



EURÓPSKA
KOMISIA

Výskum spoločnosti

VÝSKUM FÚZIE

Budúci zdroj
energie pre Európu

VŠEOBECNÉ INFORMÁCIE



Zaujímajú Vás informácie o európskom výskume?
Trojmesačník RTD Info Vám priblíži najnovšie poznatky
(objavy, programy, podujatia a pod.).
RTD Info je k dispozícii v anglickom, francúzskom a nemeckom
jazyku. O bezplatné zasielanie časopisu môžete požiadať na adrese:
European Commission
Directorate-General for Research
Information and Communication Unit
B-1049 Brussels
Fax (32-2) 29-58220
E-mail: research@cec.eu.int
Internet: http://europa.eu.int/comm/research/rtdinfo/index_en.html

EURÓPSKA KOMISIA
Generálne riaditeľstvo pre výskum
Výskum fúzie
Jednotka J6, Fúzia, Dohody asociácií
Kontaktná osoba: Hugues Desmedt
Európska komisia
Kancelária CDMA 04/74
B-1049 Brusel
Tel. (32-2) 29-98987
Fax (32-2) 29-64252
E-mail: hugues.desmedt@cec.eu.int

EURÓPSKA KOMISIA

VÝSKUM FÚZIE

**Budúci zdroj
energie pre Európu**

Odpovede na otázky o Európskej únii Vám poskytne služba Europe Direct

Bezplatné telefónne číslo:
00 800 6 7 8 9 10 11

POZNÁMKA O PRÁVACH:

Európska komisia a osoby zastupujúce komisiu nezodpovedajú za obsah nasledujúcich informácií. Autor publikácie je zodpovedný za názory obsiahnuté v tejto publikácii, ktoré nemusia byť v súlade s názormi Európskej komisie.

Ďalšie informácie o Európskej únii sú zverejnené na internete a dostupné cez Európsky server (<http://europa.eu.int>).

Katalogizované údaje sú uvedené na konci tejto publikácie.

Luxemburg: Kancelária pre oficiálne publikácie Európskeho spoločenstva, 2005

ISBN ISBN 92-894-7730-X

© Európske spoločenstvo, 2005

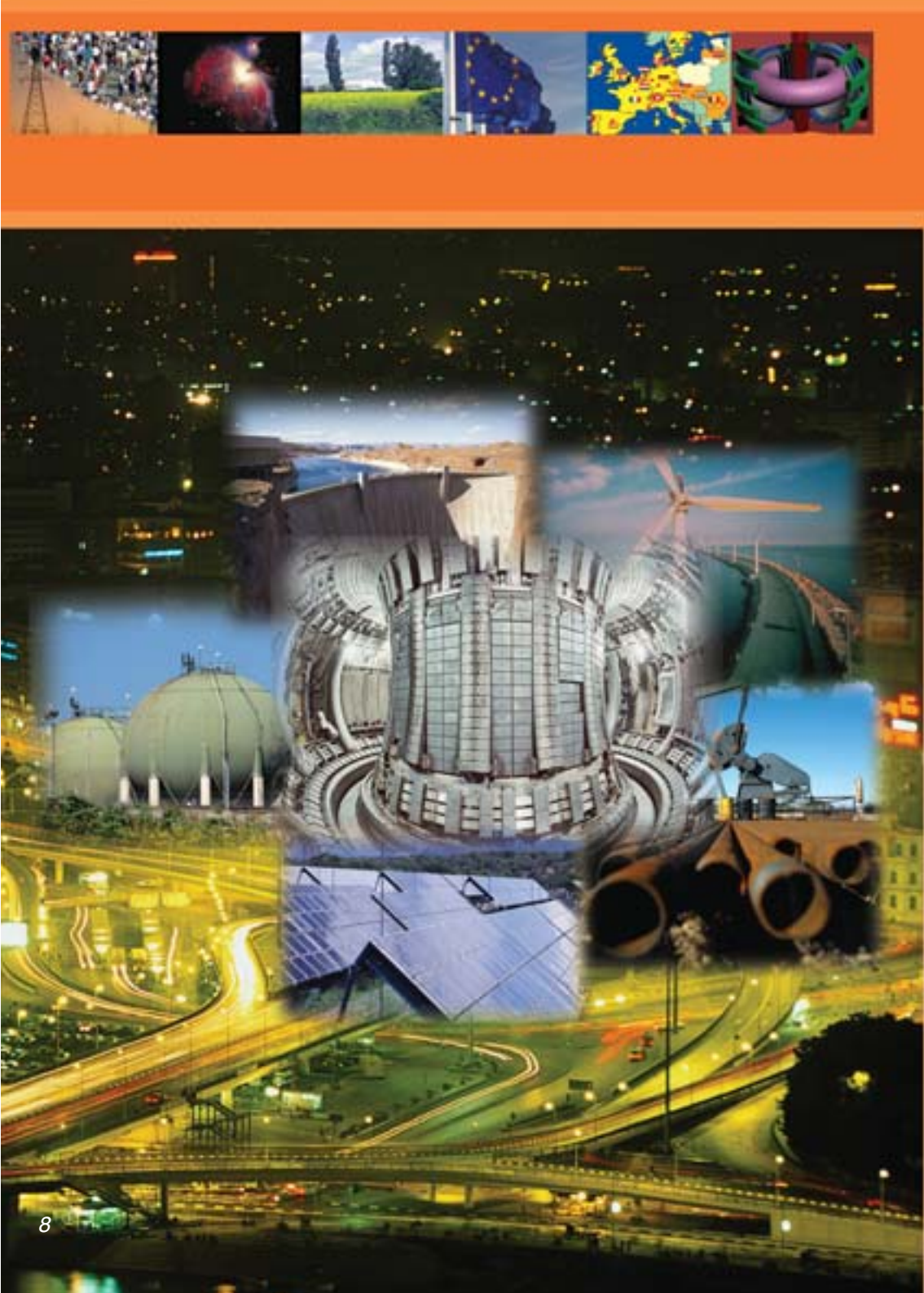
Pri reprodukování tohto diela je potrebné uviesť zdroj citácie.

Vydané v Belgicku

VYTLAČENÉ NA BEZCHLÓROVOM PAPIERI

Obsah

ÚVOD DO FÚZIE	
Potreba bezpečného a nevyčerpatel'ného zdroja energie	9
Zdroj energie hviezd	10
Fúzia ako zdroj energie	11
Bezpečnosť	12
Vplyv na životné prostredie	13
Výhody princípu magnetickej nádoby	14
EURÓPSKY FÚZNY PROGRAM	
ITER a európska stratégia pre fúziu	16
Európska oblasť pre výskum fúzie	18
PRINCÍP RIADENEJ FÚZIE	
Magnetická fúzia	20
Základné časti tokamaku	22
Ohrev plazmy	24
Diagnostika plazmy a počítačové simulácie	25
ITER, cesta k fúznej energii	26
Rozvoj technológií – dlhodobé aktivity	28
Osvetové aktivity v Európe	30
EIROforum	32
Vzdelávacie a tréningové aktivity v Európe	33
Prenos poznatkov do iných oblastí moderných technológií	34
Odkazy	35
O náučnom filme „Stvoritelia hviezd“	38
DVD	39





Potreba bezpečného a nevyčerpatel'ného zdroja energie

Ekonomika Európskej únie (EÚ) je závislá na bezpečnom a výkonnom zdroji energie. Tým sú v súčasnosti najmä fosílna palivá (ropa, uhlie a zemný plyn), ktoré sa podieľajú na produkcii energie až 80%. Spotreba fosílnych palív je zo 67% pokrytá dovozom. Inými slovami, dovážané fosílna palivá zabezpečujú zhruba polovicu energetickej spotreby EÚ. V prípade ropy by do roku 2030 mal tento podiel narásť až na 70%!

