SLOVENSKÁ REPUBLIKA

(19) **SK**

ÚRAD
PRIEMYSELNÉHO
VLASTNÍCTVA
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

PATENTOVÝ SPIS

(11) Číslo dokumentu:

287703

(21) Číslo prihlášky: **1296-2003**
(22) Dátum podania prihlášky: **18. 3. 2002**
(24) Dátum nadobudnutia účinkov patentu: **6. 6. 2011**
Vestník ÚPV SR č.: **6/2011**
(31) Číslo prioritnej prihlášky: **60/277 374, 60/297 086, 10/076 793**
(32) Dátum podania prioritnej prihlášky: **19. 3. 2001, 8. 6. 2001, 14. 2. 2002**
(33) Krajina alebo regionálna organizácia priority: **US, US, US**
(40) Dátum zverejnenia prihlášky: **5. 10. 2004**
Vestník ÚPV SR č.: **10/2004**
(47) Dátum sprístupnenia patentu verejnosti: **23. 5. 2011**
(62) Číslo pôvodnej prihlášky v prípade vylúčenej prihlášky:
(67) Číslo pôvodnej prihlášky úžitkového vzoru v prípade odbočenia:
(86) Číslo podania medzinárodnej prihlášky podľa PCT: **PCT/US02/08370**
(87) Číslo zverejnenia medzinárodnej prihlášky podľa PCT: **WO02/082873**
(96) Číslo podania európskej patentovej prihlášky:

(13) Druh dokumentu: **B6**

(51) Int. Cl. (2011.01):

G21B 1/00
G21D 7/00
H05H 1/00

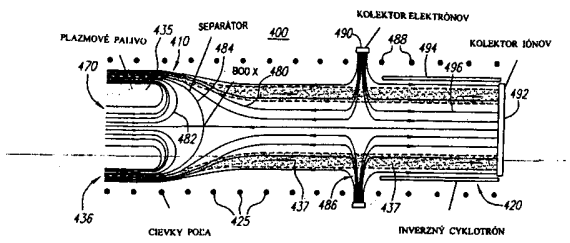
(73) Majiteľ: **THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA, Oakland, CA, US;**
UNIVERSITY OF FLORIDA RESEARCH FOUNDATION, INC., Gainesville, FL, US;

(72) Pôvodca: **Rostoker Norman, Irvine, CA, US;**
Monkhorst Hendrik J., Gainesville, FL, US;

(74) Zástupca: **PATENTSERVIS BRATISLAVA, a. s., Bratislava , SK;**

(54) Názov: **Postup premeny energií fúznych produktov na elektrickú energiu a inverzný konvertor cyklotrónovej energie**

(57) Anotácia:
Systém a prístroj na magnetickú topológiu s obráteným poľom (FRC) a premenu produktov fúzie priamo na elektrickú energiu. Plazmové ióny sú prednostne magneticky zadržané v FRC, zatiaľ čo elektróny plazmy sú elektrostaticky zadržané v hlbokej energetickej jame, vytvorenej vyladením zvonka pôsobiaceho magnetického poľa. V tejto konfigurácii majú ióny a elektróny vhodnú hustotu a teplotu, takže pri zrážkach dochádza k ich fúzii jadernou silou, čím vznikajú produkty fúzie vychádzajúce v tvare kruhového lúča. Energia produktov fúzie klesá súčasne s ich pohybom po špirále okolo elektrónov inverzného cyklotrónového konvertora. Výhodné je, že medzi fúzne palivové plazmy, ktoré možno použiť pre tento systém zadržania a premeny energie, patria pokročilé typy palív (aneutrónové palivá).



SK 287703 B6

Oblasť techniky

Vynález sa všeobecne týka oblasti fyziky plazmy, najmä postupov a prístrojov na zadržanie plazmy, umožňujúce jadernú fúziu, a na premenu energie z produktov na elektrickú energiu.

Doterajší stav techniky

Fúzia je proces, v ktorom sa spoja dve ľahké jadrá, aby vytvorili ťažšie jadro. Pri fúzii sa uvoľňuje veľká energia vo forme rýchle sa pohybujúcich častíc. Pretože jadrá atómu sú kladne nabité (obsahujú protóny), pôsobí medzi nimi odpudivá alebo Coulombova elektrostatická sila. Na vyvolanie fúzie dvoch jadier je potrebné túto odpudivú silu prekonať, k čomu dôjde, ak sa k sebe dve jadrá veľmi priblížia a jadrové sily krátkeho rozsahu dostatočne vzrastú, aby prekonali Coulombovu silu a generovali jadrovú fúziu. Energia potrebná na to, aby jadrá prekonali Coulombovu bariéru, vzniká z ich tepelnej energie, ktorá musí byť značne vysoká. Fúziu je možné napríklad zaznamenať, ak je teplota aspoň rádovo 10^4 eV, čo zodpovedá približne 100 miliónom Kelvinov. Hodnota fúznej reakcie je funkciou teploty a vyznačuje sa veličinou, zvanou reaktivita. Napríklad reaktivita reakcie D-T má široký vrchol v rozmedzí 30 keV a 100 keV.

Typická fúzna reakcia prebieha nasledovne:

$$D + D \rightarrow He^3\ (0{,}8\ MeV) + n(2{,}5\ MeV)$$
$$D + T \rightarrow \alpha\ (3{,}6\ MeV) + n(14{,}1\ MeV)$$
$$D + He^3 \rightarrow He^3\ (3{,}7\ MeV) + p(14{,}7\ MeV)\ a$$
$$p + B^{11} \rightarrow 3\alpha(8{,}7\ MeV),$$

kde D označuje deuterium, T tritium, α je jadro hélia, n je neutrón, p je protón, He je hélium a B^{11} je bór-11. Čísla v zátvorkách pri každej rovnici označujú kinetickú energiu produktov fúzie.

Prvé dve uvedené reakcie – reakcie D-D a D-T - sú neutrónové, čo znamená, že väčšina energie produktov fúzie sa prenáša rýchlymi neutrónmi.

Nevýhoda neutrónových reakcií spočíva v tom, že

1. tok rýchlych neutrónov spôsobuje veľa problémov vrátane štrukturálneho poškodenia stien reaktora a vysokého stupňa rádioaktivity pre väčšinu stavebných materiálov,
2. energia rýchlych neutrónov sa získava premenou ich tepelnej energie na elektrickú energiu, čo je veľmi neefektívne (účinnosť je menšia ako 30 %).

Výhodou neutrónových reakcií je:

1. vrchol ich aktivity nastáva pri relatívne nízkej teplote,
2. ich straty v dôsledku radiácie sú pomerne nízke, pretože atómové číslo deutéria a tritia je 1.

Produkty reakcie v ďalších dvoch rovniciach – D-He^3 a p-B^{11} - sa nazývajú pokročilé typy palív. Ich fúziou sa nevytvárajú rýchle neutróny ako v prípade neutrónových reakcií, ale nabité častice. Jedna z výhod týchto pokročilých typov palív spočíva v tom, že vytvárajú omnoho menej neutrónov, a preto toľko netrpia s tým spojenými nevýhodami. Pri D-He^3 vznikajú niektoré rýchle neutróny sekundárnymi reakciami, ale tieto neutróny generujú len 10 % energie produktov fúzie. Reakcia p-B^{11} je bez rýchlych neutrónov a vytvára určité pomalé neutróny, vznikajúce zo sekundárnych reakcií, čo však spôsobuje oveľa menej problémov. Ďalšia výhoda pokročilých typov spočíva v tom, že ich fúzne produkty obsahujú nabité častice, ktorých kinetická energia môže byť priamo premeniteľná na elektrickú energiu. Vhodným postupom priamej premeny energie je možné veľmi efektívne zhromaždiť energiu pokročilých typov palív ako produktov fúzie, aj vo výške presahujúcej 90 %.

Pokročilé typy palív však majú aj nevýhody. Patria sem napríklad vyššie atómové čísla pokročilých typov palív (2 pre He^3 a 5 pre B^{11}). Preto sú aj ich straty žiarením vyššie ako pri neutrónových reakciách. Pri pokročilých typoch palív je taktiež oveľa ťažšie vyvolať fúziu. Vrchol ich reaktivity nastáva pri oveľa vyšších teplotách a nedosahuje takú výšku ako reaktivita D-T. Vyvolanie fúznej reakcie pri pokročilých typoch palív tak vyžaduje uvedenie do stavu vyššej energie, kde je ich reaktivita významná. Aby teda mohli byť pokročilé typy palív uvedené do vhodných podmienok pre fúziu, musia byť zadržané po dlhšiu dobu.

Doba zadržania plazmy je $\Delta t = r^2/D$, kde r je minimálny rozmer plazmy a D je difúzny koeficient. Klasická hodnota difúzneho koeficientu je $D_c = a_i^2/\tau_{ie}$, kde a_i je gyrorádius iónu a τ_{ie} je doba zrážky iónu s elektrónom. Difúzia podľa klasického koeficientu difúzie sa nazýva klasický transport. Bohmov difúzny koeficient v dôsledku nestability krátkych vlnových dĺžok je $D_B = (1/16)\ ai^2\ \Omega i$, kde Ω_i je gyrofrekvencia iónu. Difúzia podľa tohto vzťahu sa nazýva anomálny transport. Pre podmienky fúzie

$D_B/D_c = (1/16)\ \Omega_i\tau_{ie} \cong 10^8$ má anomálny transport za následok omnoho kratší čas zadržania ako klasický transport. Tento vzťah určuje, aká veľká musí byť plazma vo fúznom reaktore na základe požiadavky, že doba zadržania pre dané množstvo plazmy musí byť dlhšia ako nukleárna fúzna reakcia plazmy. Vo fúznom reaktore je preto žiaducejší klasický transport, pretože umožňuje menšiu počiatočnú plazmu.

V prvých experimentoch s toroidným zadržaním plazmy bola zistená doba zadržania $\Delta t \cong r2/DB$. Vďaka

pokrokom, dosiahnutým za posledných 40 rokov, vzrástla doba zadržania na $\Delta t \cong r2/DB$. Jednou zo súčasných koncepcií fúzneho reaktora je Tokamak. Magnetické pole Tokamaku 68 a typická dráha častice 66 je znázornená na obrázku 5. V uplynulých tridsiatich rokoch sa snahy v oblasti fúzie sústredili na reaktor Tokamak, používajúci palivo D-T. Vyjadrením týchto snáh je Medzinárodný experimentálny reaktor (ITER), znázornený na obrázku 7. Nedávne experimenty s Tokamakmi ukazujú, že je možný klasický transport $\Delta t \cong r2/Dc$, pri ktorom je možné znížiť minimálny rozmer plazmy z metrov na centimetre. Pri týchto experimentoch boli vstrekované energetické lúče (50 až 10 keV), aby sa plazma zahriala na teplotu 10 až 20 keV. Pozri W. Heidbrink a G. J. Sadler, 34 Nuclear Fusion 535 (1994). Bolo zistené, že ióny energetických lúčov v týchto experimentoch sa spomaľujú a klasicky difundujú, zatiaľ čo tepelná plazma ďalej difundovala rýchlym anomálnym spôsobom. Príčinou je to, že ióny energetických lúčov majú veľký gyrorádius a samy osebe nie sú citlivé na zmeny vlnových dĺžok kratších ako gyrorádius iónu ($\lambda < ai$). Fluktuácie krátkych vlnových dĺžok majú tendenciu pohybovať sa okolo priemerných hodnôt, čím sa vo výsledku rušia. Elektróny však majú omnoho menší gyrorádius, takže reagujú na fluktuáciu a transport anomálnym spôsobom.

V dôsledku anomálneho transportu musia byť minimálne rozmery plazmy aspoň 2,8 metra. Pri zachovaní tohto rozmeru je ITER 30 metrov vysoký a priemer má 30 metrov. Je to najmenší realizovateľný D-T reaktor typu Tokamak. Pre pokročilé typy palív, ako je napríklad D-He^3 a p-B^{11}, by reaktor typu Tokamak musel byť omnoho väčší, pretože čas na nukleárnu reakciu paliva je omnoho dlhší. Reaktor Tokamak, ktorý používa D-T palivo má ďalší problém spočívajúci v tom, že väčšina energie fúznych produktov sa prenáša neutrónmi s energiou 14 meV, čo vyvoláva poškodenie žiarením a v dôsledku toku neutrónov indukuje reaktivitu takmer vo všetkých konštrukčných materiáloch. Premena ich energie na elektrickú energiu musí okrem toho prebiehať ako tepelný proces, ktorého účinnosť nepresahuje 30 %.

Ďalšou navrhovanou konfiguráciou je reaktor so zrážkou lúčov. V reaktore so zrážkou lúčov je okolitá plazma bombardovaná lúčmi iónov. Lúče obsahujú ióny s energiou, ktorá je omnoho vyššia ako pri tepelnej plazme. Generovanie vhodných fúznych reakcií v tomto type reaktora je nemožné, pretože okolitá plazma iónové lúče spomaľuje. Boli predložené rôzne návrhy, ako tento problém zredukovať a maximalizovať počet jadrových reakcií.

Napríklad patent USA číslo 4065351, autorom ktorého je Jassby a kol., opisuje postup vytvorenia proti sebe sa pohybujúcich zrážajúcich sa lúčov deuterónov a tritónov v toroidnom systéme. V patente USA číslo 4057462, autorom ktorého je Jassby a kol., je vstrekovaná elektromagnetická energia na vyrovnanie účinkov plazmatickej rovnováhy, vzniknutej na jednom z druhov iónov. Toroidný systém je označený ako Tokamak. V patente USA číslo 4894199, ktorého autorom je Rostoker, sú lúče deutéria a tritia vstrekované a zachytávané rovnakou priemernou rýchlosťou ako pri Tokamaku, zrkadlené alebo spracované v zrkadlovo obrátenej konfigurácii. Studená okolitá plazma má nízku hustotu s jedným cieľom – zachytávať lúče. Lúče reagujú, pretože majú vysokú teplotu, a spomaľovanie je spôsobené najmä elektrónmi, ktoré doprevádzajú vstrekované ióny. Elektróny sú zahrievané iónmi a v tomto prípade je spomaľovanie minimálne.

