a tritium. Pokud neutron splyne s druhým izotopem lithia, ${}^7\text{Li}$, vznikne helium, tritium a další neutron. Ten se pak účastní další reakce. Poměr ${}^6\text{Li}$ a ${}^7\text{Li}$ bude stanoven tak, aby vznikalo dostatečné množství tritia pro zásobování reaktoru. Uvažuje se o tom, že bude lithium umístěno ve slitině. Pokud tomu tak bude, tak po nárazu neutronu tritium a helium vytvoří ve slitině jakousi mikroskopickou bublinku. Později je slitina přetavena a tyto bublinky z ní uniknou. Helium je následně odděleno od tritia. Tritium je na závěr celého procesu dodáno do plazmatu.

5 Závěr

V tomto příspěvku jsem uvedl základní principy, na kterých tokamak pracuje. Nejbližší desetiletí rozhodnou o tom, zda se na tomto principu skutečně podaří postavit termojadernou elektrárnu. Velice důležitým projektem bude tokamak ITER, který se dnes začíná stavět ve Francii (Cadarache). Ten odpoví na otázku, zda jsme již na dostatečné technologické úrovni ke stavbě termojaderného reaktoru. Pokud bude odpověď ano, měly by první komerční termojaderné elektrárny dodávat elektřinu okolo roku 2050.

6 Reference

- [1] J. W. Conner, A review of models for ELMs, *Plasma Phys. Control. Fusion* **40** (1998) 191–213
- [2] J. H. C. Maple, JET and industry, Joint Public Relations Section, Culham 1987
- [3] G. Navratil: Introduction to burning plasma physics, American Physical Society, New York 2001
- [4] M. Řípa, V. Weinzettl, J. Mlynář, F. Žáček, Řízená termojaderná fúze pro každého, Tiskový servis Viener, Praha 2004
- [5] L. C. Smith, Annual report of the EURATOM/UKAEA fusion programme 2003/2004, Joint Public Relations Section, Culham 2005