TOKAMAK - princip činnosti

Základem TOKAMAKu je vakuová komora, v níž se vlivem extrémně vysokých teplot a tlaků vodík tvořící palivo stává plazmou, tedy vysoce ionizovaným horkým plynem. Tento plyn, který má téměř milionkrát nižší hustotu ve srovnání s běžným vzduchem, obsahuje jak kladně nabitá jádra atomů tak záporně nabité elektrony. Tak fyzikové a technologové simulují fúzní reakci, která probíhá v nitrech hvězd. Při této reakci se lehká jádra spojují do těžších jader za uvolnění energie.

Energie, která se tímto způsobem uvolní, je rozdíl vazebné energie jader vstupujících a vystupujících z reakce.

Nabité částice tvořící plazmat jsou formovány do požadovaného tvaru a kontrolovány pomocí silného magnetického pole vznikajícího v obřích cívkách umístěných kolem nádoby tokamaku. Pomocí magnetického pole je horké plazma udržováno ve správné vzdálenosti od stěn nádoby.

Při interakci horkého plazmatu a stěny nádoby by materiál stěny tak velkou teplotu, kterou plazma má, nevydržel a nádoba by se roztavila.

Před začátkem celého procesu jsou z komory odčerpány vzduch a veškeré nečistoty. Poté jsou zapojeny cívky vytvářející magnetické pole udržující plazmat uvnitř vakuové komory a až poté je dovnitř komory přivedeno palivo. Vzhledem k tomu, že se jedná o nabité částice, pohybují se uvnitř nádoby pod vlivem magnetického pole a vytvářejí tak poměrně silný elektrický proud. Částice se pohybují ve směru magnetických indukčních čar poměrně komplikovaného magnetického pole uvnitř vakuové nádoby.

Pohyb částic uvnitř nádoby lze považovat za elektrický proud proto, že částice jsou nabité. A pokud se nabité částice pohybují, hovoříme o elektrickém proudu.

Elektrický proud uvnitř nádoby tvoří vlastně závit cívky - nabité částice plazmatu se tedy pohybují po magnetických indukčních čarách.

Jako palivo se ve fúzním reaktoru používají izotopy vodíku: deuterium $^{2}_{1}\mathrm{H}$ a tritium $^{3}_{1}\mathrm{H}$. Ačkoli by bylo možné spustit fúzní reakce i s jinými jádry malých hmotností, reakce deuterium - tritium je nejefektivnější. Tato reakce produkuje jádro helia, které má větší hmotnost než izotopy vodíku, a neutron: $^{2}_{1}\mathrm{H} - ^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} - \mathrm{n}$. Při této reakci se uvolní energie 17,59 MeV.

V každém okamžiku se nachází v plazmatu palivo o hmotnosti pouze několika gramů.

Na první pohled se to může zdát divné a zdánlivě odporovat zákonu zachování hmotnosti, ale je nutné si uvědomit, že při reakci se uvolňuje také energie. A na tu lze (díky Einsteinovu vztahu mezi hmotností a energií) pohlížet jako na hmotnost. Takže zákon zachování hmotnosti či zákon zachování energie jsou splněny.

Výše popsaná reakce je stejná, jaká probíhá i v jádru Slunce při teplotách $15 \cdot 10^{6}\ ^{\circ}\mathrm{C}$. Při laboratorních podmínkách se ukazuje, že je efektivnější zahřát plazmat na teplotu 10krát vyšší.

Získávání obou izotopů vodíku je přitom relativně snadné. Deuterium se získává destilací vody v libovolné formě, což je neškodný a prakticky nevyčerpatelný zdroj. V každém metru krychlovém mořské vody je 33 gramů deuteria. Deuterium je ale běžně získáváno pouze pro vědecké a průmyslové aplikace.

Tritium je rychle se rozpadající radioaktivní izotop vodíku (poločas rozpadu je 12,3 let), který se vyskytuje v přírodě pouze ve stopovém množství. Tritium vzniká při jaderné reakci lithia s neutronem. Proto se do pokrytí stěn vakuové nádoby TOKAMAKu přidává lithium: neutrony uvolňované při fúzní reakci dopadají na pokrytí stěn, čímž se získává další tritium podle reakce $^{6}_{3}\mathrm{Li} - \mathrm{n} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} - ^{3}_{1}\mathrm{H}$. Lithium z ověřeného zdroje v zemské kůře může poskytovat zásoby dostačující na provoz fúzních reakcí na dobu delší než 1000 let. Navíc může být lithium získáváno i z mořské

vody, kde jsou jeho zásoby prakticky nevyčerpatelné - postačovalo by k pokrytí světových požadavků na energii na dobu šesti milionů let. Světové zásoby tritia jsou odhadovány na 20 kg, které by ITERu vydrželo na celou odhadovanou dobu provozu. Koncept výroby tritia přímo ve fúzním reaktoru v pokrytí stěn je velmi důležitý pro budoucí využití fúzních reakcí ve větší míře.