V žiadnom z týchto zariadení však nehrá úlohu rovnovážne elektrické pole. Ďalej v žiadnom z nich nedochádza k pokusu zredukovať anomálny transport a dokonca sa o tomto transporte ani neuvažuje.

Iné patenty uvažujú o elektrostatickom zadržaní iónov a v niektorých prípadoch aj o magnetickom zadržaní elektrónov. Patrí sem patent USA číslo 3 258 402 a patent USA číslo 3 386 883, autorom ktorých je Farnsworth, ktoré opisujú elektrostatické zadržanie iónov a inertné zadržanie elektrónov, patent USA číslo 3 530 036, autorom ktorého je Hirsch a kol., a patent USA číslo 3 530 497, autorom ktorého je Hirsch, ktoré sú podobné myšlienkam Farnswortha, patent USA číslo 4 233 537, autorom ktorého je Limpaecher, ktorý opisuje elektrostatické zadržanie iónov a magnetické zadržanie elektrónov s viacpólovými odrazovými stenami s vrcholmi a patent USA číslo 4 826 646, autorom ktorého je Bussard, ktorý je podobný patentu Limpaechera, a zaoberá sa bodovými vrcholmi. Žiaden z týchto patentov neuvažuje o elektrostatickom zadržaní elektrónov, ani o magnetickom zadržaní iónov. Hoci existuje veľa výskumných projektov o elektrostatickom zadržaní iónov, v žiadnom z nich sa nepodarilo generovať požadované elektrostatické pole, aby ióny mali požadovanú hodnotu pre fúzny reaktor. A konečne žiaden z uvedených patentov nerozoberá magnetickú topológiu konfigurácie s obráteným poľom.

Konfigurácia s obráteným poľom (Field Reversed Configuration, FRC) bola objavená náhodne okolo roku 1960 v Námornom výskumnom laboratóriu (Naval Research Laboratory) počas experimentov v oblasti azimutálneho pincha (theta pinch). Typická technológia FRC, v ktorej má vnútorné magnetické pole obrátený smer, je znázornená na obrázkoch 8 a 10 a dráhy častíc vo FRC sú znázornené na obrázkoch 11 a 14. V Spojených štátoch a v Japonsku získalo podporu veľa výskumných programov v oblasti FRC. O teórii a experimentoch vo výskume FRC v rokoch 1960 až 1988 bol vypracovaný komplexný prehľad. Pozri M. Tuszewski, 28 *Nuclear Fusion* 2033 (1988). Biela kniha o vývoji FRC opisuje výskum v roku 1996 a uvádza odporúčanie pre ďalší výskum, pozri L. C. Steinhauer et al., 30 *Fusion Technology* 116 (1996). Do tohto času bola pri experimentoch s FRC táto konfigurácia vytváraná metódou theta pinch. Použitím uvedenej metódy nesú polovicu prúdu ióny a polovicu elektróny, a preto v plazme vzniká zanedbateľné elektrostatické pole a nedochádza tu k elektrostatickému zadržaniu. Ióny a elektróny v týchto FRC boli zadržané magneticky.

Takmer vo všetkých experimentoch s FRC sa predpokladá existencia anomálneho transportu. Pozri napríklad Tuszewski, začiatok kapitoly 1.5.2, strana 2072.

Preto je potrebné vytvoriť fúzny systém so zadržujúcim systémom, ktorý bude mať tendenciu podstatne znížiť alebo celkom vylúčiť anomálny transport iónov a elektrónov a poskytnúť systém tepelnej premeny energie, ktorý s vysokou účinnosťou premieňa energiu fúznych produktov na elektrickú energiu.

Podstata vynálezu

Vynález sa týka systému, ktorý podporuje riadenú fúziu v magnetickom poli s topológiou obráteného poľa a priamou premenou energií produktov fúzie na elektrickú energiu. Systém, tu označovaný ako systém generovania plazmaelektrickej energie (PEG), obsahuje prednostne fúzny reaktor, ktorý má zadržujúci systém, ktorý má tendenciu podstatne redukovať alebo eliminovať anomálny transport iónov a elektrónov. Systém PEG okrem toho obsahuje systém premeny energie, spojený s reaktorom, ktorý priamo premieňa s vysokou efektivitou energiu produktu fúzie na elektrickú energiu.

V jednom inovačnom aspekte vynálezu je možné anomálny transport pre ióny aj elektróny podstatne zredukovať alebo celkom eliminovať. Anomálny transport iónov je možné eliminovať magnetickým zadržaním iónov v magnetickom poli v konfigurácii s obráteným poľom (FRC). Pre elektróny je možné vyhnúť sa anomálnemu transportu energie vyladením zvonka pôsobiaceho magnetického poľa, aby vzniklo silné magnetické pole, ktoré bude elektrostaticky uzatvárať elektróny do hlbokej potenciálovej jamy. V dôsledku uvedeného je možné pri tomto prístroji použiť fúznu palivovú plazmu, proces sa teda neobmedzuje na neutrónové palivá, ale zahŕňa tiež pokročilé alebo aneutrónové palivá, čo je výhodné. Pre neutrónové palivá je energia fúznej reakcie takmer úplne vo forme nabitých častíc, to znamená energetických iónov, s ktorými je možné manipulovať v magnetickom poli a ktoré v závislosti od paliva vyvolávajú len malú alebo nulovú rádioaktivitu.

V inom inovačnom aspekte vynálezu sa používa systém priamej premeny energie na premenu kinetickej energie fúznych produktov priamo na elektrickú energiu spomalením nabitých častíc prechádzajúcich elektromagnetickým poľom. Je výhodné, ak má systém priamej premeny energie podľa vynálezu takú účinnosť, toleranciu energie častíc a schopnosť elektrónov meniť frekvenciu a fázu fúzneho výstupu v hodnote asi 5 MHz, ktorá je vhodná pre frekvenciu vonkajšej napäťovej mriežky 60 Hz.

V preferovanom uskutočnení obsahuje zadržujúci systém plazmy pre fúzny reaktor komoru, generátor magnetického poľa na pôsobenie magnetického poľa v smere pozdĺž hlavnej osi a kruhovú plazmatickú vrstvu, obsahujúcu cirkulujúci zväzok iónov. Ióny kruhovej vrstvy plazmatického lúča sú zadržiavané prevažne v komore magnetickou silou v rámci dráh a elektróny sú zadržiavané v elektrostatickej jame. V jednom aspekte preferovaného uskutočnenia obsahuje generátor magnetického poľa cievku s prúdom. Systém prednostne ďalej obsahuje zrkadlové cievky pri okrajoch komory, ktoré zvyšujú pôsobiace magnetické pole na koncoch komory. Systém tiež môže obsahovať vstrekovač lúčov na vstrekovanie neutralizovaného iónového lúča do pôsobiaceho magnetického poľa, pričom lúč vstupuje do dráhy v dôsledku sily, vyvolanej pôsobiacim magnetickým poľom. V inom aspekte preferovaných uskutočnení vytvára systém magnetické pole s topológiou pole s obrátenou konfiguráciou.

V inom preferovanom uskutočnení obsahuje systém premeny energie inverzné cyklotrónové konvertory (ICC), pripojené k opačným koncom fúzneho reaktora. ICC majú tvar dutého valca, tvoreného niekoľkými, prednostne štyrmi alebo viacerými polovalcovitými elektródami s malými priamymi medzerami medzi sebou. Na elektródy sa striedavo aplikuje oscilačný potenciál. Elektrické pole E v ICC má štruktúru s niekoľkými pólmi, stráca sa na osiach súmernosti a rastie lineárne s polomerom. Maximálna hodnota je v medzere.

ICC obsahuje okrem toho generátor magnetického poľa na pôsobenie jednotného jednosmerného magnetického poľa v smere prevažne opačnom na smer systému zadržania fúzmeho reaktora. Na konci vzdialenejšom od energetického jadra fúzneho reaktora obsahuje ICC kolektor iónov. Medzi energetickým jadrom a ICC je symetrický magnetický vrchol, pričom magnetické pole zadržujúceho systému sa zmenšuje s magnetickým poľom ICC. Okolo magnetického vrcholu je kolektor elektrónov kruhového tvaru elektricky pripojený ku kolektoru iónov.

V ďalšom uskutočnení vznikajú jadrá produktu reakcie a elektróny, neutralizujúce náboj ako kruhové lúče z obidvoch koncov energetického jadra reaktora s hustotou, pri ktorej magnetický vrchol oddeľuje elektróny a ióny v dôsledku rozdielu ich energií.

Elektróny postupujú po siločiarach magnetického poľa až ku kolektoru elektrónov a ióny prechádzajú vrcholom, kde sa trajektória iónov zmení na špirálovitý tvar, sledujúci ICC. Ako sa ióny pohybujú po špirále pozdĺž elektród, pripojených k rezonančnému obvodu, uvoľňuje sa z nich energia. Strata perpendikulárnej energie je najväčšia pre ióny s najvyššou energiou, ktoré spočiatku obiehajú v blízkosti elektród, kde je elektrické pole najsilnejšie.

Ďalšie aspekty a vlastnosti vynálezu budú jasné z nasledujúceho opisu spoločne so sprievodnými výkresmi.

Prehľad obrázkov na výkrese

Preferované uskutočnenia sú znázornené ako príklad a neslúžia ako obmedzenie vynálezu. Ilustrované sú obrázkami sprievodných výkresov, v ktorých analogické vzťahové značky označujú analogické komponenty. Obrázok 1 znázorňuje príklad zadržujúcej komory podľa vynálezu; obrázok 2 znázorňuje magnetické pole FRC; obrázky 3A a 3B znázorňujú diamagnetický smer a náprotivný smer FRC; obrázok 4 znázorňuje systém so zrážkou lúča podľa vynálezu; obrázok 5 znázorňuje dráhu betatrónu; obrázky 6A a 6B znázorňujú magnetické pole a smer gradientového driftu vo FRC; obrázky 7A a 7B znázorňujú elektrické pole a smer driftu *E x B* vo FRC; obrázky 8A, 8B a 8C znázorňujú driftové dráhy iónov; obrázky 9A a 9B znázorňujú Lorentzovu silu na koncoch FRC; obrázky 10A a 10B znázorňujú vyladenie elektrického poľa a elektrický potenciál v systéme so zrážkou lúča; obrázok 11 znázorňuje Maxwellovo rozdelenie; obrázky 12A a 12B znázorňujú prechod od dráh betatrónu k driftovým dráham v dôsledku zrážok medzi iónmi vo veľkom uhle; obrázok 13 znázorňuje dráhy betatrónu A, B, C a D, ak sa uvažuje o zrážkach elektrónov s iónmi v malom uhle; obrázok 14 znázorňuje neutralizovaný iónový lúč, ktorý je pred vstupom do zadržujúcej komory elektricky polarizovaný; obrázok 15 je čelný pohľad na neutralizovaný iónový lúč pri kontakte s plazmou v zadržujúcej komore; obrázok 16 znázorňuje schematický bokorys zadržujúcej komory podľa preferovaného uskutočnenia štartovacej procedúry; obrázok 17 znázorňuje schematický bokorys podľa ďalšieho preferovaného uskutočnenia štartovacej procedúry; obrázok 18 znázorňuje stopy B-sondy, označujúce vytvorenie FRC; obrázok 19A znázorňuje parciálny systém generovania plazma-elektrickej energie, obsahujúcej fúzny reaktor so zrážkou lúčov, spojený s priamym inverzným cyklotrónovým konvertorom; obrázok 19B znázorňuje koncový pohľad na inverzný cyklotrónový konvertor z obrázka 19A; obrázok 19C znázorňuje dráhu iónov v inverznom cyklotrónovom konvertore; obrázok 20A znázorňuje parciálny systém generovania plazma-elektrickej energie, obsahujúcej fúzny reaktor so zrážkou lúča, spojený s iným uskutočnením inverzného cyklotrónového konvertora; obrázok 20B znázorňuje koncový pohľad na inverzný cyklotrónový konvertor z obrázka 20A; obrázok 21A znázorňuje dráhu častice v bežnom cyklotróne; obrázok 21B znázorňuje oscilujúce elektrické pole; obrázok 21C znázorňuje meniacu sa energiu zrýchľujúcej sa častice; obrázok 22 znázorňuje azimutálne elektrické pole v medzerách medzi elektródami ICC, ktoré podstupuje ión s uhlovou rýchlosťou; obrázok 23 znázorňuje zaostrovacie štvorpólové párové šošovky; obrázky 24A a 24B znázorňujú pomocný systém magnetického poľa a cievky; obrázok 25 znázorňuje reaktor s výkonom 100 MW; obrázok 26 znázorňuje pomocné vybavenie reaktora; obrázok 27 znázorňuje plazma-propulzný systém.