Na udržanie životného štandardu potrebuje Európa bezpečný a nevyčerpatel'ný zdroj energie. Snahou európskeho výskumu je vyvinúť škálu environmentálne prijateľných, dostatočne výkonných a najmä trvalých zdrojov energie. Fúzia je jedným z nich.

Fúzia je bezpečným zdrojom energie s prakticky nevyčerpatel'nými zásobami paliva. Z dlhodobého hľadiska je fúzia schopná produkovať dostatočné množstvo energie s minimálnym vplyvom na životné prostredie.

Elektrárň na princípe riadenej fúzie nájde uplatnenie v husto obývaných oblastiach a priemyselných zónach s vysokým dopytom po energii. Zároveň bude produkovať vodík využiteľný v priemysle.

Táto brožúra opisuje najvýznamnejšie výsledky dosiahnuté v rámci Európskeho výskumu fúzie, ktorého hlavným cieľom je využiť potenciál fúzie v prospech celej spoločnosti.



Zdroj energie hviezd

Fúzia je spôsob, akým produkuje energiu Slnko a ostatné hviezdy. Princíp fúzie je založený na zlučovaní jadier ľahkých atómov, ktoré sprevádza uvoľnenie veľkého množstva energie. Vďaka vysokému tlaku vyvolanému gravitačnými silami prebieha fúzia v jadre Slnka pri teplote "iba" 10 miliónov °C.

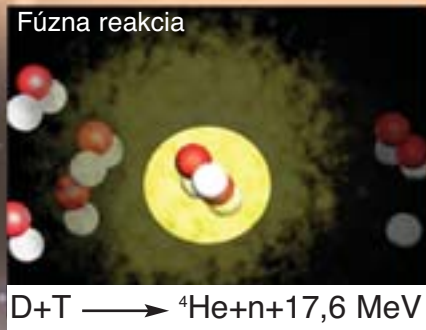
Plyn zahriaty na takúto vysokú teplotu sa mení na plazmu. Plazma je tvorená atómovými jadrami (iónmi) a elektrónmi vytrhnutými z atómového obalu. Vďaka svojim osobitým vlastnostiam dostala plazma prívlastok "štvrté skupenstvo hmoty". Skúmaním týchto vlastností sa zaoberá odbor fyzika plazmy. Aj keď plazma tvorí viac ako 99% hmoty vo vesmíre, na Zemi sa takmer vôbec nevyskytuje.

S využitím súčasných technológií dokážeme na Zemi dosiahnuť len zhruba 10 miliárd násobne nižší tlak ako na Slnku. Aby sa dosiahlo zapálenie fúzných reakcií v dostatočnom rozsahu, musí byť toto obmedzenie vyvážené omnoho vyššou teplotou - až 100 miliónov °C. Takáto teplota plazmy sa dosahuje v súčasných experimentálnych reaktoroch pomocou výkonného ohrevu. Aby sa predišlo výrazným tepelným stratám musí byť plazma izolovaná od stien reaktora silným magnetickým poľom, ktoré udržiava nabité častice plazmy vo vymedzenom objeme. Na tomto princípe je založený koncept tokamaku - magnetickej nádoby v tvare prstenca. Tokamak je doposiaľ najúspešnejším zariadením a predstavuje základnú líniu výskumu fúzie v Európe.

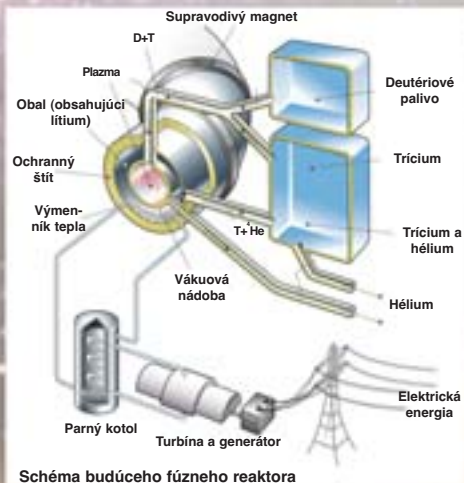


Fúzia ako zdroj energie

Fúzna reakcia



Najvhodnejším palivom prvej generácie budúcich fúzných reaktorov budú dva izotopy vodíka, deutérium (D) a trícium (T). Fúzne reakcie s použitím iných prvkov totiž vyžadujú v reaktore oveľa vyššie teploty. Deutérium je možné získavať z morskej vody (cca. 35 g na meter kubický) a jeho zdroje sú prakticky nevyčerpatelne. Trícium sa v prírode voľne nevyskytuje, je ho však možné získať štiepením lítia - ľahkého kovu, ktorého zásoby na Zemi sú obrovské. Pri jednej fúznej reakcii deutéria a trícia vzniká tzv. alfa častica (jadro hélia) a neutrón.



Neutróny, ktoré unikajú z plazmy pri fúzných reakciách sú spomaľované v plášti obsahujúcom lítium. Lítiový plášť obklopuje celú komoru reaktora. Pri reakcii neutrónov a lítia vzniká trícium, ktoré je ako palivo odvádzané späť do reaktora. Energia, ktorá sa uvoľní pri vzniku trícia je využitá k pohonu generátora vyrábajúceho elektrickú energiu. Palivo fúznej elektrárne, ktoré by vystačilo na ročné zásobovanie miliónového mesta elektrickou energiou, by sa zmestilo do jediného nákladného automobilu.

Bezpečnosť



Zariadenie na manipulovanie s trícium

Reaktor riadenej fúzie je možné prirovnať ku kotlu spaľujúcemu dodávané palivo – deutérium a trícium. Počas horenia je v komore fúzneho reaktora len veľmi malé množstvo paliva (približne 1 gram D-T zmesi na 1000 m³). V prípade prerušenia dodávky paliva fúzna reakcia po niekoľkých sekundách sama zhasne. Akýkoľvek chybný postup pri obsluhu reaktora vedie k okamžitému ochladeniu plazmy na stenách komory a následnému zastaveniu reakcií.

Primárne palivo, deutérium a lítium, rovnako ako aj produkt fúznej reakcie hélum, sú úplne neškodné. Rádioaktívne „prechodné“ palivo trícium má relatívne krátky polčas rozpadu (12,6 roka) v porovnaní napríklad s uránom (10⁶ – 10⁹ roka). Pri rozpade trícia vzniká elektrón (tzv. beta rozpad) s veľmi nízkou energiou. Dolet tohto elektrónu vo vzduchu je len niekoľko milimetrov a nie je schopný preniknúť ani listom papiera. Samotné trícium môže byť nebezpečné ak prenikne do ľudského tela. Z toho dôvodu sú zavedené prísne bezpečnostné kritériá pri narábaní s trícium vo fúzných reaktoroch.

Keďže trícium vzniká a je spotrebované v bezprostrednej blízkosti reaktora, v budúcnosti nebudú potrebné žiadne transporty rádioaktívneho paliva do, alebo z fúznej elektrárne.