Vzájemnými srážkami částice se částice nejen ionizují, ale též silně zahřívají. Každá srážka částic přitom znamená lokální přerušení elektrického proudu vytvořeného pohybem částic. Proto každá srážka částic vlastně zvyšuje elektrický odpor, což vede ke zvýšení teploty plazmatu. Paradoxně ovšem s rostoucí teplotou plazmatu klesá jeho odpor, a tedy klesá i teplo, kterým se plazma může dále ohřívat. Tomuto způsobu ohřevu se říká **ohmický ohřev**.

Souvislost elektrického odporu vodiče s teplem uvolňovaným tímto vodičem známe z rychlovarných konvic, fénů, … Odporovým vodičem (tj. vodičem s velkým elektrickým odporem) prochází elektrický proud a vodič se tak ohřívá. V případě kovových vodičů ale s rostoucí teplotou jejích odpor roste.

Tento způsob ohřevu ale není dostatečný k dosažení stavu, při kterém začne probíhat fúzní reakce. Plazma se musí ohřát na fúzní teplotu, která se pohybuje mezi $150 \cdot 10^6\ °C$ a $300 \cdot 10^6\ °C$. Urychlené částice se postupně dostávají blíž k sobě i přes odpudivé elektrostatické síly. Toto přiblížení částic umožní zažehnutí fúzní reakce.

Cíleně je nutné dosáhnout reakce jader, která jsou ovšem nabitá kladně, a proto se tedy odpuzují. Proto je nutné tyto odpudivé elektrostatické síly překonat!

Pro zvýšení teploty plazmatu na požadovanou teplotu je tedy nutné používat i další, externí, metody ohřevu plazmatu. Existují dvě možnosti, jak tento ohřev realizovat:

1. neutrální injektáž svazku částic;
2. vysokofrekvenční elektromagnetické vlnění.

Neutrální injektáž svazku částic je založena na vstřelování vysokoenergetických částic do plazmatu. Mimo nádobu TOKAMAKu jsou kladně nabité deuterony urychleny na potřebnou energii. Poté jsou zbaveny svého náboje a pokračují přímo do oblasti, kde se nachází plazma. V důsledku velmi intenzivních srážek s částicemi plazmatu těmto částicím předávají svou kinetickou energii. Kinetická energie částic plazmatu tak roste, čímž roste i teplota plazmatu jako celku. Výkon, který musejí vstřelované částice přinášet, se pohybuje v řádu megawattů.

Ohřev pomocí vysokofrekvenčního elektromagnetického vlnění byl navržen pro ITER. Toto vlnění vstupuje do plazmatu a interaguje s nabitými částicemi. Tím zvyšuje velikost rychlosti jejich chaotického pohybu, což se projeví zvýšením teploty plazmatu. V ITERu se používají tři typy vlnění, které se navzájem liší frekvencí, vhodné pro urychlení iontů a elektronů uvnitř nádoby TOKAMAKu.

Tento způsob ohřevu funguje tedy úplně stejně jako ohřev potravin v mikrovlnné troubě.