Príklady uskutočnenia vynálezu

Ako ukazujú obrázky, systém generovania plazma-elektrickej energie podľa vynálezu prednostne zahŕňa fúzny reaktor so zrážkou lúčov, pripojený k systému priamej premeny energie. Ako je uvedené, ideálny fúzny rektor rieši problém anomálneho transportu iónov aj elektrónov. Pri riešení problému anomálneho transportu sa tu využíva zadržujúci systém s magnetickým poľom s konfiguráciou s prevráteným magnetickým poľom (FRC). Anomálny transport iónov je eliminovaný magnetickým zadržaním vo FRC takým spôsobom, že väčšina iónov má veľkú, neadiabatickú dráhu, vďaka čomu sú necitlivé na krátkovlnné fluktuácie, ktoré vyvolávajú anomálny transport adiabatických iónov. Najmä existencia oblasti vo FRC, kde magnetické pole mizne, umožňuje získať plazmu s väčšinou neadiabatických iónov. Pre elektróny sa anomálnemu transportu energie možno vyhnúť vyladením zvonka pôsobiaceho magnetického poľa, aby vzniklo silné elektrické pole, ktoré elektróny elektrostaticky uzatvorí v hlbokej potenciálovej jame.

Pri súčasnom zadržujúcom prístroji je možné používať fúznu palivovú plazmu a procesy potom nie sú obmedzené na neutrónové palivá, ako je D-D (deutérium-deutérium), alebo D-T (deutérium – tritium), ale výhodné je, že tiež zahŕňajú pokročilé alebo aneutrónové palivá, ako je D-He^3 (deutérium-hélium-3) alebo *p*-B^{11} (vodík-bór-11). (Diskusia o pokročilých typoch palív pozri R. Feldbacher a M. Heindler, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A271* (1988) JJ-64 (North Holland Amsterdam). Pre takéto aneutrónové palivá je energia fúznej reakcie takmer celá vo forme nabitých častíc, to znamená energetických iónov, s ktorými je možné manipulovať v magnetickom poli a v závislosti od paliva vyvolávajú nízku alebo nulovú rádioaktivitu. Reakcia D-HE^3 vytvára ión H a ión He^4 s energiou 18,2 MeV, zatiaľ čo reakcia *p*-B^{11} vytvorí tri ióny He^4 a energiu 8,7 MeV. Na základe teoretického modelovania pre fúzne zariadenie využívajúce aneutrónové palivá môže byť účinnosť premeny výstupnej energie až v hodnote 90 %, ako to opisuje K. Yoshikawa, T. Noma a Y. Yamamoto napr. v práci Fusion Technology, 19, 870 (1991). Takáto účinnosť dramaticky zvyšuje vyhliadky aneutrónovej fúzie v nastaviteľnej (1 až 1000 MW) kompaktnej a nízkonáklа-

dovej konfigurácii.

V procese priamej premeny energie podľa vynálezu môžu byť nabité častice produktov fúzie spomalené a ich kinetická energia premenená priamo na elektrickú energiu. Je výhodné, ak má systém priamej premeny energie podľa vynálezu takú účinnosť, toleranciu energie častíc a schopnosť elektrónov meniť frekvenciu a fázu fúzneho výstupu v hodnote asi 5 MHz, aby bola vhodná pre frekvenciu vonkajšej napäťovej mriežky 60 Hz.

Fúzny zadržiavajúci systém

Obrázok 1 znázorňuje preferované uskutočnenie zadržujúceho systému 300 podľa vynálezu. Zadržujúci systém 300 obsahuje stenu komory 605, ktorá tu vymedzuje zadržujúcu komoru 310. Komora 310 má prednostne tvar valca s hlavnou osou 315 pozdĺž stredu komory 310. Na aplikáciu tomto zadržujúceho systému 300 na fúzny reaktor je potrebné vytvoriť v komore 310 vákuum alebo podmienky blížiace sa k vákuu. Koncentricky s hlavnou osou 315 je cievka s tokom betatrónov 320 umiestnená v komore 310. Cievka s tokom betatrónov 320 obsahuje médium vodiace elektrický prúd okolo dlhej cievky, ako je znázornené, ktoré prednostne obsahuje paralelné vnútorné vinutie niekoľkých samostatných cievok, najlepšie paralelné vinutie približne štyroch samostatných cievok, tvoriacich dlhú cievku. Odborníci budú vedieť, že prúd prechádzajúci cievkou s tokom betatrónov 320 bude v betatrónovej cievke 320 vyvolávať magnetické pole, a to hlavne v smere hlavnej osi 315.

Okolo vonkajšej časti steny komory 305 je vonkajšia cievky 325. Vonkajšia cievka 325 vytvára relatívne stále magnetické pole, ktorého tok je v podstate rovnobežný s hlavnou osou. Toto magnetické pole je azimutovo symetrické. Aproximácia, že magnetické pole je vplyvom vonkajšej cievky konštantné a rovnobežné s osou 315, platí najpresnejšie smerom od koncov komory 310. Na každom konci komory 310 je zrkadlová cievka 330. Zrkadlové cievky 330 vytvárajú v komore 310 na každom konci zosilnené magnetické pole, čím ohýbajú siločiary magnetického poľa na každom konci smerom dovnútra (pozri obrázok 8 a 10). Ako je vysvetlené, tento ohyb siločiar poľa smerom dovnútra pomáha udržiavať plazmu 335 v zadržujúcej oblasti v komore 310 všeobecne medzi zrkadlovými cievkami 330 tak, že ju odtlačuje od koncov, kde môže uniknúť zo zadržujúceho systému 300. Zrkadlové cievky 330 možno upraviť tak, aby vytvárali magnetické pole zosilnené na koncoch, rôznymi postupmi známymi v odbore, napríklad zvýšením počtu vinutí v zrkadlových cievkach 330, zväčšením prúdu pretekajúceho zrkadlovými cievkami 330 alebo prekrytím zrkadlových cievok 330 vonkajšou cievkou 325.

Vonkajšia cievka 325 a zrkadlové cievky 330 sú znázornené na obrázku 1, kde sú mimo komory 305, môžu však byť vnútri komory 310. Ak je stena komory 305 z vodivého materiálu, ako je kov, môže byť výhodné umiestniť cievky 325, 330 do steny komory 305, pretože doba, ktorú magnetické pole potrebuje na difúziu stenou 305, môže byť relatívne dlhá, a systém 300 tak môže reagovať pomaly. Obdobne aj komora 310 môže mať tvar dutého valca, pričom komora 305 bude tvoriť dlhý kruhový prstenec. V takomto prípade by cievka s tokom betatrónov 320 mohla byť použitá zvonka pri stene komory 305 v strede tohto kruhového prstenca. Vnútorná stena tvoriaca stred kruhového prstenca môže byť prednostne z nevodivého materiálu, ako je sklo. Ako bude zrejmé, komora 310 musí mať dostatočnú veľkosť aj tvar, aby umožňovala rotáciu cirkulujúceho plazmového lúča alebo vrstvy 335 okolo hlavnej osi 315 v danom polomere.

Stena komory 305 môže byť z materiálu, ktorý má vysokú magnetickú permeabilitu, ako je napríklad oceľ. V takomto prípade môže stena komory 305 následkom vzniklých protiprúdov v materiáli pomáhať udržiavať magnetický tok, aby z komory 310 neunikol, tým....., a „stláčať" ho. Keby stena komory bola zhotovená z materiálu s nízkou magnetickou permeabilitou, ako je napríklad plexisklo, bolo by potrebné mať ďalšie zariadenie na zadržanie magnetického toku. V takomto prípade by mohol byť vytvorený rad plochých oceľových krúžkov v uzatvorenej slučke. Tieto krúžky, známe v odbore ako obmedzovače toku, by boli vo vonkajších cievkach 325, ale mimo cirkulujúceho plazmového lúča 335. Tieto obmedzovače toku by ďalej boli pasívne alebo aktívne, pričom aktívne obmedzovače toku by boli napájané vopred stanoveným prúdom, aby viac napomáhali zadržaniu magnetického toku v komore 310. Inak by ako obmedzovače toku mohli slúžiť vonkajšie cievky.

Ako je ďalej podrobnejšie vysvetlené, cirkulujúci plazmový lúč 335 obsahujúci nabité častice, môže byť zadržaný v komore 310 Lorentzovou silou, vyvolanou magnetickým poľom pôsobením vonkajšej cievky 325. Ióny v plazmovom lúči 335 sú magneticky zadržané vo veľkých betatrónových dráhach okolo siločiar toku z vonkajšej cievky 325, ktorá je rovnobežná s hlavnou osou 315. Tiež je vytvorený jeden alebo niekoľko vstrekujúcich otvorov 340 na pridávanie plazmových iónov do cirkulujúceho plazmového lúča 335 v komore 310. V preferovanom uskutočnení sú vstrekujúce otvory 340 upravené na vstrekovanie iónového lúča približne v rovnakej radiálnej polohe od hlavnej osi 315, v akej je zadržaný cirkulujúci plazmový lúč 335 (to znamená okolo neskôr opísaného nulového povrchu). Vstrekujúce otvory 340 sú ďalej upravené na vstrekovanie iónových lúčov 350 (pozri obr. 16) tangenciálne a v smere betatrónovej dráhy zadržaného plazmového lúča 335.

Pripravený je tiež jeden alebo viacej plazmových zdrojov 345 na vstrekovanie mraku neenergetickej

plazmy do komory 310. V preferovanom uskutočnení sú okolité plazmové zdroje 345 tak upravené, aby smerovali plazmu 335 k axiálnemu stredu komory 310. Bolo zistené, že smerovanie plazmy týmto spôsobom napomáha plazmu 335 lepšie zadržať a má za následok vyššiu hustotu plazmy 335 v oblasti zadržania v komore 310.

Nabité častice v FRC

Obrázok 2 znázorňuje magnetické pole FRC 70. Systém má valcovitý tvar s osou 78. V FRC sú dve oblasti magnetických siločiar: otvorená 80 a zatvorená 82. Povrch, ktorý delí obidve oblasti sa nazýva separátor 84. FRC tvorí valcovitý nulový povrch 86, v ktorom mizne magnetické pole. V centrálnej časti 88 FRC sa magnetické pole v smere osi významne nemení. Na koncoch 90 sa magnetické pole v smere osi významne mení. Magnetické pole sa pozdĺž centrálnej osi 78 obracia v FRC smer, z ktorého vzniklo označenie „obrátené" v pojme „konfigurácia s obráteným poľom" (Field Reversed Configuration, skratka FRC).

Na obrázku 3A je magnetické pole zvonka nulového povrchu 94 v prvom smere 96. Magnetické pole vnútri nulového povrchu 94 pôsobí v druhom smere 98, opačnom na prvý smer. Ak sa pohybuje ión v smere 100, pôsobiaca Lorentzova sila 30 smeruje k nulovému povrchu 94. To možno ľahko zistiť použitím pravidla pravej ruky. Pre častice, ktoré sa pohybujú v diamagnetickom smere 102, smeruje Lorentzova sila vždy k nulovému povrchu 94. Následkom tohoto javu vzniká dráha častice nazývajúca sa betatrónová dráha, ktorá je opisovaná neskôr.

Obrázok 3B znázorňuje ión pohybujúci sa v smere opačnom k diamagnetickému smeru 104. V tomto prípade pôsobí Lorentzova sila smerom od nulového povrchu 94. Následkom tohto javu vzniká dráha častice nazývajúca sa driftová dráha, ktorá je opisovaná neskôr. Diamagnetický smer pre ióny je smer opačný k diamagnetickému smeru pre elektróny a naopak.

Obrázok 4 znázorňuje prstencovitú alebo kruhovú plazmovú vrstvu 106, ktorá sa otáča v diamagnetickom smere iónov 102. Prstenec 106 je umiestnený okolo nulového povrchu 86. Magnetické pole 108 vytvorené kruhovou plazmovou vrstvou 106 v kombinácii s magnetickým poľom pôsobiacim zvonka 110 tvorí magnetické pole s topológiou FRC (topológia je znázornená na obrázku 2).

Iónový lúč, ktorý tvorí plazmovú vrstvu 106, má určitú teplotu. Rýchlosti iónov tvorí Maxwellove rozdelenie v ráme otáčajúcom sa priemernou uhlovou rýchlosťou iónového lúča. Zrážky medzi iónmi rôznych rýchlostí majú za následok fúzne reakcie. Z tohto dôvodu sa vrstva plazmového lúča alebo energetické jadro 106 nazýva systémom so zrážkou lúča.

Obrázok 5 znázorňuje hlavný typ iónových dráh v systéme so zrážkou lúča nazývaný betatrónová dráha 112. Betatrónovú dráhu 112 možno vyjadriť ako sínusovú vlnu sústredenú okolo nulového kruhu 114. Ako je vysvetlené, magnetické pole na nulovom kruhu 114 mizne. Rovina dráhy 112 je kolmá na os 78 FRC. Ióny v tejto dráhe 112 sa pohybujú od počiatočného bodu 116 v diamagnetickom smere 102. Ión v betatrónovej dráhe má dva pohyby: oscilačný v radiálnom smere (kolmom na nulový kruh 114) a translačný pozdĺž nulového kruhu 114.

Na obrázku 6A je grafické znázornenie magnetického poľa 118 v FRC. Horizontálna os grafu predstavuje vzdialenosť v centimetroch od osi FRC 78. Magnetické pole je v kilogaussoch. Ako opisuje graf, magnetické pole 118 mizne v polomere nulového kruhu 120.

Ako znázorňuje obrázok 6B, na častice pohybujúce sa blízko nulového kruhu bude pôsobiť gradient 126 magnetického poľa v smere od nulového povrchu 86. Magnetické pole zvonka nulového kruhu má prvý smer 122, zatiaľ čo magnetické pole vnútri nulového kruhu má druhý smer 124 opačný k prvému. Smer gradientového driftu je daný výsledkom násobenia $\vec{B} \times \nabla B$, kde ∇B je gradient magnetického poľa. Použitím pravidla pravej ruky možno zistiť, že smer gradientového driftu je opačný k diamagnetickému smeru nezávisle od toho, či je ión zvonka a lebo vnútri nulového kruhu 128.