Vplyv na životné prostredie

Energia vznikajúca pri fúzii sa bude využívať rovnakým spôsobom ako v súčasných elektrárňach: na výrobu elektrickej energie, priemyselne využiteľného tepla, eventuálne na výrobu vodíka.

Fúzna elektráreň bude spotrebúvať extrémne nízke množstvo paliva: reaktor s výkonom 1 GW si ročne vyžiada asi 100 kg deutéria a 3 tony prírodného lítia na výrobu 7 miliárd kWh elektrickej energie. Súčasné elektrárne spaľujúce uhlie spotrebujú na výrobu rovnakého množstva energie až 1,5 milióna ton paliva!

Dôležité je, že fúzia neprodukuje žiadne skleníkové plyny vedúce ku klimatickým zmenám, resp. iné produkty znečisťujúce životné prostredie.



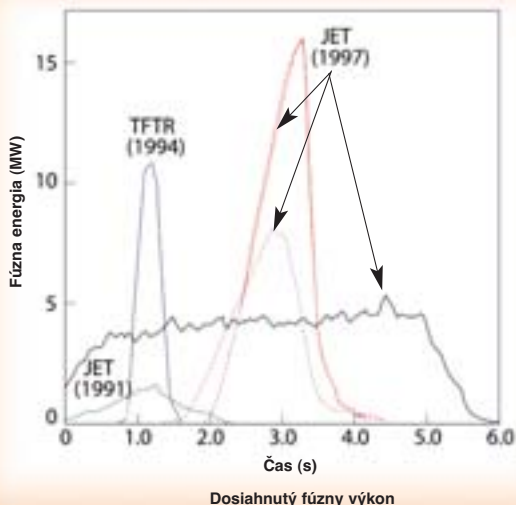
Neutróny vznikajúce pri fúzii vedú k aktivácii niektorých komponentov reaktora (t.j. materiál sa stáva rádioaktívnym). Výberom vhodných materiálov je možné túto aktiváciu čiastočne eliminovať a komponenty recyklovať už po 100 rokoch od ich uskladnenia. Táto forma odpadu z fúznej elektrárne preto nebude predstavovať záťaž pre mnoho ďalších generácií.

Európsky tokamak JET (Culham-Veľká Británia)

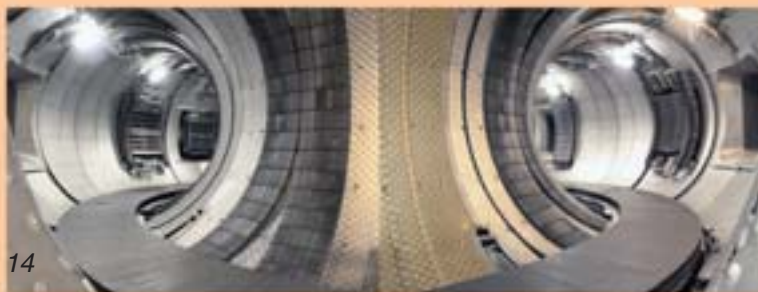


Výhody princípu magnetickej nádoby

Európsky tokamak JET (Joint European Torus) v anglickom Culhame je v súčasnosti najväčším experimentálnym fúznym reaktorom. JET je v súčasnosti jediným reaktorom, v ktorom sa pri experimentoch používa zmes deutéria a trícia. Výsledky z JET-u naplnili všetky stanovené ciele a v niektorých prípadoch dokonca prekonalí pôvodné očakávania. V roku 1997 bol v tomto tokamaku dosiahnutý doposiaľ najvyšší fúzny výkon 16 MW.



V Európe je niekoľko veľkých centier špecializovaných na výskum riadenej fúzie. Jeden z posledných významných výsledkov bol dosiahnutý na francúzskom tokamaku TORE SUPRA, navrhnutom na výskum stacionárnych režimov. V roku 2003 tento tokamak zaznamenal stabilný výboj s dĺžkou trvania až 6 a pol minúty. Celková energia dodaná plazme a zároveň uvoľnená vo forme tepla bola viac ako 1 GJ (tisíc miliónov joulov). Toto množstvo energie by bolo schopné priviesť do varu 3 tony vody.



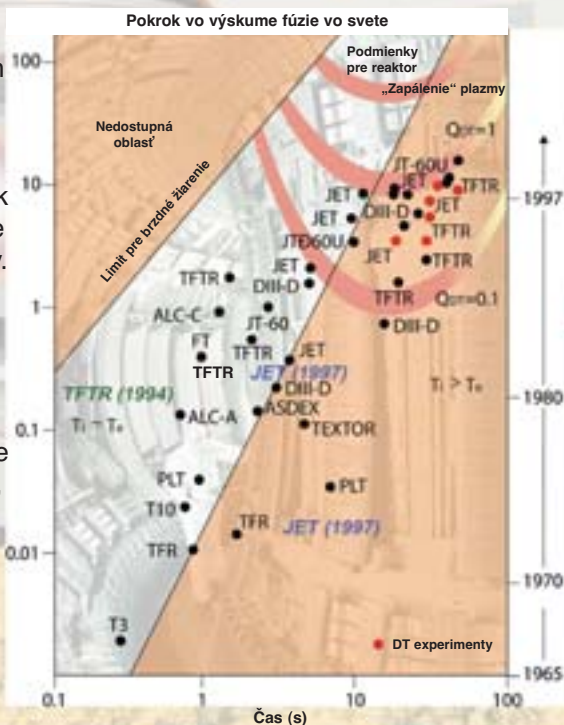
Tore Supra (Cadarache, Francúzsko) stabilný plazmový výboj s rekordnou dĺžkou trvania.



Jednoduchým kritériom na určenie „kvality“ fúzneho reaktora je tzv. veľké Q – podiel energie vyprodukovanej plazmou v reaktore k energii vynaloženej na ohrev plazmy. Plazma v reaktore dosiahne stav samostatného horenia ($Q = \infty$) keď sú straty energie z plazmy plne kompenzované časťou energie uvoľnenej pri fúzných reakciách. V tomto prípade sa „horenie“ plazmy naďalej udržuje aj pri úplnom vypnutí vonkajšieho ohrevu. Tento proces je možné prirovnať k horeniu ohňa – na jeho udržanie stačí dopĺňať potrebné palivo. Budúce reaktory by však produkovali dostatok energie aj v prípade, že nedosiahnu ideálnu podmienku $Q = \infty$.

JET vyprodukoval 16 MW energie pri $Q = 0.65$. Pripravovaný experimentálny reaktor ITER je technicky navrhnutý na $Q = 10$ (t.j. vyprodukuje 10-násobne viac energie ako sa vynaloží na ohrev plazmy). Pre komerčné fúzne reaktory sa ráta s $Q = 40 - 50$.

Dosiahnutá kvalita súčasných fúzných reaktorov závisí od kombinácie rozličných parametrov plazmy. Tie určujú nakoľko sa reaktor približuje k podmienkam relevantným pre komerčne využiteľné reaktory. Na obrázku je znázornená hodnota parametra Q ako funkcia teploty plazmy pre najväčšie tokamaky vo svete. Ako vidno z obrázku, už dnes dosahujú najvyspelejšie zariadenia parametre plazmy, ktoré sú blízke k hodnotám potrebným pre „ideálny“ fúzny reaktor.