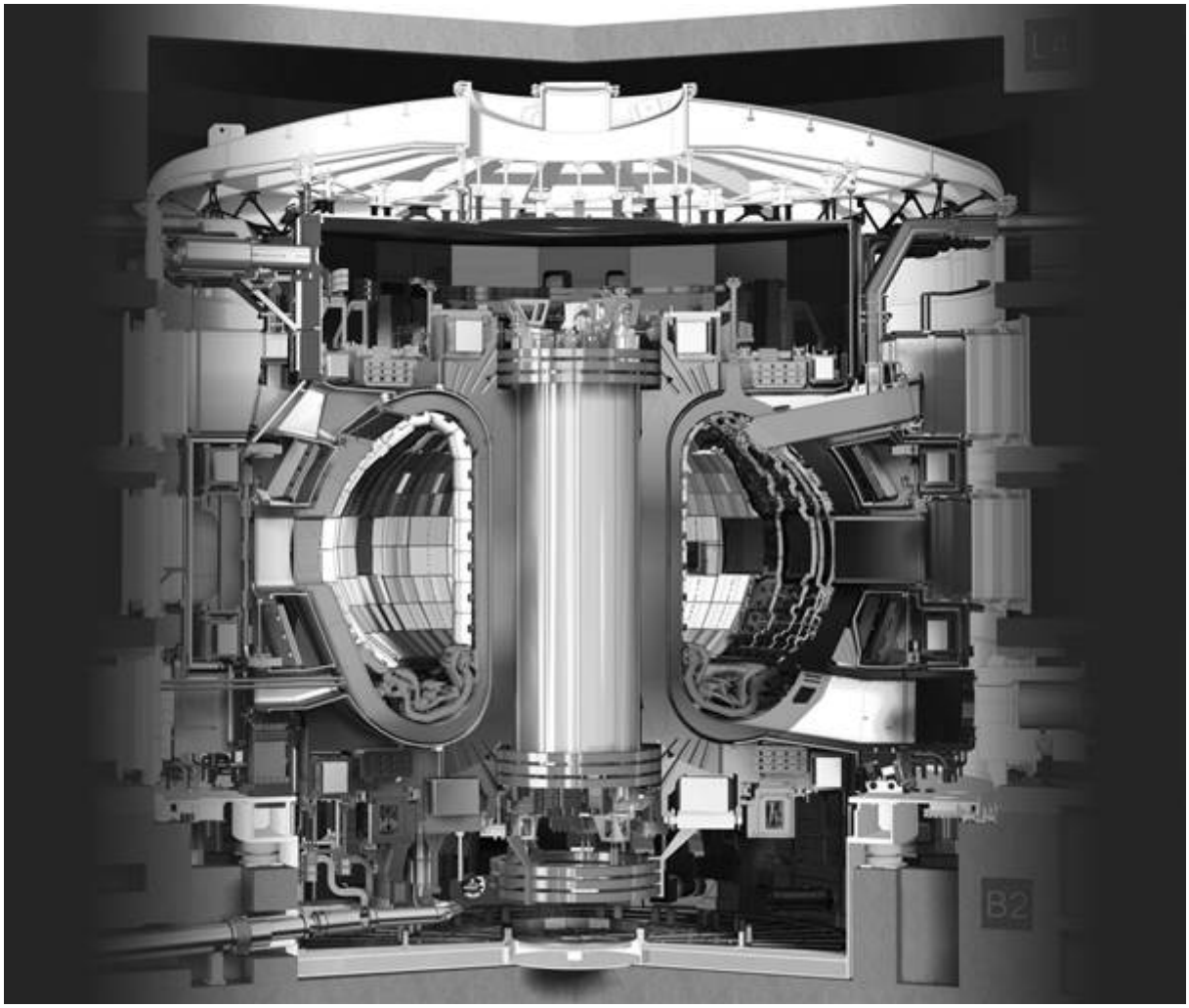
Ohmický ohřev, ohřev pomocí svazku částic i ohřev pomocí elektromagnetického vlnění se používají současně. Ideálním stavem z hlediska provozu fúzního reaktoru je vytvořit stav nazývaný **hořící plazma**. Jedná se o stav, při kterém je energie jádra helia vznikajícího při fúzních reakcích dostatečná k udržování požadované teploty plazmatu. V tomto případě může být výkon externích zdrojů tepla postupně snižován, případně mohou být tyto zdroje zcela odstaveny. Hořící plazma, ve kterém je minimálně 50 % energie uvolňované při fúzních reakcích spotřebováno ke stabilnímu udržení průběhu těchto reakcí, je nezbytným krokem pro dosažení požadovaného výkonu fúzních generátorů. V TOKAMAKu ITERu je energie nutná na ohřev plazmatu ze 66 % dodávána vznikajícími jádry helia.

Podmínky, které musí plazma splňovat, jsou popsané Lawsonovým kriteriem.

Přibližně 80 % energie, která se při fúzní reakci v plazmatu uvolní, je odnášena neutrony. Ty jsou elektricky neutrální, a proto na ně nepůsobí ani elektrostatická síla ani magnetická síla udržující částice plazmatu uvnitř nádoby TOKAMAKu. Neutrony jsou pohlcovány stěnami nádoby, kterou procházejí, a jejich kinetická energie se mění na teplo odebírané stěnám chladící tekutinou. Tato energie je dále využitelná na přeměnu na elektrickou energii v turbínách.

Z ekologického hlediska se jedná o jednu z nejčistších výrobních technologií elektrického proudu (ve srovnání s tepelnými elektrárnami, ...).

TOKAMAK (viz obr. 133) v ITERu je zatím nevětší tokamak na světě: jeho hmotnost je 23000 tun a výstupní výkon 500 MW.



Obr. 133

© Encyklopedie Fyziky (http://fyzika.jreichl.com); Jaroslav Reichl, Martin Všetička
Licence http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/ zakazuje úpravy a komerční distribuci.