Obrázok 7A je grafickým znázornením elektrického poľa 130 v FRC. Vodorovná os grafu predstavuje vzdialenosť v centimetroch od osi FRC 78. Elektrické pole je vyjadrené vo voltoch / cm. Ako ukazuje graf, elektrické pole 130 v blízkosti polomeru nulového kruhu 120 mizne.

Ako ukazuje obrázok 7B, elektrické pole ióny neobmedzuje – pôsobí v smeroch 132, 134 od nulového povrchu 86. Magnetické pole je rovnaké ako v predchádzajúcom prípade v opačných smeroch 122, 124 smerom dovnútra a von z nulového povrchu 86. Použitím pravidla pravej ruky možno zistiť, že drift $\vec{E} \times \vec{B}$ má diamagnetický smer 102 nezávisle od toho, či je ión zvonka alebo vnútri nulového povrchu 136.

Obrázky 8A a 8B ukazujú iný typ spoločnej dráhy v FRC, ktorý sa nazýva driftová dráha 138. Driftové dráhy 138 môžu byť zvonka nulového povrchu 114, ako ukazuje obrázok 8A, alebo vnútri tohto povrchu, ako ukazuje obrázok 8B. Driftové dráhy 138 rotujú v diamagnetickom smere, ak prevažuje $\vec{E} \times \vec{B}$, alebo v opačnom smere, ak dominuje gradientový drift. Driftové dráhy 138 znázornené na obrázkoch 8A a 8B rotujú od počiatočného bodu 116 v diamagnetickom smere 102.

Driftovú dráhu znázornenú na obrázku 8C si možno predstaviť ako krúžok kotúľajúci sa po relatívne väčšom kruhu. Malý kruh 142 sa otáča okolo svojej osi v zmysle 144. Kotúľa sa tiež po veľkom kruhu 146 v smere 102. Bod 140 bude v priestore opisovať dráhu obdobnú 138.

Obrázky 9A a 9B znázorňujú smer Lorenzzovej sily na koncoch FRC 151. Na obrázku 9A je znázornený ión pohybujúci sa v diamagnetickom smere 102 rýchlosťou 148 v magnetickom poli 150. Použitím pravidla pravej ruky možno zistiť, že Lorentzova sila 152 má tendenciu tlačiť ión späť do oblasti uzatvorených siločiar poľa. V tomto prípade preto Lorentzova sila 152 zadržuje ióny. Na obrázku 9B je znázornený ión pohybujúci sa v smere opačnom k diamagnetickému smeru rýchlosťou 148 v magnetickom poli 150. Použitím pravidla pravej ruky možno zistiť, že Lorentzova sila 152 má tendenciu tlačiť ión do oblasti otvorených siločiar poľa. V tomto prípade preto Lorentzova sila 152 nezadržuje ióny.

Magnetické a elektrostatické zadržanie v FRC

Plazmová vrstva 106 (pozri obr. 4) môže byť vytvorená v FRC vstreknutím energetických iónových lúčov okolo nulového povrchu 86 v diamagnetickom smere 102 iónov. (Podrobný rozbor rôznych postupov vytvárania FRC a plazmového prstenca nasleduje ďalej). V cirkulujúcej plazmovej vrstve 106 má väčšina iónov betatrónové dráhy 112 (pozri obr. 5), sú energetické a neadiabatické a sú teda necitlivé na krátkodobé fluktuácie, ktoré vyvolávajú anormálny transport.

V plazmovej vrstve 106 vzniklej v FRC a v rovnovážnych podmienkach vytvára zachovanie hybnosti vzťah medzi uhlovou rýchlosťou iónov ω_i a uhlovou rýchlosťou ω_e. Vzťah je

$$\omega_e = \omega_i [1 - \omega_i/\Omega_o] \text{, kde } \Omega_o = Z_e B_o/(m_i c) \qquad (1).$$

V rovnici 1 je Z atómové číslo iónu, m_i je hmotnosť iónu, e je náboj elektrónu, B_o je veľkosť pôsobiaceho magnetického poľa a c je rýchlosť svetla. V tejto rovnici sa vyskytujú tri voľné parametre: pôsobiace magnetické pole B_o, uhlová rýchlosť elektrónu ω_e a uhlová rýchlosť iónu ω_i. Ak sú známe dva z nich, tretí je možné určiť z rovnice 1.

Pretože plazmová vrstva 106 je tvorená vstreknutím iónových lúčov do FRC, stanoví sa uhlová rýchlosť iónov ω_i vstreknutím kinetickej energie lúča W_i, ktorá je daná rovnicou

$$W_i = 1/2 m_i V_i^2 = 1/2\ m_i (\omega_i r_o)^2 \qquad (2).$$

Tu je $V_i = \omega_i r_o$, kde V_i je rýchlosť vstrekovania iónov, ω_i je cyklotrónová frekvencia iónov a r_o je polomer nulového povrchu 86. Kinetická energia elektrónov v lúči sa neuvažuje, pretože hmotnosť elektrónu m_e je omnoho menšia ako hmotnosť iónu m_i.

Pre stálu rýchlosť vstrekovania lúča (stálu ω_i) možno pôsobiace magnetické pole B_o vyladiť tak, aby bolo možné získať rôzne hodnoty m_e. Ako bude vysvetlené, vyladením vonkajšieho magnetického poľa B_o tiež vznikajú rôzne hodnoty elektrostatického poľa vnútri plazmovej vrstvy. Táto vlastnosť vynálezu je znázornená na obrázkoch 10A a 10B. Obrázok 10A ukazuje získanie troch hodnôt elektrického poľa (vo voltoch / cm) pre rovnakú rýchlosť vstrekovania $\omega_i = 1{,}35 \times 10^7\ s^{-1}$, ale pre rôzne hodnoty pôsobiaceho magnetického poľa B_o:

Hodnota	Pôsobiace magnetické pole (B_o)	Uhlová rýchlosť elektrónu (ω_e)
154	$B_o = 2{,}77$ kG	$\omega_{e=0}$
156	$B_o = 5{,}15$ kG	$\omega_{e=0{,}625 \times 10^7\ s^{-1}}$
158	$B_o = 15{,}5$ kG	$\omega_{e=1{,}11 \times 10^7\ s^{-1}}$

Hodnoty ω_e v uvedenej tabuľke boli stanovené podľa rovnice 1. Je známe, že v rovnici 1 znamená $\omega_e > 0$, $\Omega_o > \omega_i$ a elektróny sa teda otáčajú v smere opačnom k diamagnetickému smeru. Obrázok 10B znázorňuje elektrický potenciál (vo voltoch) pre rovnaký súbor hodnôt B_o a ω_e. Horizontálna os predstavuje na obrázkoch 10A a 10B vzdialenosť od osi FRC 78, zobrazenú na grafe v centimetroch. Elektrické pole a elektrický potenciál závisí vo veľkej miere od ω_e.

Uvedené výsledky možno vysvetliť jednoducho na fyzikálnych princípoch. Keď sa ióny otáčajú v diamagnetickom smere, sú magneticky obmedzované Lorentzovou silou. To bolo znázornené na obrázku 3A. Pre elektróny, otáčajúce sa v rovnakom smere ako ióny, pôsobí Lorentzova sila v opačnom smere, takže elektróny by neboli obmedzované. Elektróny opúšťajú plazmu a následkom toho sa vytvára nadbytok kladného náboja. Tak vzniká elektrické pole, ktoré bráni ďalším elektrónom opustiť plazmu. Smer a veľkosť elektrického poľa je v rovnovážnom stave určený zachovaním momentu.

Elektrostatické pole hrá významnou úlohu v transporte elektrónov a iónov. Preto spočíva dôležitý aspekt tohto vynálezu v tom, že vnútri plazmovej vrstvy 106 vzniká silné elektrostatické pole, ktorého veľkosť je riadená hodnotou magnetického poľa B_o a môže byť ľahko ovládaná.

Ako je vysvetlené, elektrostatické pole elektróny zadržiava, ak je $\omega_e > 0$. Ako ukazuje obrázok 10B, hĺbku jamy možno zväčšiť nastavením pôsobiaceho magnetického poľa B_o. S výnimkou veľmi úzkej oblasti okolo nulového kruhu majú elektróny vždy malý gyrorádius. Preto elektróny reagujú na krátkovlnné fluktuácie anomálne veľkou difúznou rýchlosťou. Táto difúzia v podstate napomáha udržiavať potenciálovú jamu, akonáhle dôjde k fúznej reakcii. Ióny, ktoré sú produktmi fúzie, majú omnoho vyššiu energiu a opúšťajú

plazmu. Na udržanie kvázi neutrality náboja musia fúzne produkty vybrať elektróny z plazmy, čo sa deje najmä odobratím elektrónov z povrchu plazmovej vrstvy. Hustota elektrónov na povrchu plazmy je veľmi nízka a elektróny, ktoré opúšťajú plazmu s fúznymi produktmi, musia byť nahradené, inak by zmizla potenciálová jama.

Obrázok 11 znázorňuje Maxwellovo rozdelenie 162 elektrónov. Len veľmi energetické elektróny z konca 160 Maxwellovho rozdelenia môžu dosiahnuť povrchu plazmy a opustiť ho s s fúznymi iónmi. Koniec 160 rozdelenia 162 sa tak neustále vytvára zrážkami elektrón – elektrón v oblasti s vysokou hustotou pri nulovom povrchu. Energetické elektróny majú malý gyrorádius, takže vďaka anomálnej difúzii môžu dosiahnuť povrch dostatočne rýchlo, aby sa prispôsobili odchádzajúcim iónom, ktoré sú produktmi fúzie. Energetické elektróny strácajú energiu pri stúpaní v potenciálovej jame, ktorú opúšťajú s veľmi malou energiou. Hoci elektróny dokážu následkom anomálneho transportu prejsť magnetické pole rýchlo, straty anomálnej energie môžu byť eliminované, pretože sa prenáša len malé množstvo energie.

Ďalším dôsledkom potenciálovej jamy je silný chladiaci mechanizmus pre elektróny, ktorý je podobný ochladzovaniu pri vyparovaní. Aby sa napríklad mohla vyparovať voda, musí jej byť dodané latentné teplo vyparovania. Toto teplo je dodávané zvyšujúcou vodou v kvapalnom stave a okolitým médiom, ktoré potom chladne rýchlejšie ako tepelné procesy dokážu dodávať energiu. Analogicky pre elektróny je hĺbka potenciálovej jamy ekvivalentom latentného tepla vyparovania vody. Elektróny dodávajú energiu požadovanú na výstup v potenciálovej jame procesom termalizácie, ktorý obnovuje energiu na konci Maxwellovho rozdelenia, takže elektróny môžu uniknúť. Procesom termalizácie sa znižuje teplota elektrónov, pretože tento proces je omnoho rýchlejší ako akýkoľvek proces zahrievania. Dôsledkom rozdielu hmotnosti medzi elektrónmi a protónmi je doba transportu energie asi 1800-krát nižšia ako doba termalizácie elektrónu. Tento mechanizmus ochladzovania tiež znižuje radiačné straty elektrónov. To je dôležité najmä pre pokročilé typy palív, kde sú radiačné straty zvyšované iónmi palív s atómovým číslom Z väčším ako 1, $Z > 1$.

Elektrostatické pole tiež ovplyvňuje transport iónov. Väčšina dráh častíc v plazmovej vrstve 106 sú dráhy betatrónov 112. Zrážky vo veľkých uhloch, to znamená zrážky s uhlovým rozptylom 90° až 180°, môžu zmeniť betatrónovú dráhu na driftovú dráhu. Ako je opísané, smer otáčania driftovej dráhy je stanovený vzťahom medzi driftom $\overline{E} \times \overline{B}$ a gradientovým driftom. Ak prevažuje drift $\overline{E} \times \overline{B}$, otáča sa driftová dráha v diamagnetickom smere. Ak prevažuje gradientový drift, otáča sa driftová dráha v opačnom smere. To je znázornené na obrázkoch 12A a 12B. Obrázok 12A ukazuje prechod z betarónovej dráhy do driftovej dráhy následkom zrážky pod uhlom 180°, ku ktorej dochádza v bode 172. Driftová dráha sa ďalej otáča v diamagnetickom smere, pretože prevažuje drift $\overline{E} \times \overline{B}$. Obrázok 12B znázorňuje ďalšiu zrážku pod uhlom 180°, v tomto prípade je však elektrostatické pole slabé a prevažuje gradientový drift. Driftová dráha sa tak otáča v smere opačnom k diamagnetickému.

Smer otáčania driftovej dráhy určuje, či dôjde k zadržaniu alebo nie. Častica pohybujúca sa v driftovej dráhe bude mať tiež rýchlosť rovnobežnú s osou FRC. Čas, za ktorý častica prejde od jedného konca FRC k druhému, je dôsledkom jej paralelného pohybu a nazýva sa doba priechodu. Driftové dráhy dosiahnu koniec FRC v ráde doby priechodu. Ako je ukázané v súvislosti s obrázkom 9A, Lorentzova sila na koncoch FRC obmedzuje len dráhy otáčajúce sa v diamagnetickom smere. Po uplynutí doby priechodu sú ióny v driftových dráhach otáčajúce sa v opačnom smere k diamagnetickému stratené.

Tento jav je príčinou straty mechanizmu pre ióny a predpokladá sa, že existoval vo všetkých experimentoch FRC. V týchto experimentoch ióny prenášali polovicu prúdu a druhú polovicu niesli elektróny. Pri uvedených podmienkach bolo elektrické pole v plazme zanedbateľné a gradientový drift vždy prevážil nad driftom E x B. Preto boli po uplynutí doby priechodu všetky driftové dráhy vzniknuté po zrážkach pod veľkým uhlom stratené. Tieto experimenty vyvolali difúzne rýchlosti iónov, ktoré boli vyššie ako rýchlosti predpokladané na základe klasických odhadov difúzie.