ITER a Európska stratégia pre fúziu

Dlhodobým cieľom výskumu fúzie v členských štátoch Európskej Únie (a krajín pridružených k Európskemu rámcovému programu) je „vytvorenie prototypu reaktora, ktorý by spĺňal nasledujúce kritériá: bezpečná prevádzka, minimálna záťaž pre životné prostredie, prijateľné finančné náklady“.

V rámci tejto stratégie sa ráta so stavbou experimentálneho termonukleárneho reaktora ITER realizovanou formou medzinárodnej spolupráce.

Pri parametroch zodpovedajúcich budúcim fúznym reaktorom má ITER overiť, či je súčasná technológia riadenej fúzie na prakticky využiteľnej úrovni. Ide najmä o skúšky riadeného horenia D-T plazmy a testovanie technológií pre budúce reaktory.

Na ITER bude nadväzovať konštrukcia prototypu komerčného reaktora (DEMO). Cieľom projektu DEMO bude vyrobiť dostatočné množstvo energie, pričom palivo v reaktore bude po prvýkrát dodávané na princípe samozásobovania tríciov z plášťa. Stavba a prevádzka tokamaku ITER a DEMO ráta s rozsiahlym zapojením priemyslu a vedecko-výskumných aktivít laboratórií a univerzít.

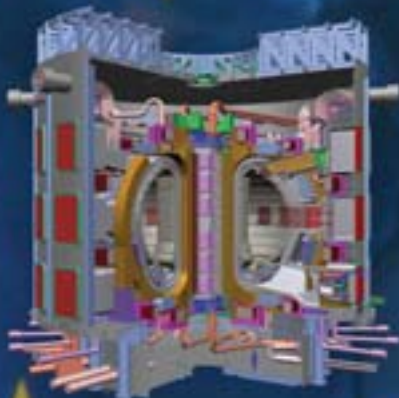


Schéma reaktora ITER



V posledných rokoch bola významnou súčasťou výskumu fúzie v Európe spolupráca s medzinárodnými partnermi na príprave technologických a konštrukčných podkladov pre ITER. Tie čerpali poznatky najmä z tokamaku JET (Joint European Torus, Culham, GB) v ktorom bol v roku 1997 dosiahnutý doposiaľ najväčší fúzny výkon 16 MW. Dizajn tokamaku ITER zároveň čerpal z rozsiahlej experimentálnej databázy mnohých laboratórií pre výskum fúzie ako aj z výsledkov počítačového modelovania.

Medzinárodná spolupráca na projekte ITER prebieha pod záštitou Medzinárodnej agentúry pre atómovú energiu, International Atomic Energy Agency (IAEA, Viedeň, A). Hlavným cieľom projektu ITER je demonštrovať vedecko-technologický potenciál fúzie.



Model areálu reaktora ITER pri francúzskom Cadarache

V nadväznosti na projekt ITER sa z dlhodobého hľadiska počíta so stavbou tokamaku DEMO. Jedna z hlavných úloh prípravnej fázy projektu DEMO je vývoj vhodných materiálov s nízkou mierou aktivácie, ktoré by našli uplatnenie v komerčných fúzných reaktoroch.



Európska oblasť pre výskum fúzie

Pre európsky program riadenej fúzie je charakteristická koordinácia jednotlivých výskumných aktivít a spolupráca jednotlivých partnerov. Tá má kľúčový význam najmä pri príprave projektov nadväzujúcich na JET – t.j. stavba tokamaku ITER a rozvoj aktivít súvisiacich s tokamakom DEMO. Realizácia úloh prebieha v rámci Európskej dohody o rozvoji fúzie, European Fusion Development Agreement (EFDA).

Rozsiahly a mimoriadne náročný projekt výskumu riadenej fúzie prakticky vylučoval individuálny postup jednotlivých krajín a vyžadoval si od začiatku vzájomnú spoluprácu. Koordinovaný program riadenej fúzie so zapojením národných laboratórií v rámci Európskej únie je dobrým príkladom metódy uplatňovanej v Európskom výskumnom priestore (European Research Area). Tento postup postavil Európu na čelo výskumu fúzie s využitím konceptu tzv. magnetickej nádoby. Výsledky dosiahnuté v európskych laboratóriách v rámci koordinovaných aktivít boli zhmotnené v tokamaku JET a vytvorili reálne predpoklady pre vybudovanie ITER-u.

Popri medzinárodnej príprave projektu ITER prebieha spolupráca s ďalšími mimoeurópskymi výskumnými pracoviskami. Tá stavia na bilaterálnych a multilaterálnych zmluvách medzi jednotlivými európskymi a mimoeurópskymi laboratóriami a je zameraná na špecifické úlohy.





Európsky program výskumu a vývoja fúzie, koordinovaný Európskou komisiou na základe zmlúv zakladajúcich Euratom, je realizovaný:

- Asociačnými kontraktmi medzi výskumnými pracoviskami a organizáciami členských štátov EÚ a krajinami podieľajúcimi sa na Európskom rámcovom programe (jednotlivé laboratóriá Asociácií Euratomu sú na mape znázornené červenými bodmi).
- Zmluvou EFDA, ktorá zabezpečuje:
 - spoluprácu medzi Asociáciami a priemyslom,
 - spoločné využívanie tokamaku JET a
 - európsky príspevok v rámci medzinárodnej spolupráce na projekte ITER.
- Časovo obmedzenými kontraktmi s krajinami ktoré nemajú sformovanú vlastnú „Asociáciu“.
- Zmluvou o mobilite výskumných pracovníkov a štipendiami Euratomu.

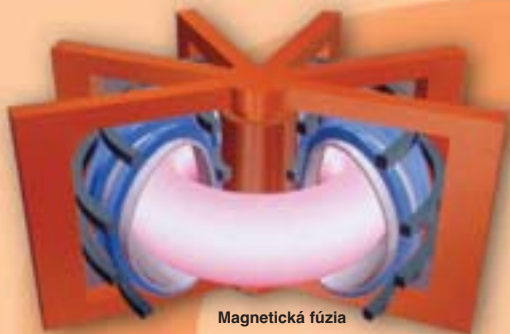
V 6. Rámcovom programe EÚ (2002 až 2006) je výskum fúzie energie zaradený do prioritnej tematickej oblasti s rozpočtom 750 miliónov euro (z čoho je 200 miliónov euro určených na počiatočnú fázu stavby ITER-u).

V úspechu Európskeho programu riadenej fúzie je skrytá práca viac ako 2000 fyzikov a inžinierov z európskych výskumných laboratórií a priemyslu.

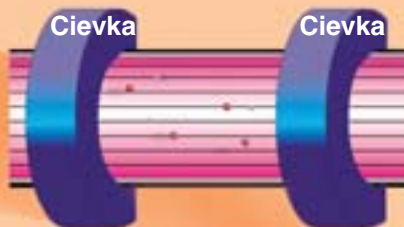


Magnetická fúzia

Princíp magnetickej fúzie je založený na využití silného magnetického poľa, ktoré udržiava plazmu vo vnútri vákuovej nádoby. Úlohou vákuovej nádoby tvoriacej jadro reaktora je zabrániť prístupu vzduchu a izolovať tak plazmu od vonkajšieho prostredia. V ideálnom prípade sa jednotlivé častice plazmy, ióny a elektróny, pohybujú vo vákuovej nádobe len pozdĺž siločiar magnetického poľa bez kontaktu s jej vnútornými stenami. Stočením magnetických siločiar do uzavretých slučiek tvaru prstenca (toroidu) je teda možné uzavrieť častice plazmy do pomyslenej „magnetickej nádoby“.