V prípade silného elektrostatického poľa prevažuje drift $\overline{E} \times \overline{B}$ nad gradientovým driftom a driftová dráha sa otáča v diamagnetickom smere. To bolo uvedené v súvislosti s obrázkom 12A. Keď tieto dráhy dosiahnu konce FRC, odrazia sa pôsobením Lorentzovej sily späť do oblasti uzavretých siločiar a zostanú tak zadržané v systéme.

Elektrostatické polia v systéme so zrážkou lúčov môžu byť dostatočne silné, a preto drift $\overline{E} \times \overline{B}$ prevažuje nad gradientovým driftom. Elektrostatické pole systému by preto eliminovalo transport iónov vylúčením mechanizmu straty iónu, čo je obdobné ako kužeľ strát v zrkadlovom zariadení.

Ďalší aspekt iónovej difúzie možno odvodiť na základe zváženia účinku zrážok elektrónov a iónov pod malým uhlom na betatrónovej dráhe. Obrázok 13A znázorňuje betatrónovú dráhu 112, obrázok 13B znázorňuje tú istú dráhu 112 pri zvážení zrážok elektrónov a iónov pod malým uhlom 174, obr. 13C znázorňuje dráhu podľa obrázku 13B na čas, ktorý je desaťkrát dlhší 176, a obrázok 13D znázorňuje dráhu podľa obrázku 13B na čas dvadsaťkrát dlhší. Možno si všimnúť, že topológia betatrónových dráh sa v dôsledku zrážok elektrónov a iónov pod malým uhlom nemení, ale amplitúda ich radiálnych oscilácií s časom rastie. Dráhy znázornené na obrázkoch 13A až 13D v skutočnosti s časom rastú, čo ukazuje na klasickú difúziu.

Vytvorenie FRC

Bežné postupy užívané na vytvorenie FRC obvykle pracujú pri obrátení poľa s metódou theta pinch. Pri tejto bežne používanej metóde pôsobí magnetické pole generované vonkajšími cievkami okolo komory naplnenej neutrálnym plynom. Potom je plyn ionizovaný a magnetické pole je zmrazené v plazme. Ďalej sa rýchlo obráti prúd vo vonkajších cievkach a opačne orientované siločiary magnetického poľa sa spoja s vopred zmrazenými siločiarami, aby vznikla uzavretá topológia FRC (pozri obr. 2). Tento proces vytvárania FRC je vo veľkej miere empirický a neexistujú skoro žiadne prostriedky, ako ho riadiť. Postup je zle reprodukovateľný a následkom toho ho nemožno nijako upravovať (ladiť).

Oproti tomu postupy generovania FRC podľa vynálezu umožňujú bohatú kontrolu a proces je tak prie-hľadnejší a lepšie reprodukovateľný. FRC vytvorená postupmi podľa vynálezu môže byť vyladená a jej tvar rovnako ako ďalšie vlastnosti je možné priamo ovplyvniť manipuláciou s magnetickým poľom pôsobiacim z cievok vonkajšieho poľa 325. Vytvorením FRC postupmi podľa vynálezu možno tiež generovať elektrické pole a potenciálovú jamu postupom, ktorý je podrobne opísaný skôr. Predkladané postupy možno ľahko rozšíriť, aby akcelerovali FRC na parametre úrovne reaktora a vysokoenergetické palivové prúdy a výhodne umožňuje klasické zadržanie iónov. Postup možno ďalej využiť v kompaktnom zariadení, je veľmi robustné a ľahko sa aplikuje, čo sú veľmi žiaduce vlastnosti pre systém reaktora.

V uvedených postupoch sa vytvorenie FRC týka cirkulujúceho plazmového lúča 335. Možno zistiť, že cirkulujúci plazmový lúč 335, pretože má charakter prúdu, vytvára poloidné magnetické pole rovnako ako elektrický prúd v kruhovom drôte. V cirkulujúcom plazmatickom lúči 335 pôsobí takto indukované magnetické pole proti zvonka pôsobiacemu magnetickému poľu generovanému vonkajšou cievkou 325. Mimo plazmového lúča 335 má vnútorné magnetické rovnaký smer ako pôsobiace magnetické pole. Keď je plazmový iónový prúd dostatočne veľký, vnútorné pole prevýši pôsobiace pole a magnetické pole sa obráti dovnútra cirkulujúceho plazmového lúča 335, čím vznikne topológia FRC znázornená na obrázkoch 2 a 4.

Požiadavku na obrátenie poľa možno odhadnúť pomocou jednoduchého modelu. Uvažujme o elektrickom prúde I_p prenášaným prstencom s hlavným polomerom r_o a menším polomerom a $< < r_o$. Magnetické pole v strede prstenca v smere normály k prstencu je $B_o = 2 \pi I_p / (c\ r_o)$ .Predpokladajme, že prúd prstencom $I_p = N_p e(\Omega_o/(2\pi)$ je prenášaný N_p iónmi, ktoré majú uhlovú rýchlosť Ω_o. Pre jediný ión cirkulujúci v polomere $r_o = V_o/\Omega_o$ je $\Omega_o = eBo/m_i c$ frekvencia cyklotrónu pre vonkajšie magnetické pole B_o. Predpokladajme, že V_o je priemerná rýchlosť iónových lúčov. Obrátenie poľa je definované ako

$$B_p = N_p e\Omega_o/(r_o c) \geq 2 B_o \qquad (3),$$

z čoho vyplýva, že $N_p > 2 R_o / \alpha_i$ a

$$I_p \geq eV_o/(\pi \alpha_i) \qquad (4),$$

kde $\alpha_i = e^2/m_i c^2 = 1{,}57 \times 10^{-16}$ a energia iónového lúča je $1/2\ m_i V_o^2$. V jednorozmernom modeli je magnetické pole z plazmového prúdu $B_p = (2\pi / c)\ i_p$, kde i_p je prúd na jednotku dĺžky. Požiadavka na obrátenie poľa je $i_p > eV_o / \pi R_o \alpha_i = 0{,}225$ kA/cm, kde $B_o = 69{,}3$ G a $1/2\ m_i V_o^2 = 100$ eV. Pre model s periodickými prstencami je B_z priemerne okolo osovej súradnice $\langle B_z \rangle = (2\pi/c)\ (Ip/s)$,
kde s = vzdialenosť medzi prstencami, ak je $s = r_o$, mal by tento model rovnaké priemerné magnetické pole ako jednorozmerný model s $i_p = I_p/s$.

Kombinovaná technika s využitím lúča a betatrónu

Preferovaný postup vytvorenia FRC v zadržujúcom systéme 300, ktorý je opisovaný, sa tu ďalej označuje ako kombinovaná technika s využitím lúča a betatrónu. Tento postup kombinuje lúče plazmových iónov s nízkou energiou s akceleráciou betatrónu použitím cievky s tokom betatrónov 320.

Prvým krokom tohoto postupu je vstreknutie približne kruhovej vrstvy okolitej plazmy do komory 310 použitím okolitých plazmových zdrojov 345. Vonkajšia cievka 325 vytvára vnútri komory 310 magnetické pole, ktoré magnetizuje okolitú plazmu. V krátkych intervaloch sú iónové lúče s nízkou energiou vstrekované do komory 310 cez vstrekujúce otvory 340 naprieč vonku pôsobiacemu magnetickému poľu v komore 310. Ako je vysvetlené, sú iónové lúče zachytávané týmto magnetickým poľom v komore 310 vo veľkých betatrónových dráhach. Iónové lúče môžu byť generované iónovým akcelerátorom, ako je napríklad akcelerátor obsahujúci iónovú diódu, a Maxovým generátorom (pozri R. B. Miller, *An Introduction to the Physics of Intense Charged Particle Beams,* 1982). Ako bude odborník v odbore vedieť, vonkajšie magnetické pole bude po vstupe do komory 310 pôsobiť na vstrekovaný iónový lúč Lorentzovou silou. Požaduje sa však, aby sa iónový lúč neohýbal a nevstupoval do betatrónovej dráhy, pokiaľ nedosiahne cirkulujúci plazmový lúč 335. Na vyriešenie tohoto problému sú iónové lúče neutralizované elektrónmi a nasmerované v zásade konštantným jednosmerným magnetickým poľom ešte pred vstupom do komory 310. Ako ukazuje obrázok 14, keď je iónový lúč 350 nasmerovaný na priechod príslušným magnetickým poľom, kladne nabité ióny a záporne nabité

elektróny sa oddelia. Iónový lúč 350 sa tak následkom magnetického poľa sám elektricky polarizuje. Toto magnetické pole môže byť generované napríklad stálym magnetom alebo elektromagnetom pozdĺž dráhy iónového lúča. Po zavedení do zadržujúcej komory 310 vyvažuje výsledné elektrické pole magnetickú silu na časticiach lúča a umožňuje unášanie iónového lúča bez ohnutia. Obrázok 15 znázorňuje centrálne pohľad na iónový lúč 350 po dotyku s plazmou 335. Ako je opisované, elektróny z plazmy 335 sa pohybujú po siločiarach magnetického poľa do lúča a z lúča 350, čím klesá elektrická polarizácia lúča. Keď lúč už nie je elektricky polarizovaný, pripojí sa k cirkulujúcemu plazmovému lúču 335 v betatrónovej dráhe okolo hlavnej osi 315, ako je znázornené na obrázku 1 (pozri tiež obr. 4).

Keď plazmový lúč 335 putuje po svojej betatrónovej dráhe, pohybujúce sa ióny nesú prúd, ktorý naopak vyvoláva vnútorné poloidné magnetické pole. Na vytvorenie topológie FRC v komore 310 je nutné zvýšiť rýchlosť plazmového lúča 335, a tak zosilniť vnútorné magnetické pole, ktoré plazmový lúč 335 generuje. Keď je vnútorné magnetické pole dostatočne veľké, smer magnetického poľa v radiálnej vzdialenosti od osi 315 v plazmovom lúči 335 sa obracia a vzniká FRC (pozri obrázky 2 a 4). Možno zistiť, že na udržanie radiálnej vzdialenosti cirkulujúceho plazmového lúča 335 v betatrónovej dráhe je nutné s tým, ako sa plazmový lúč 335 zrýchľuje, zosilniť pôsobiace magnetické pole z vonkajšej cievky 325. Vzniká tak riadiaci systém na udržiavanie vhodného magnetického poľa na základe prúdu prechádzajúceho vonkajšou cievkou 325. Inak možno použiť druhú vonkajšiu cievku na vytvorenie ďalšieho pôsobiaceho magnetického poľa, ktoré je nutné na udržanie polomeru dráhy magnetického lúča pri jeho urýchľovaní.

Na zvyšovanie rýchlosti cirkulujúceho plazmového lúča 335 po dráhe slúži cievka s tokom betatrónov 320. Podľa obrázku 16 možno zistiť, že zvyšovaním prúdu prechádzajúcim cievkou s tokom betatrónov 320 vzniká podľa Ampérovho zákona v komore 310 azimutálne elektrické pole E. Kladne nabité ióny v plazmovom lúči 335 sú týmto indukovaným elektrickým poľom urýchľované, čo spôsobuje opisované obrátenie poľa. Keď sú do cirkulujúceho plazmového lúča 335 pridávané iónové lúče, ako je opisované, plazmový lúč 335 tieto lúče depolarizuje.

Na obrátenie poľa sa cirkulujúci plazmový lúč 335 prednostne urýchli na rotačnú energiu približne 100 eV, prednostne v rozsahu cca 75 eV až 125 eV. Na dosiahnutie podmienok vhodných na fúziu sa cirkulujúci plazmový lúč 335 prednostne urýchli asi na 200 keV, prednostne v rozsahu asi 100 keV až 3,3 MeV.

Vytvorenie FRC bolo úspešne demonštrované využitím kombinovanej techniky pracujúcej s lúčom a betatrónom. Kombinovaná metóda s využitím lúča a betatrónu bola experimentálne realizovaná v komore s priemerom 1 m a dĺžkou 1,5 m užitím vonkajšieho magnetického poľa do hodnoty 500 G, magnetického poľa z cievky s tokom betatrónov 320 do 5 kG a podtlaku 1,2 x 10^{-5} torr.

V experimente mala okolitá plazma hustotu 10^{13} cm^{-3} a iónový lúč bol neutralizovaný vodíkový lúč s hustotou 1,2 x 10^{13} cm^{-3}, rýchlosťou 2 x 10^{7} cm/s a s pulznou dĺžkou približne 20 μs (v polovičnej dĺžke). Bolo pozorované obrátenie poľa.

Technika s využitím betatrónu

Ďalšia preferovaná metóda vytvorenia FRC v zadržujúcom systéme 300 sa nazýva technika vytvorenia FRC s využitím betatrónu. Tento postup vychádza z priameho riadenia betatrónom indukovaného prúdu na akceleráciu cirkulujúceho plazmového lúča 335 použitím cievky s tokom betatrónov 320. Preferované uskutočnenie tohto postupu používa zadržujúci systém 300 opísaný na obrázku 1 s výnimkou toho, že nie je nutné vstreknutie iónových lúčov s nízkou energiou.

Ako je uvedené, hlavnou zložkou metódy generovania betatrónom je cievka s tokom betatrónov 320 inštalovaná v strede a okolo osi komory 310. Následkom konštrukcie s oddeleným vinutím má cievka 320 veľmi malú induktanciu a keď je pripojená na vhodný napäťový zdroj, má nízku časovú konštantu LC, ktorá umožňuje rýchly nárast prúdu v cievke 320.