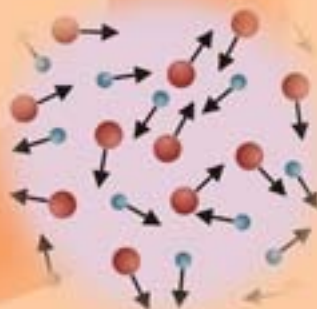


Magnetická fúzia



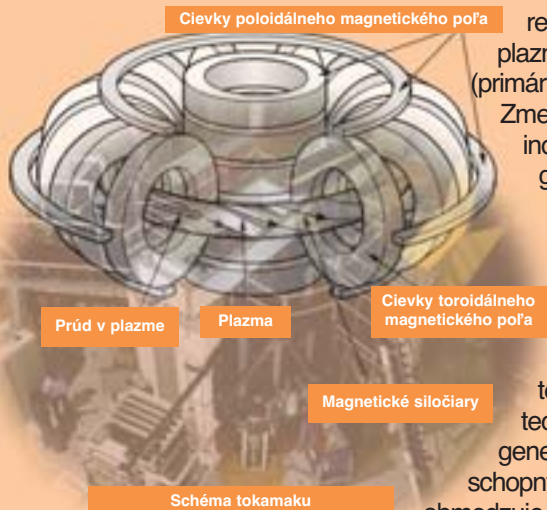
Plazma s prítomnosťou magnetického poľa

Ióny a elektróny sa potom „vznášajú“ v presne definovanom objeme bez kontaktu so stenou reaktora. Tým, že plazma nie je ochladzovaná pri kontakte so stenou, udržiava si svoju energiu, čo pri sústavnom ohrievaní umožňuje dosahovať čoraz vyššiu teplotu. V každej reálnej magnetickej nádobe však dochádza k určitým stratám častíc plazmy a teda aj vlozenej energie. Tieto straty sú zapríčinené pohybom iónov a elektrónov kolmo na magnetické siločiar (t.j. von z magnetickej nádoby smerom k vnútornej stene reaktora) po vzájomných zrážkach častíc.



Plazma bez prítomnosti magnetického poľa

Výsledné pole magnetickej nádoby je z časti vytvorené veľkými cievkami obopínajúcimi vákuovú nádoby cez ktoré preteká silný prúd. Zároveň sú niektoré komponenty magnetického poľa generované prúdom prechádzajúcim samotnou plazmou.



Pri generovaní magnetického poľa v reaktore typu tokamaku predstavuje plazma sekundárne vinutie transformátora (primárnym vinutím je externá cievka).

Zmena prúdu v primárnom vinutí potom indukuje v plazme prúd, ktorý následne generuje magnetické pole. Keďže plazma má určitý elektrický odpor, tento prúd zároveň spôsobí aj zahriatie plazmy (podobne ako prúd zahrieva špirálu v rýchlovarnej kanvici). Na veľkých tokamakoch je takýmto spôsobom možné dosiahnuť teplotu až niekoľko miliónov stupňov. Z technologických príčin transformátor generujúci prúd v primárnom vinutí nie je schopný pracovať bez prerušenia. To

obmedzuje „životnosť“ plazmy resp. vyžaduje dosahovať stacionárny stav plazmy pomocou odlišnej technológie.

Reaktor typu tzv. „stellarátora“ využíva tiež princíp magnetickej nádoby. V tomto prípade však vonkajšie cievky tvoria komplikovanejšiu sústavu a stellarátor (na rozdiel od tokamaku) nevyžaduje transformátor na vytváranie kompletnej topológie magnetického poľa. Dosahovanie dlhotrvajúceho (v ideálnom prípade stacionárneho) výboja je preto najväčšou prednosťou stellarátora. V nemeckom Greifswalde sa usku- točňuje stavba doposiaľ najväčšieho stellarátora Wendelstein 7-X. Ostatné typy experimentálnych reaktorov ako tzv. kompaktné (sférické) tokamaky a pinče s obráteným polom, zväčša vychádzajú z princípu tokamaku alebo stellarátora.



Schéma stellarátora



Základné časti tokamaku

Centrálna cievka

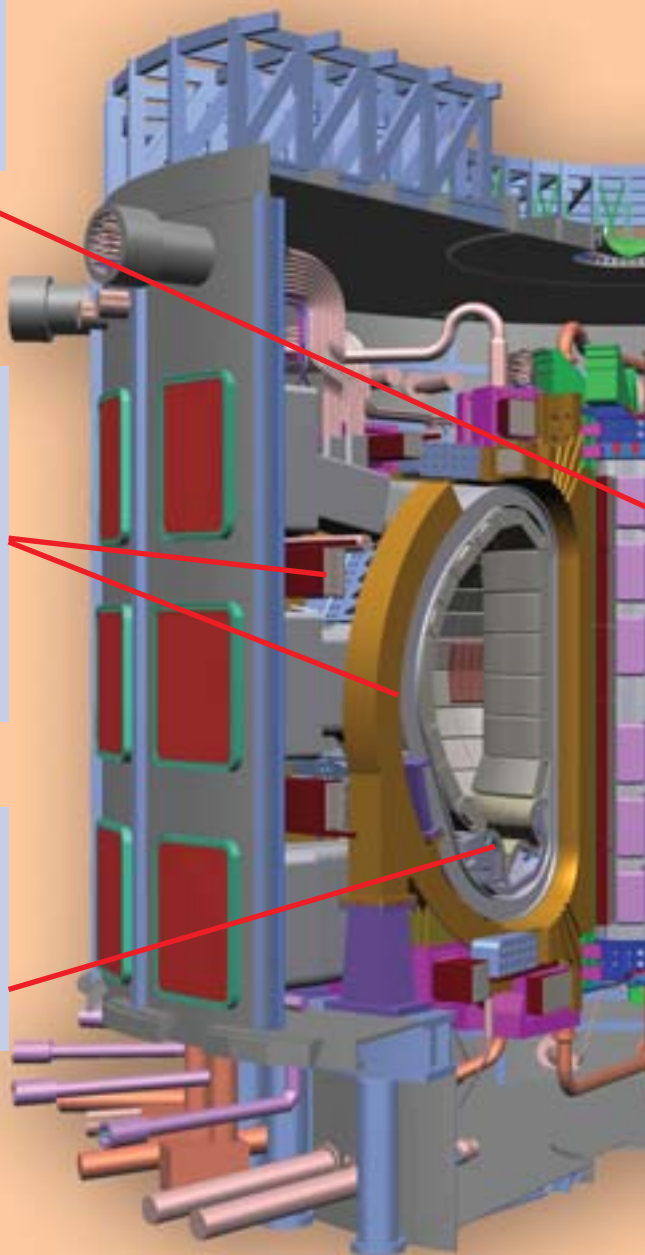
Primárne vinutie transformátora.
Plazma tvorí sekundárne vinutie.

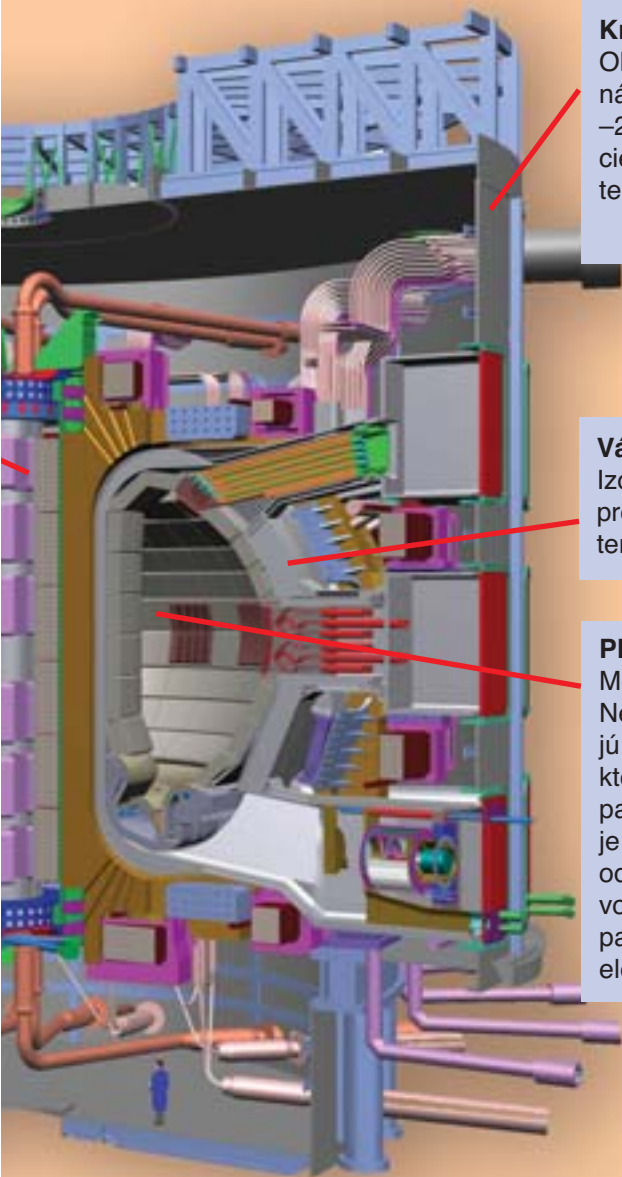
Cievky toroidálneho poľa a cievky poloidálneho poľa

Vytvárajú silné magnetické pole (typicky 5 Tesla, čo je asi 100.000 krát viac ako magnetické pole Zeme), ktoré udržiava plazmu vo vymedzenom objeme a zabraňuje kontaktu plazmy so stenami vákuovej nádoby.

Divertor

Odstraňuje z plazmy nečistoty a hélium. Divertor je zároveň jediným miestom, ktoré je zámerne v priamom kontakte s plazmou.





Kryostat

Obklopuje cievky a vákuovú nádobu. Kryostat je schladený na -200 °C a pomáha supravodivým cievkam udržiavať si pracovnú teplotu -269 °C .

Vákuová nádoba

Izuluje plazmu od vonkajšieho prostredia čím zabraňuje jej znečisteniu a ochladeniu.

Plášť

Moduly plášťa obsahujú lítium. Neutróny vznikajúce pri fúzii reagujú s lítiom a vytvárajú trícium, ktoré môže byť extrahované ako palivo do reaktora. V lítiom plášti je zároveň chladiaci obvod, ktorý odvádza energiu neutrónov vo forme tepla. Toto teplo vytvára paru na poháňanie generátora elektrickej energie.



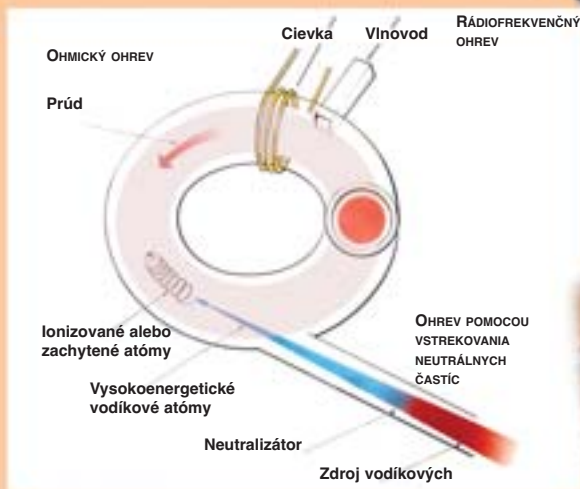
Ohrev plazmy

Elektrický prúd tečúci plazmou ju zároveň ohmicky zahrieva. Táto metóda ohrevu sa s rastúcou teplotou stáva neefektívna a pomocou ohmického ohrevu je možné dosiahnuť teplotu plazmy „len“ niekoľko miliónov stupňov (asi 1 desatina potrebnej teploty na zapálenie fúzychných reakcií). Na dosiahnutie vyšších teplôt sa preto využívajú externé formy ohrevu.

Vysokofrekvenčný ohrev využíva výkonné generátory elektromagnetických vln. Ak má generovaná vlna špecifickú frekvenciu, nastáva pri jej interakcii s plazmou rezonančný jav a vlna je schopná odovzdať celú svoju energiu plazme.



Na tomto princípe sú založené tri typy systémov: iónový cyklotrónový rezonančný ohrev (frekvencia vlny 20 MHz až 55 MHz), elektrónový cyklotrónový rezonančný ohrev (100-200 GHz, vo všeobecnosti mikrovlny), a tzv. dolný hybridný ohrev (1-8 GHz).



Rádiofrekvenčná anténa na tokamaku Tore Supra (CEA, Cadarache, Francúzsko)



Lúč energetických neutrálnych častíc je vstrelený do plazmy. Neutrálne častice môžu ľahko prenikať magnetickým poľom a zrážkami odovzdávajú časticiam plazmy svoju energiu.

Systém pre vstrekovanie neutrálnych častíc na tokamaku JET



Diagnostika plazmy a počítačové simulácie

Úspešnosť ďalšej generácie fúzných reaktorov kriticky závisí od pochopenia procesov uskutočňujúcich sa v plazme. Na získanie presných údajov sa využívajú sofistikované meracie systémy, tzv. diagnostiky.

V súčasnosti sú k dispozícii diagnostické metódy na meranie všetkých dôležitých parametrov plazmy: od určenia teploty v strede plazmy pomocou vysokovýkonných laserov až po zisťovanie presného množstva nečistôt v plazme a miesta ich pôvodu.

Údaje získané z diagnostík sa ďalej využívajú pri vývoji nových počítačových programov určených na simulovanie dejov prebiehajúcich v plazme. Z počítačových simulácií je možné získať informácie aj o takých procesoch v plazme, ktoré nie je možné priamo merať. Simulácie zároveň hrajú významnú úlohu pri optimalizovaní konštrukcie reaktora a odhade jeho parametrov.