Vytvorenie FRC prednostne prebieha energizáciou cievok vonkajšieho poľa 325, 330. Tým vzniká pole s axiálnym vedením a radiálnymi zložkami magnetického poľa blízko koncov na axiálne obmedzenie plazmy vstreknutej do komory 310. Akonáhle je zavedené dostatočné magnetické pole, okolité plazmové zdroje 345 sú energizované z vlastných napäťových zdrojov. Plazma vychádza z prúdov diel pozdĺž axiálneho vodiaceho poľa a mierne sa vďaka svojej teplote rozstrekuje. Keď plazma dosiahne stredovú rovinu komory 310, vzniká okolo osi spojitá kruhová vrstva studenej pomaly sa pohybujúcej plazmy.

V tomto okamihu je energizovaná cievka s tokom betatrónov 320. Rýchlo narastajúci prúd v cievke 320 vyvoláva rýchlo sa meniaci axiálny tok vnútri cievky. Vplyvom indukcie sa týmto rýchlym nárastom axiálneho toku generuje azimutálne elektrické pole E (pozri obr. 17), ktoré preniká priestorom okolo cievky s tokom. Podľa Maxwellových rovníc je toto elektrické pole priamo úmerné zmene sily magnetického toku v cievke, to znamená rýchlejší nárast prúdu v betatrónovej cievke spôsobí silnejšie elektrické pole.

Indukciou vytvorené elektrické pole E sa pripojuje k nabitým časticiam v plazme a vyvoláva elektromotorické napätie, ktoré urýchľuje častice v kruhovej plazmovej vrstve. Elektróny sú následkom svojej malej hmotnosti urýchľované ako prvé. Počiatočný prúd vytvorený týmto procesom tak vzniká najmä vďaka elektrónom. Dostatočná doba akcelerácie (okolo stoviek mikrosekúnd) však tiež nakoniec vyvolá iónový prúd.

Elektrické pole E na obrázku 17 urýchli elektróny a ióny v opačných smeroch. Akonáhle obidva druhy častíc dosiahnu svoju konečnú rýchlosť, prenáša sa prúd prakticky rovnako iónmi aj elektrónmi.

Ako je uvedené, prúd prenášaný otáčajúcou sa plazmou generuje vnútorné magnetické pole. Vytváranie skutočnej topológie FRC začína, keď sa vnútorné magnetické pole generované prúdom v plazmovej vrstve stane porovnateľným s pôsobiacim magnetickým poľom z cievok vonkajšieho poľa 325, 330. V tomto okamihu vzniká nové magnetické pole a otvorené siločiary počiatočného externe vytvoreného magnetického poľa sa začínajú uzatvárať a vytvárať povrchy toku FRC (obrázky 2 a 4).

Základná FRC generovaná touto metódou vykazuje stredné magnetické pole a energie častíc, ktoré v štandardnom prípade nedosahujú relevantné operačné parametre reaktora. Indukčné pole elektrickej akcelerácie však bude pretrvávať, pokiaľ sa bude prúd v cievke s tokom betatrónov 320 stále rýchlo zvyšovať. Vplyvom tohto procesu bude energia a celkové magnetické pole FRC stále rásť. Rozsah tohto procesu je teda primárne obmedzený napájaním cievky s tokom, pretože stála dodávka prúdu vyžaduje veľkú zásobáreň energie. V zásade však nie je zložité urýchliť systém tak, aby mal parametre vhodné na reaktor.

Aby došlo k obráteniu poľa, cirkulujúci plazmový lúč 335 sa prednostne urýchli na rotačnú energiu približne s hodnotou 100 eV, prednostne v rozsahu cca 75 eV až 125 eV. Na dosiahnutie podmienok vhodných pre fúziu sa cirkulujúca plazma 335 prednostne urýchli asi na 200 keV, prednostne v rozsahu 100 keV až 3.3 MeV. Keď sú do cirkulujúceho plazmového lúča 335 dodané iónové lúče, ako je opisované, plazmový lúč 335 depolarizuje iónové lúče.

Vytvorenie FRC užitím betatrónovej metódy bolo úspešne demonštrované pri nasledujúcich hodnotách parametrov:

- Rozmery vákuovej komory: priemer asi 1 m, dĺžka asi 1,5 metra.
- Polomer betatrónovej cievky: 10 cm.
- Polomer dráhy plazmy: 20 cm.
- Stredné vonkajšie magnetické pole vzniklé vo vákuovej komore bolo do 100 gaussov s rastovou periódou 150 μs a zrkadlovým pomerom 2 ku 1. (zdroj: vonkajšie cievky a betatrónové cievky.)
- Okolitá plazma (v podstate vodíkový plyn) sa vyznačovala strednou hustotou asi $10^{13}cm^{-3}$ a kinetickou energiou menšou ako 10 eV.
- Životnosť konfigurácie bola limitovaná celkovou energiou uloženou v experimente a všeobecne dosahovala cca 30 μs.

Experimenty pokračovali prvým vstreknutím okolitej plazmovej vrstvy dvoma súpravami diel s koaxiálnymi káblami inštalovanými v komore v kruhu. Každý súbor 8 diel bol inštalovaný na jednom alebo na dvoch zostavách zrkadlovej cievky. Delá boli azimutovo umiestnené v rovnakej vzdialenosti a posunuté vzhľadom na druhú zostavu. Toto usporiadanie umožňovalo, aby delá boli odpálené súčasne a aby tak vznikla kruhová plazmová vrstva.

Po vytvorení tejto vrstvy bola energizovaná cievka s betatrónovým tokom. Rastúci prúd vo vinutí betatrónovej cievky vyvolal nárast toku vnútri cievky, čím okolo betatrónovej cievky vzniklo azimutové elektrické pole. Prudký nárast a veľký prúd v cievke s betatrónovým tokom vytvoril silné elektrické pole, ktoré akcelerovalo kruhovú plazmovú vrstvu a tak indukovalo značný prúd. Dostatočne silný plazmový prúd vytvoril vnútorné magnetické pole, ktoré menilo vonkajšie pole a vyvolalo vznik konfigurácie s obráteným poľom. Podrobným meraním slučiek bodu B bol zistený rozsah, sila a trvanie FRC.

Príklad typických údajov je znázornený stopami sondy bodu B na obrázku 30. Údajová krivka A predstavuje absolútnu silu axiálnej zložky magnetického poľa na axiálnej stredovej rovine (75 cm od každej koncovej doštičky) experimentálnej komory a v radiálnej polohe 15 cm. Údajová krivka B predstavuje absolútnu silu axiálnej zložky magnetického poľa v axiálnej stredovej rovine komory a v radiálnej polohe 30 cm. Údaje na krivke A preto indikujú silu magnetického poľa vnútri plazmovej vrstvy paliva (medzi betatrónovou cievkou a plazmou), zatiaľ čo údajová krivka B opisuje silu magnetického poľa mimo plazmovej vrstvy paliva. Údaje jasne ukazujú, že vnútorné magnetické pole obracia počas 23 a 47 μs orientáciu (je záporné), zatiaľ čo vonkajšie pole zostáva kladné, to znamená neobracia orientáciu. Doba obrátenia je obmedzená nárastom prúdu v betatrónovej cievke. Akonáhle dosiahne prúd v betatrónovej cievke vrchol, začne indukovaný prúd v palivovej plazmovej vrstve klesať a FRC sa rýchlo stráca. Až do tejto doby je životnosť FRC obmedzená energiou, ktorú možno v experimente uchovať. Rovnako ako pri experimente so vstrekovaním a zachytávaním môže byť systém modernizovaný, aby poskytol dlhšiu životnosť FRC a akceleráciu parametrov relevantných pre reaktor.

Táto technika vo všeobecnosti nielenže vytvára kompaktnú FRC, ale je tiež dostatočne robustná a jednoduchá na implementáciu. Najdôležitejšie je to, že základná FRC, generovaná touto metódou, môže byť veľmi ľahko urýchlená na akúkoľvek požadovanú úroveň rotačnej energie a sily magnetického poľa. Je to zásadné na aplikáciu fúzie a klasické zadržanie lúčov s vysokými energiami.

Fúzia

Tieto dve techniky tvorby FRC v zadržujúcom systéme 300 opisovanom skôr a podobne môžu generovať plazmu s vlastnosťami, vhodnými na vyvolanie jadrovej fúznej reakcie. Konkrétnejšie je možné FRC, vytvorenú týmito metódami, urýchliť na akúkoľvek požadovanú úroveň rotačnej energie a silu magnetického poľa. To je zásadné na aplikáciu fúzií aj klasické zadržanie palivových lúčov s vysokou energiou. V zadržujúcom systéme 300 je preto možné zadržať a obmedziť plazmové lúče s vysokou energiou počas dostatočne dlhého obdobia, aby tu vznikla fúzna reakcia.

Na úpravu fúzie je FRC vytvorená týmito metódami prednostne akcelerovaná, aby dosiahla primerané hodnoty rotačnej energie a magnetického poľa urýchlením betatrónov. Fúzia má však tendenciu vyžadovať na to, aby sa reakcia uskutočnila, splnenie celého radu fyzikálnych podmienok. Aby sa okrem toho dosiahlo účinné spálenie paliva a kladná energetická bilancia, musí byť palivo udržané v tomto stave v podstate nezmenené počas dlhšieho časového obdobia. To je dôležité, pretože vysoká kinetická teplota alebo energia charakterizuje stav, vhodný pre fúziu. Vytvorenie tohto stavu preto vyžaduje značný energetický vstup, ktorý je možné dosiahnuť len vtedy, ak sa na fúzii zúčastní väčšina paliva. V dôsledku toho musí byť doba zadržania paliva dlhšia ako doba jeho spaľovania. Potom bude aj energetická bilancia a výsledný energetický výstup pozitívny.

Významná výhoda vynálezu spočíva v tom, že tu opisovaný zadržujúci systém a plazma sú schopné dlhých zadržujúcich časov, to znamená zadržujúcich časov, ktoré prekračujú časy spaľovania paliva. Typický stav pre fúziu je tak charakterizovaný nasledujúcimi fyzikálnymi podmienkami (ktoré sa obvykle líšia v závislosti od paliva a prevádzkového režimu):

priemerná teplota iónov: v rozsahu asi 30 až 230 keV a prednostne v rozsahu približne 80 keV až 230 keV,
priemerná teplota elektrónov: v rozsahu asi 30 až 100 keV a prednostne v rozsahu približne 80 keV až 100 keV,
koherentná energie palivových lúčov (vstrekovaných iónových lúčov a cirkulujúceho plazmového lúča): v rozsahu asi 100 keV až 3,3 MeV a prednostne v rozsahu 300 keV až 3,3 MeV,
celkové magnetické pole: v rozsahu asi 47,5 až 120 kG a prednostne v rozsahu približne 95 až 120 kG (s vonkajším pôsobiacim poľom v rozsahu asi 2,5 až 15 kG a prednostne v rozsahu asi 5 až 15 kG),
klasická doba zadržania: dlhšia ako doba spaľovania paliva a prednostne asi 10 až 100 sekúnd,
hustota iónov paliva: v rozsahu asi 10^{14} až menej ako 10^{16} cm^{-3} a prednostne v rozsahu asi 10^{14} až 10^{15} cm^{-3},
celková fúzna energia: prednostne v rozsahu asi 50 až 450 kW/cm (energia na cm dĺžky komory).

Na úpravu uvedených fúznych podmienok sa FRC prednostne akceleruje na úroveň koherentnej rotačnej energie prednostne v rozsahu asi 100 keV až 3,3 MeV, lepšie v rozsahu asi 300 keV až 3,3 MeV a úrovniach 45 až 120 kG, lepšie v rozsahu asi 90 až 115 kG. Na týchto úrovniach môžu byť iónové lúče s vysokou energiou vstrekované do FRC a zachytávané, aby vytvorili vrstvu plazmového lúča, pričom plazmové iónové lúče sú zadržiavané magneticky a elektróny plazmových lúčov sú zadržiavané elektrostaticky.

Teplota elektrónu je prednostne udržiavaná na takej nízkej hodnote, ako je to prakticky možné, aby sa znížilo brzdné žiarenie, ktoré môže inak spôsobovať straty rádioaktívnej energie. Efektívnym prostriedkom, ako to možno uskutočniť, je elektrostatická jama podľa vynálezu.

Teplota iónov je prednostne udržiavaná na úrovni, ktorá zabezpečuje účinné spaľovanie, pretože fúzny prierez predstavuje funkciu iónovej teploty. Veľká priama energia palivových iónových lúčov je zásadná na klasický transport, opisovaný v tejto prihláške. Minimalizuje tiež vplyvy nestability palivovej plazmy. Magnetické pole je konzistentné s rotačnou energiou lúča. Je čiastočne tvorené plazmatickým lúčom (vnútorné pole) a naopak poskytuje podporu a silu na udržanie plazmatického lúča na požadovanej dráhe.

Produkty fúzie

Produkty fúzie vznikajú v energetickom jadre prevažne pri nulovom povrchu 86, odkiaľ vychádzajú difúziou smerom k separátoru 84 (pozri obr. 2 a 4). Je to v dôsledku zrážok s elektrónmi (pretože zrážky s iónmi nemenia ťažisko a preto nevyvolávajú zmenu siločiar). Vplyvom vysokej kinetickej energie (výsledné ióny majú omnoho väčšiu energiu ako ióny paliva) môžu produkty fúzie ľahko prejsť cez separátor 84. Akonáhle sú za separátorom 84, môžu postupovať po otvorených siločiarach 80 za predpokladu, že na nich bude pôsobiť rozptyl po zrážkach s iónmi. Hoci tento proces zrážok nemá za následok difúzie, môže zmeniť smer vektora rýchlosti iónov, aby ukazoval rovnobežne s magnetickým poľom. Tieto otvorené siločiary 80 spájajú topológiu FRC jadra s jednotne pôsobiacim poľom mimo topológiu FRC. Výsledné ióny vystupujú na rôznych siločiarach podľa rozdelenia energie. Je výhodné, že ióny, ktoré sú produktom reakcie, a elektróny, neutralizujúce náboj, vychádzajú vo forme rotujúcich kruhových lúčov z obidvoch koncov palivovej plazmy. Napríklad pre konštrukciu reakcie v-B^{11} v sile 50 MW budú mať tieto lúče polomer približne 50 cm a hrúbku približne 10 centimetrov. V silných magnetických poliach mimo separátora 84 (v typickom prípade cca 100 kG) majú výsledné ióny súvisiace rozdelenie gyrorádiusu, ktorý sa mení od minimálnej hodnoty cca 1 cm do maxima okolo 3 cm pre najviac energetické výsledné ióny.

Výsledné ióny majú spočiatku longitudinálnu aj rotačnú energiu, vyznačujúcu sa 1/2 $M(V_{par})^2$ a 1/2 $M(V_{perp})^2$. Uvedená V_{perp} je azimutálna rýchlosť, súvisiaca s rotáciou okolo siločiary ako v centre dráhy. Pretože siločiary poľa sa potom, ako sa vzdialia topológii FRC, rozptýlia do priestoru, rotačná energia má tendenciu klesať, zatiaľ čo celková energia zostáva konštantná. Je to v dôsledku adiabatickej invariancie magnetického momentu výsledných iónov. V odbore je dobre známe, že nabité častice, pohybujúce sa v magnetickom poli, majú magnetický moment súvisiaci s ich pohybom. V prípade častíc, pohybujúcich sa pozdĺž pomaly sa meniaceho magnetického poľa, existuje taktiež adiabatická invarianta pohybu opisovaného 1//2 $M(V_{perp})^2/B$. Ióny, ktoré sú produktom reakcie, obiehajú okolo svojich siločiar, majú magnetický moment a adiabatickú invarianciu spojenú s týmto pohybom. Pretože B klesá cca desaťkrát (čo je určované rozptylom siločiar), vyplýva z toho, že V_{perp} bude klesať asi 3,2-krát. V okamihu, keď výsledné ióny dorazia do jednotnej oblasti poľa, bude ich rotačná energia nižšia ako 5 % ich celkovej energie, čo je inými slovami takmer celá energia v longitudinálnej zložke.

Premena energie

Systém priamej premeny energie podľa vynálezu obsahuje inverzný cyklotrónový konvertor (ICC) 420 znázornený na obrázkoch 19A a 20A a pripojený k (čiastočne zobrazenému) napäťovému jadru 436 fúzneho reaktora so zrážkou lúčov (CBFR) 410, takže vzniká systém generovania plazmaelektrickej energie 400. Druhý ICC (nie je zobrazený) môže byť umiestnený symetricky smerom k ľavému CBFR 410. Magnetický vrchol 486 je umiestnený medzi CBFR 410 a ICC 420 a vzniká po spojení magnetických polí CBFR 410 a ICC 420.

Predtým, ako podrobne opíšeme ICC 420 a jeho fungovanie, uvádzame prehľad vlastností typického cyklotrónového akcelerátora. V bežných cyklotrónových akcelerátoroch rotujú elektrické ióny rýchlosťami, kolmými na magnetické pole v kruhoch. Polomer dráhy energetických iónov je stanovený silou magnetického poľa a ich nábojom vzhľadom na hmotnosť a zvyšuje sa s energiou. Rotačná frekvencia iónov je však nezávislá od ich energie. Táto skutočnosť bola využitá pri konštrukcii cyklotrónových akcelerátorov.

Na obrázku 21A je typický cyklotrónový akcelerátor 700, ktorý obsahuje dve zrkadlové elektródy v tvare písmena C 710 tvoriace zrkadlové dutiny v tvare písmena D, umiestnené v homogénnom magnetickom poli 720 a majúce siločiary kolmé na rovinu symetrie elektród, to znamená v rovine stránky. Medzi elektródami v tvare písmena C (pozri obrázok 21B) pôsobí oscilujúci elektrický potenciál. Ióny I, vychádzajú zo zdroja umiestneného v centre cyklotrónu 700. Magnetické pole 720 je upravené tak, že rotačná frekvencia iónov vyhovuje elektrickému potenciálu a súvisiacemu elektrickému poľu. Ak prejde ión I medzeru 730 medzi elektródami v tvare písmena C 710 v rovnakom smere, aký má elektrické pole, je urýchlený. Po urýchlení elektrónu I sa zvýši jeho energia a polomer dráhy. Keď ión absolvuje oblúk v tvare polkružnice (a nebola mu zvýšená energia), prejde opäť cez medzeru 730. Teraz má elektrické pole medzi elektródami v tvare písmena C 710 obrátený smer. Ión I je opäť urýchlený a jeho energia je ďalej zvýšená. Tento proces sa opakuje vždy, ak ión prejde cez medzeru 730 za predpokladu, že sa jeho rotačná energia ďalej skombinuje s energiou oscilujúceho elektrického poľa (pozri obrázok 21C). Ak na druhej strane častica prejde cez medzeru 730, keď je elektrické pole v opačnom smere, bude spomalená a vrátená zdroju v centre. Len častice s počiatočnými rýchlosťami, kolmými na magnetické pole 720 a tie, ktoré prejdú cez medzeru 730 v správnej fáze oscilujúceho elektrického poľa, budú urýchlené. Súlad fáz je preto na urýchlenie dôležitý.

Na extrakciu kinetickej energie z lúča s rovnakými energetickými iónmi by sa mohol v zásade používať cyklotrón. Spomalenie iónov s cyklotrónmi, ale bez energetických extrakcií, bolo pozorované pre protóny, ako ich opisuje Bloch a Jeffries v *Phys. Rev.* 80, 305 (1950). Ióny by mohli byť vstreknuté do dutiny tak, že sú privedené do spomaľujúcej fázy vzhľadom na oscilujúce pole. Všetky ióny by potom obrátili trajektóriu T urýchleného iónu znázorneného na obrázku 21A. Ako sa ióny spomaľujú následkom interakcie s elektrickým poľom, ich kinetická energia je transformovaná na oscilujúcu elektrickú energiu v elektrickom obvode, súčasťou ktorého je cyklotrón. Dosiahla by sa priama premena na elektrickú energiu, ktorá by bola veľmi efektívna.

V praxi by ióny z iónového lúča vstúpili do cyklotrónu so všetkými možnými fázami. Pokiaľ nie sú v konštrukcii cyklotrónu kompenzované premenné fázy, polovica iónov je urýchlená a druhá polovica spomalená. Následkom toho by maximálna účinnosť premeny bola 50 %. A navyše výsledné kruhové iónové fúzne lúče rozoberané skôr majú nevhodný tvar pre bežný cyklotrón.

Ako je ďalej podrobnejšie rozoberané, ICC podľa vynálezu prispôsobuje kruhový charakter výsledných fúznych lúčov nabudzujúcich FRC jadrá fúzneho reaktora a náhodnou reaktívnou fázou iónov v lúči a šírenia ich energií.

Vráťme sa k obrázku 19A. Tu je na ľavej strane znázornená časť energetického jadra 436 CBFR 410, pričom plazmové palivové jadro 435 je uzatvorené v FRC 470 vzniklom čiastočne vďaka magnetickému poľu pôsobiacemu mimo cievky poľa 425. FRC 470 obsahuje uzatvorené siločiary 482, separátor 484 a otvorené siločiary 480, ktoré, ako je uvedené, určujú vlastnosti kruhového lúča 437 produktov fúzie. Otvorené siločiary 480 vystupujú z energetického jadra 436 v smere k magnetickým vrcholom 486. Ako je uvedené skôr, fúz-

ne produkty vychádzajú z energetického jadra 436 pozdĺž otvorených siločiar 480 v tvare kruhového lúča 437 obsahujúceho energetické ióny a elektróny neutralizujúce náboj.

Geometria ICC 420 pripomína dutý valec s dĺžkou cca 5 metrov. Povrch valca tvoria štyri alebo viacej rovnakých polovalcovitých elektród 494 s malými priamymi medzerami 497. V prevádzke pôsobí na elektródy 494 striedavo oscilačný potenciál. Elektrické pole E v konvertore má štvorpólovú štruktúru, ako ukazuje koncový pohľad znázornený na obrázku 19B. Elektrické pole E mizne na osiach symetrie a zvyšuje sa lineárne s polomerom. Vrcholová hodnota je v medzere 497.

ICC okrem toho obsahuje vonkajšie cievky poľa 488, ktoré tvoria jednotné pole v geometrii dutého valca ICC. Pretože prúd preteká poľom cievky 488 v smere opačnom k smeru prúdu pretekajúceho poľom cievky CBFR 425, siločiary poľa 496 v ICC prebiehajú v smere opačnom k otvoreným siločiaram 480 CBFR 410. Na konci najďalej od energetickej cievky 436 CBFR 410 obsahuje ICC 420 kolektor iónov 492.

Medzi CBFR 410 a ICC 420 je symetrický magnetický vrchol 486, pričom otvorené siločiary poľa 480 CBFR 410 sa zmiešavajú so siločiarami 496 ICC 420. Kolektor elektrónov kruhového tvaru 490 je umiestnený okolo magnetického vrcholu 486 a je elektricky spojený s kolektorom iónov 498. Ako je neskôr rozvedené, magnetické pole magnetických vrcholov 486 mení veľmi efektívne uhlovú rýchlosť lúča 437 na rotačnú rýchlosť. Obrázok 19 znázorňuje typickú iónovú dráhu 422 v konvertore 420.

CBFR 410 má valcový tvar. V strede je fúzne energetické jadro 436 s fúznym plazmovým jadrom 435 obsiahnutým v topológii magnetického poľa FRC 470, v ktorom sa uskutočňujú fúzne reakcie. Ako bolo zaznamenané, výsledné jadro a elektróny neutralizujúce jadro vystupujú ako kruhové lúče 437 z oboch koncov palivovej plazmy 435. Napríklad pri konštrukcii reakcie p-B^{11} s výkonom 50 MW budú mať tieto lúče polomer okolo 50 cm a hrúbku približne 10 cm. Kruhový lúč má hustotu $n \cong 10^7$ až 10^8 cm^3. Pre takúto hustotu oddeľuje magnetický vrchol 486 elektróny a ióny. Elektróny sledujú magnetické siločiary až do kolektoru elektrónov 490 a ióny prechádzajú vrcholom 486, kde sú trajektórie iónov menené tak, aby sledovali v zásade špirálovú dráhu po dĺžke ICC 420. Ako sa ióny pohybujú po špirále pozdĺž elektród 494 pripojených k rezonančnému okruhu, strácajú energiu (nie je znázornené). Strata perpendikulárnej energie je najväčšia pre ióny s najväčšou energiou, ktoré spočiatku obiehajú v blízkosti elektród 494, kde je elektrické pole najsilnejšie.

Ióny prichádzajú na magnetický vrchol 486 s rotačnou energiou rovnajúcou sa približne počiatočnej celkovej energii, to znamená $1/2\ M v_p^2 \cong 1/2\ M v_o^2$. Existuje rozdelenie energie iónov a počiatočného polomeru iónu r_o, keď ióny dosiahnu magnetický vrchol 486. Ale počiatočný polomer r_o má tendenciu byť približne úmerný počiatočnej rýchlosti v_o. Radiálne magnetické pole a radiálna rýchlosť lúča vytvára Lorentzovu silu v azimutálnom smere. Magnetické pole na vrchole 486 nemení energiu častíc, ale prevádza počiatočnú axiálnu rýchlosť $v_p \cong v_o$ na reziduálnu axiálnu rýchlosť v_z a azimutálnu rýchlosť v_i, kde $v_o^2 = v_z^2 + v_i$. Hodnota azimutálnej rýchlosti v môže byť stanovená zo zachovania normovaného momentu.

$$P_\theta = M r_o v - q B_o r_o^2 / (2c) = q B_o r_o^2 / (2c) \qquad (5)$$

Ión z lúča vstupuje do ľavej strany vrcholu 486 s $B_z = B_o$, $v_z = v_o$, $v_i = 0$ a $r = r_o$. Vystupuje na ľavej strane vrcholu 486 s $r = r_o$, $B_z = -B_o$

$v_i = q B_o r_o / Mc$ a $v_z = \sqrt{v_o^2 - v_i^2}$

$$\frac{v_z}{v_o} = \sqrt{1 - \left(\frac{r_o \Omega}{v_o}\right)^2},$$

kde $\Omega_o = q B_o / (Mc)$ je frekvencia cyklotrónu. Rotačná frekvencia iónov je v rozsahu asi 1 až 10 MHz a prednostne približne 5 až 10 MHz, čo je frekvencia, pri ktorej dochádza ku generovaniu energie.

Aby mohli ióny prejsť vrcholom 486, účinný gyrorádius musí byť väčší ako šírka vrcholu 486 pri polomeru r_o. Možné je experimentálne znížiť axiálnu rýchlosť 10-krát, takže zvyšková axiálna energia sa zníži 100-krát. Potom sa 99 % iónovej energie premení na rotačnú energiu. Iónový lúč má rozdelenie hodnôt pre v_o a r_o. Pretože však na základe uvedených vlastností reaktora na báze FRC platí, že r_o je úmerné v_o, účinnosť premeny na rotačnú energiu má tendenciu byť pre všetky ióny 99 %.