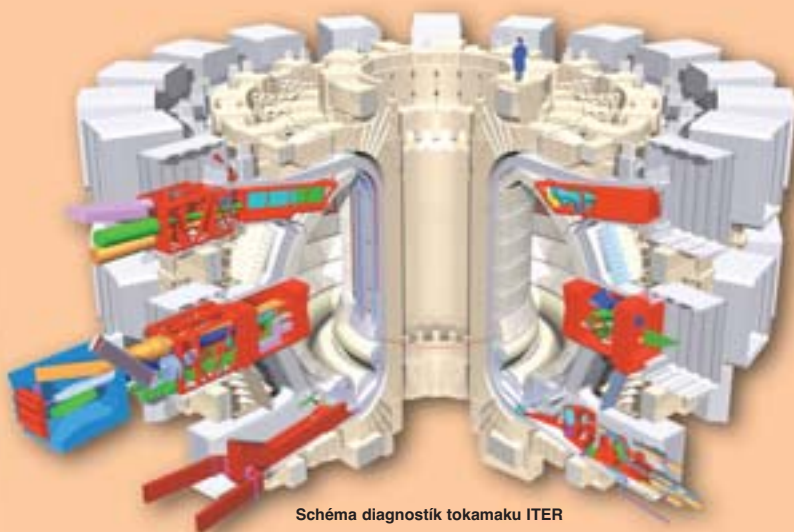


Schéma diagnostík tokamaku ITER



ITER, cesta k fúznej energii

ITER je významným míľnikom na ceste k fúznemu reaktoru.

Projekt ITER je založený na úspešnej medzinárodnej spolupráci realizovanej formou výskumných a technologických projektov. ITER bude schopný generovať až 400 MW energie. Predpokladaná dĺžka plazmového výboja bude 6 minút. Neskôr sa ráta aj s dosiahnutím stacionárneho výboja.

Náklady na stavbu tokamaku ITER sú približne 4,6 miliárd euro (odhad z roku 2000). Stavba reaktora bude ukončená po 8-10 rokoch od podpisu zmlúv medzi jednotlivými medzinárodnými partnermi. Reaktor ITER bude v prevádzke zhruba 20 rokov.

Dizajn ITER-u vychádza z výsledkov dosiahnutých počas prevádzky mnohých experimentálnych reaktorov vo svete.

Prototyp kazety divertora pre ITER

Testovacie zariadenie na robotickú obsluhu divertora ITER-u

Zdroj cyklotrónnych vysokofrekvenčných mikrovln



Zváranie segmentov
vákuovej nádoby výkonným
laserom (11 kW)



Testovanie modelu cievky
toroidálneho poľa



Zdroj cyklotrónnych
vysokofrekvenčných
mikrovln (1 MW)



Testovanie vplyvu tepelného
toku na ochranný štít



Vertikálny segment divertora testovaný
vo Framatome



Zariadenie na testovanie pláštá

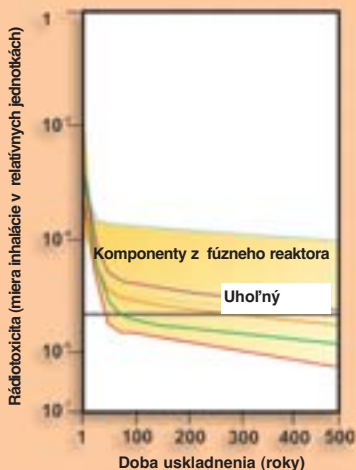


Rozvoj technológií – dlhodobé aktivity

Paralelne s prácou na tokamaku ITER prebieha výskum a rozvoj technológií pre nadväzujúci projekt DEMO. Európske štúdie vonkajšieho štiepneho plášťa skúmajú možnosť využitia lítiovo-olovených resp. keramických štiepnych plátov chladených héliom. Tento výskum úzko súvisí s uplatnením tríciového cyklu (vznik trícia v lítiovom plášti a jeho transport do plazmy) vo fúznom reaktore.

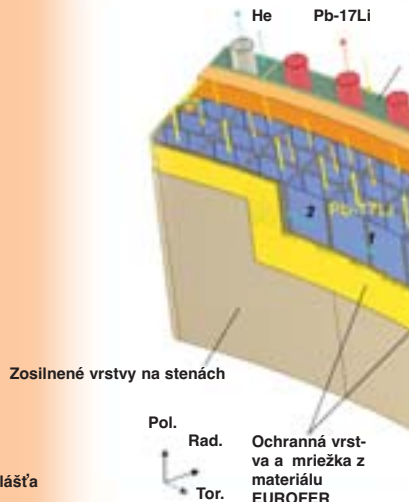
Tzv. ferritická a martensitická oceľ (EUROFER) je jedným z materiálov pre komponenty reaktora vyvinutým v Európe s cieľom znížiť mieru aktivácie reaktora. Podľa niektorých štúdií by tento materiál mohol byť nahradený kremíkovo-uhlíkovými kompozitmi.

Pozornosť sa sústreďuje aj na otázky bezpečnosti a vplyvu fúzie na životné prostredie. Ráta sa s využitím materiálov s nízkou mierou aktivácie pre všetky hlavné komponenty reaktora. Pri uplatnení tohto konceptu by v prípade havárie elektrárne nebola potrebná evakuácia okolitého obyvateľstva. V neposlednom rade sa skúma dlhodobý vplyv fúzie na rozvoj hospodárstva a zmeny v spoločnosti.



Odhad rádioxity pomocou rôznych modelov fúzneho reaktora porovnaný s rádioxitou uhoľného prachu

Héliový podsystém



Koncept prototypu lítiového plášťa



Tríciová pumpa



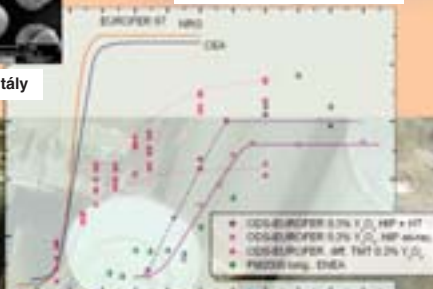
Berýliové kryštály



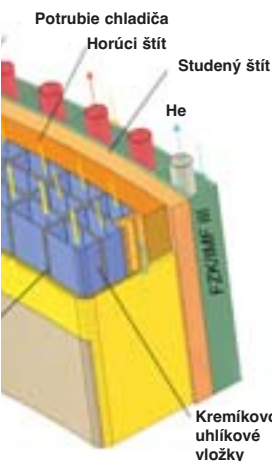
Test korózie tekutého kovu



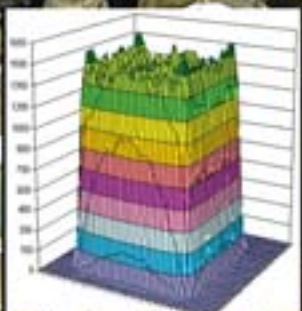
Vzorky materiálu EUROFER



Vlastnosti materiálu EUROFER



Výskumný reaktor KFKI v Maďarsku



Priečný rez ožarovacím lúčom v IFMIF



Osvetové aktivity v Európe

Cieľom putovnej výstavy Fusion Expo je informovať širokú verejnosť a študentov o aktivitách súvisiacich s výskumom riadenej fúzie v Európe. Táto výstava bola predstavená už v mnohých európskych mestách.





Putovná výstava fusion road show

Z podnetu Asociácie Euratom-FOM (Holandsko) vzniklo podujatie Fusion Road Show, ktorého hlavným zámerom je šíriť poznatky dosiahnuté vo výskume riadenej fúzie. Prezentácia názorných experimentov spája interaktívne predstavenie s vysvetlením základných fyzikálnych princípov.



Eiروفórum

Európsky fúzny program je v rámci EFDA súčasťou EIROfóra, ktoré združuje sedem európskych medzivládnych vedecko-výskumných laboratórií. Hlavným cieľom EIROfóra je zabezpečiť vysokú kvalitu a praktické uplatnenie poznatkov európskeho výskumu. EIROfórum koordinuje transfer technológií ako aj vzdelávanie širokej verejnosti.

Členmi EIROfóra sú:

- **CERN** Európska organizácia pre nukleárny výskum, CH
- **EFDA** Európska dohoda o rozvoji fúzie (GB, D)
- **EMBL** Európske laboratórium molekulárnej biológie (D),
- **ESA** Európska vesmírna agentúra (EÚ),
- **ESO** Európske južné observatórium (D, CL),
- **ESRF** Európske zariadenie na výskum synchrotrónneho žiarenia (F),
- **ILL** Institut Laue-Langevin (F).



Fyzika na pódii 3 - Učiteľia v akcii





Vzdelávacie a tréningové aktivity v Európe

Vzdelávanie a tréning mladých vedcov sú dôležitou súčasťou práce jednotlivých Asociácií. Mnoho profesionálnych vedcov z Asociácií sa zúčastňuje pedagogickej činnosti na univerzitách a 200 až 250 študentov a doktorandov z univerzít pracuje v laboratóriách Asociácií. Zároveň Asociácie organizujú praktické kurzy a letné školy (Summer Schools) zamerané na fúziu a fyziku plazmy pre študentov - budúcich vedcov.

Niektoré letné školy organizované Asociáciami:

- Carolus Magnus Summer School – organizuje Trilateral Euregio Cluster, TEC (B, D, NL),
- Culham Summer School – Asociácia Euratom-UKAEA (GB),
- Volos Summer School – Asociácia Euratom-Grécko (GR),
- IPP CR Summer School - Asociácia Euratom-Ústav fyziky plazmy, (CZ).



Prenos poznatkov do iných oblastí moderných technológií

Vývoj technológií súvisiacich s riadenou fúziou predpokladá úzku spoluprácu vedeckých laboratórií a priemyslu. Táto spolupráca je pre priemysel veľkým prínosom: mnohé technológie vyvinuté pre fúziu našli uplatnenie aj v komerčnej oblasti. Príkladom je opravovanie povrchov materiálov, výroba nových typov plazmových lúčnych lúčov, plazmové monitory, vákuová technológia, metalurgia a iné.



iónový motor pre vesmírne lode

Presun vedcov z fúzie do iných oblastí výskumu hrá dôležitú úlohu pri šírení vedeckých poznatkov. Toto medziodborové prelínanie je motorom vedecko-technologického rozvoja v Európe.





Odkazy

Ďalšia literatúra:

Towards a European Strategy for the Security of Energy Supply, Green Paper, European Commission, COM (2000)769

http://europa.eu.int/comm/energy_transport/en/lpi_lv_en1.html

Internetové stránky:

http://europa.eu.int/comm/research/energy/fu/fu_en.html

<http://www.efda.org>

<http://www.jet.efda.org>

<http://www.iter.org>

<http://www.fusion-eur.org>

<http://www.eiroforum.org>

Kontaktné adresy pre ďalšie informáci:

R.Antidormi

European Commission

Directorate General RTD J6 Fusion Association Agreements

75 rue Montoyer B-1049 Brussels - Belgium

tel: +32 229 98899 - fax: +32 229 64252

e-mail: rosa.antidormi@cec.eu.int

http://europa.eu.int/comm/research/energy/fu/fu_en.html

+++++

PREDAJ A PREDPLATENIE PUBLIKÁCIÍ

Platené publikácie, ktoré vydáva Úrad pre úradné publikácie, môžete dostať v našich predajných kanceláriách na celom svete.

Ako treba postupovať, aby ste získali niektorú z našich publikácií?

Zadovážte si zoznam našich predajných kancelárií, vyberte si kanceláriu, ktorá Vám najviac vyhovuje a zašlite na jej adresu objednávku.

Ako si zadovážite zoznam predajných kancelárií?

- Potrebnú informáciu nájdete na internetových stránkach Úradu pre úradné publikácie <http://publications.eu.int/>
- Zoznam si môžete objednať faxom na čísle (352) 2929-42758 a bude Vám zaslaný v tlačenej verzii.

Európska komisia

Výskum fúzie, budúceho zdroja energie pre Európu

Luxemburg: Kancelária pre oficiálne publikácie Európskeho spoločenstva

2005 — 40 strán — formát A5, 14,8 X 21,0 cm

ISBN 92-894-7730-X

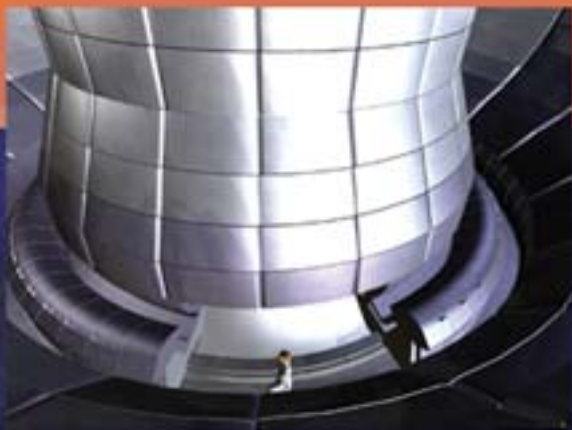
O náučnom filme „Stvoritelia hviezd“



Krátky 8-minútový film „Stvoritelia hviezd“ opisuje ITER, veľké experimentálne zariadenie – ďalší krok na ceste k fúznej energii – ktoré bude postavené v rámci medzinárodnej spolupráce. Virtuálna realita umožní divákovi získať vizuálny dojem o tomto obrovskom projekte. Na výstave Fusion Expo je možné sledovať film v 3D pomocou polarizačných okuliarov. Priložená dvojrozmerná verzia nevyžaduje špeciálne okuliare.

Film vznikol v laboratóriách Centre de Recherches en Physique des Plasmas, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (CH) vďaka finančnej podpore Riaditeľstva pre výskum pri Európskej komisii. Animáciu zabezpečilo štúdio Digital Studios SA v Paríži na základe počítačového návrhu ITER-u.





8th ENERGY FILM
FESTIVAL
LAUSANNE 2001

Grand Prix
du Festival



Scénario
Lionel Lantier et
Jean-Pierre

Réalisateur

Producteur

Producteur

Co-producteur

The Steamers

Lionel Lantier, Paris, France

Paris - Jean-Pierre Lantier, Suisse
et Andrew Saut, Paris, France

Association Europe-Continentale Suisse,
(2001-01), Lausanne, Suisse

Association de la Ville de
Lausanne
Suisse

Pri rokovaní o vedeckom programe Euratomu Rada ministrov vyhlásila:

‘V druhej polovici storočia by fúzia mohla prispieť k výrobe environmentálne prijateľnej elektrickej energie vo veľkom rozsahu. Výsledky dosiahnuté pri doterajšom výskume fúzie predstavujú východisko pre ďalší intenzívny rozvoj smerom k fúznej elektrárni.’

Táto brožúra opisuje výskum riadenej fúzie a jeho koordináciu v Európe. Výsledky výskumu budú zhmotnené v experimentálnom zariadení novej generácie, ITER, ktoré má fúzii vydláždziť cestu do druhej polovice 21. storočia. V tomto období bude riadená fúzia významným svetovým zdrojom energie.

Informácie v brožúre boli získané z údajov o výskumných aktivitách v rámci európskeho fúzneho programu.



Úrad pre publikácie