Ako ukazuje obrázok 19B, štruktúra symetrickej elektródy ICC 420 podľa vynálezu prednostne obsahuje štyri elektródy 494. Tankový obvod (nie je znázornený) je pripojený k systémom elektród 494, takže okamžité napätia a elektrické polia sú v stave, v ktorom sú znázornené. Napätie a tankový obvod osciluje na frekvencii $\omega = \Omega_o$. Azimutálne elektrické pole E v medzerách 497 je znázornené na obrázkoch 19B a 22. Obrázok 22 znázorňuje elektrické pole v medzerách 497 medzi elektródami 494 a pole, ktoré pôsobí na ión, keď sa otáča uhlovou rýchlosťou Ω_o. Je zrejmé, že pri kompletnom otočení bude častica striedavo urýchľovaná a spomaľovaná v ráde stanovenom pôvodnou fázou. Okrem azimutálneho elektrického poľa E_θ tu tiež pôsobí radiálne elektrické pole E_r. Azimutálne pole E_θ je maximálne v medzerách 497 a klesá s tým, ako sa zmenšuje polomer. Obrázok 22 predpokladá, že sa častica otáča a udržiava konštantný polomer. Následkom gradien-

tu v elektrickom poli bude vždy spomalenie prevažovať nad urýchlením. Fáza akcelerácie zvyšuje polomer iónu, takže keď ión znova vstúpi do spomaľujúceho elektrického poľa, polomer iónu bude väčší. Fáza spomalenia bude prevažovať nad nezávislou počiatočnou fázou iónu, pretože radiálny gradient azimutálneho elektrického poľa E_θ je vždy pozitívny. Dôsledkom toho nie je účinnosť premeny energie obmedzená na 50 % následkom problémov v počiatočnej fáze vyskytujúcich sa pri bežných cyklotrónov. Elektrické pole E_r je tiež dôležité. Tiež osciluje a pôsobí v radiálnom smere, ktorý vracia trajektóriu lúča do pôvodného polomeru s nulovou rýchlosťou v rovine kolmej na os, ako ukazuje obrázok 19C.

Proces, ktorým sú ióny vždy spomaľované, je obdobný ako princíp silnej fokusácie a je v podstate základnou vlastnosťou moderných urýchľovačov opisovaných v patente USA číslo 2 736 799. Kombinácia pozitívnej šošovky (uskutočňuje fokusáciu) a negatívnej šošovky (uskutočňuje defokusáciu) je pozitívna, ak má magnetické pole pozitívny gradient. Silné fokusačné dvojné štvorpólové šošovky sú znázornené na obrázku 23. Prvá šošovka uskutočňuje fokusáciu v smere osi x a defokusáciu v smere osi y. Druhá šošovka pracuje obdobne, len sa vymenia osi x a y. Magnetické pole mizne na osi symetrie a má pozitívny radiálny gradient. Výsledkom pre iónový lúč prechádzajúci obidvoma šošovkami je zameranie vo všetkých smeroch nezávisle od poradia priechodu.

Obdobné výsledky boli zaznamenané pre lúč prechádzajúci rezonančnou dutinou obsahujúcou silné axiálne magnetické pole a fungujúce v režime TE_{111} (pozri Yoshikawa et al.). Toto zariadenie sa nazýva peniotron. V režime TE_{111} je v rezonančnej dutine stojaté vlnenie, v ktorom má elektrické pole štvorpólovú symetriu. Výsledky sú kvalitatívne obdobné niektorým tu opisovaným výsledkom. Existujú kvantitatívne rozdiely v tom, že rezonančná dutina má omnoho väčšiu veľkosť (je dlhá 10 metrov) a pracuje s oveľa vyššou frekvenciou (155MHz) a magnetickým poľom (10 T). Na extrakciu energie z vysokých frekvencií je nutný anténový usmerňovač. Energetické spektrum lúča znižuje účinnosť konverzie. Závažnejším problémom je existencia dvoch druhov iónov, účinnosť konverzie pre reaktor D-He^3, ktorý vytvára protóny 15 MeV, je však primeraná.

Dráha samostatnej častice 422 pre časticu s ICC 420 je znázornená na obrázku 19C. Tento výsledok bol získaný na základe počítačovej simulácie a obdobný výsledok bol zistený aj pre peniotrón. Ión vstupujúci pod určitým polomerom r_o sa pohybuje po špirále pozdĺž ICC a potom, čo stratí počiatočnú rotačnú energiu, sa mení na bod na kruhu s rovnakým polomerom r_o. Počiatočné podmienky sú asymetrické. Konečný stav túto asymetriu odráža, je však nezávislý od tejto počiatočnej fázy, takže všetky častice sa spomalia. Lúč na konci iónového kolektora ICC je opäť kruhový a má obdobné rozmery. Axiálna rýchlosť poklesne 10-krát a zodpovedajúcim spôsobom sa zníži hustota. Pre jednotlivú časticu je dosažiteľná účinnosť extrakcie vo výške 99 %. Túto účinnosť však môžu rôzne faktory, ako je napríklad pravouhlá rotačná energia kruhového lúča pred vstupom do konvertora, zredukovať asi o 5 %. Extrakcie elektrickej energie môže byť asi 1 až 10 MHz a prednostne v rozsahu 5 až 10 MHz s ďalším znížením účinnosti konverzie následkom úpravy napájania na pripojenie k napájajúcej mriežke.

Ako znázorňujú obrázky 20A a 20B, iné uskutočnenia systému elektród 494 v ICC 420 môžu zahŕňať dve súmerné elektródy v tvaru polkružnice alebo skosené elektródy 494, ktoré sú zošikmené smerom k iónovému kolektoru 492.

Prispôsobenie iónovej dynamiky v hlavnom magnetickom poli ICC 420 môže byť uskutočnené použitím dvoch pomocných súborov s cievkou 500 a 510, ako ukazujú obrázky 24A a 24B. Obidva súbory s cievkami 500 a 510 obsahujú susediace vodiče s opačne smerujúcim prúdom, takže magnetické polia budú mať krátky rozsah. Gradient magnetického poľa, ako je schematicky znázornený na obrázku 24A, bude meniť frekvenciu aj fázu rotácie iónu. Magnetické pole s niekoľkými pólmi, ako je schematicky znázornené na obrázku 24B, bude vytvárať zhluky, ako je tomu v lineárnom urýchľovači.

Reaktor

Obrázok 25 znázorňuje reaktor s výkonom 100 MW. Rez generátorom ukazuje oblasť fúzneho jadra so supervodivými cievkami na aplikáciu jednotného magnetického poľa a cievku s tokom na vytvorenie magnetického poľa s topológiou obráteného poľa. Susediace opačné konce oblasti fúzneho jadra sú konvertory ICC na priamu premenu kinetickej energie fúznych produktov na elektrickú energiu. Pomocné vybavenie pre takýto reaktor je znázornené na obrázku 26.

Pohonný systém

Obrázok 27 znázorňuje plazmový hnací systém 800. Systém obsahuje energetické jadro FRC 836, ktorého súčasťou je fúzne palivové jadro 835, z ktorého koncov vystupujú produkty fúzie v tvare kruhového lúča 837. Konvertor energie ICC 820 je pripojený na jeden koniec energetického jadra. Pri druhom konci energetického jadra je umiestnená magnetická dýza 850. Kruhový lúč 837 prúdu fúznych produktov vychádza z jedného konca fúzneho energetického jadra do druhého podľa siločiar do ICC na premenu energie a z jedného konca energetického jadra pozdĺž siločiar z dýzy na prítlak T.

Vynález môže nadobúdať rôzne modifikácie aj iné tvary a jeho konkrétny príklad bol znázornený na výkresoch a bol podrobne opísaný v tomto dokumente. Vynález by však mal byť tak chápaný, že sa neobmedzuje na konkrétne tu opisovanú formu, ale naopak má pokrývať všetky modifikácie, ekvivalenty a alternatívy patriace do predmetu a rozsahu pripojených patentových nárokov.

PATENTOVÉ NÁROKY

1. Postup premeny energií fúznych produktov na elektrickú energiu, **vyznačujúci sa tým,** že zahŕňa nasledujúce kroky:
vstrekovanie iónov po špirálovej dráhe vo všeobecne valcovitej dutine majúcej povrch tvorený skupinou elektród, medzi ktorými je určitá vzdialenosť, ktoré majú medzi sebou niekoľko podlhovastých medzier, pričom sa medzery rozkladajú okolo pozdĺžnej osi dutiny,
vytvorenie elektrického poľa v dutine so štruktúrou s niekoľkými pólmi medzi viacej ako dvoma pólmi a
spomalenie iónov na základe interakcie s elektrickým poľom na premenu aspoň časti kinetickej energie iónov na oscilujúcu elektrickú energiu.

2. Postup podľa nároku 1, **vyznačujúci sa tým,** že ďalej zahŕňa krok pôsobenia oscilujúceho potenciálu na skupinu elektród.

3. Postup podľa nárokov 1 a 2, **vyznačujúci sa tým,** že ďalej zahŕňa krok vytvorenia azimutálneho elektrického poľa v skupine medzier.

4. Postup podľa nárokov 1 až 3, **vyznačujúci sa tým,** že krok vstreknutia obsahuje premenu v podstate všetkej axiálnej energie iónov na rotačnú energiu.

5. Postup podľa nárokov 1 až 4, **vyznačujúci sa tým,** že ióny sú vstrekované v tvare kruhového lúča.

6. Postup podľa nárokov 1 až 5, **vyznačujúci sa tým,** že ďalej zahŕňa krok nasmerovania kruhového lúča cez magnetický vrchol.

7. Postup podľa nároku 6, **vyznačujúci sa tým,** že ďalej zahŕňa krok zhromaždenia elektrónov neutralizujúcich náboj z kruhových lúčov, keď elektróny sledujú magnetické siločiary magnetického vrcholu.

8. Postup podľa nárokov 1 až 7, **vyznačujúci sa tým,** že ďalej zahŕňa krok zhromažďovania iónov, akonáhle je podstatná časť ich energie premenená na elektrickú energiu.

9. Postup podľa nároku 8, **vyznačujúci sa tým,** že ďalej zahŕňa krok úpravy elektrickej energie premenenej z energie iónov, aby bola vhodná pre existujúce energetické mriežky.

10. Postup podľa nárokov 1 až 9, **vyznačujúci sa tým,** že skupina elektród zahŕňa aspoň štyri elektródy.

11. Inverzný konvertor cyklotrónovej energie, **vyznačujúci sa tým,** že obsahuje:
skupinu elektród (494) tvoriacich všeobecne valcovitú dutinu, pričom elektródy sú v určitej vzdialenosti medzi sebou a majú medzi sebou podlhovasté medzery (497), ktoré sa rozkladajú okolo pozdĺžnej osi dutiny a skupina elektród (494) obsahuje najmenej dve elektródy, ktoré vytvárajú multipolárne elektrické pole s viac ako dvomi pólmi a
generátor magnetického poľa okolo skupiny elektród (494).

12. Inverzný konvertor podľa nároku 11, **vyznačujúci sa tým,** že ďalej obsahuje kolektor (492) iónov na jednom konci skupiny elektród (494).

13. Inverzný konvertor podľa nároku 12, **vyznačujúci sa tým,** že ďalej obsahuje kolektor (490) elektrónov umiestnený proti druhému koncu skupiny elektród (494).

14. Inverzný konvertor podľa nároku 13, **vyznačujúci sa tým,** že kolektor (490) elektrónov má kruhový tvar.

15. Inverzný konvertor podľa nárokov 13 a 14, **vyznačujúci sa tým,** že kolektor (490) elektrónov a kolektor (492) iónov sú elektricky spojené.

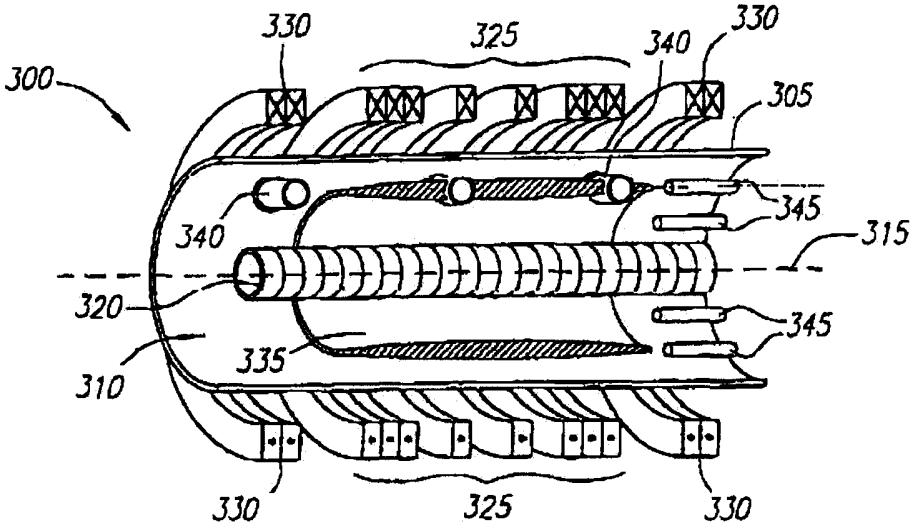
16. Inverzný konvertor podľa nárokov 11 až 15, **vyznačujúci sa tým,** že ďalej obsahuje tankový obvod pripojený na skupinu elektród (494).

17. Inverzný konvertor podľa nárokov 11 až 16, **vyznačujúci sa tým,** že generátor magnetického poľa obsahuje skupinu cievok (325) poľa umiestnených okolo skupiny elektród (494).

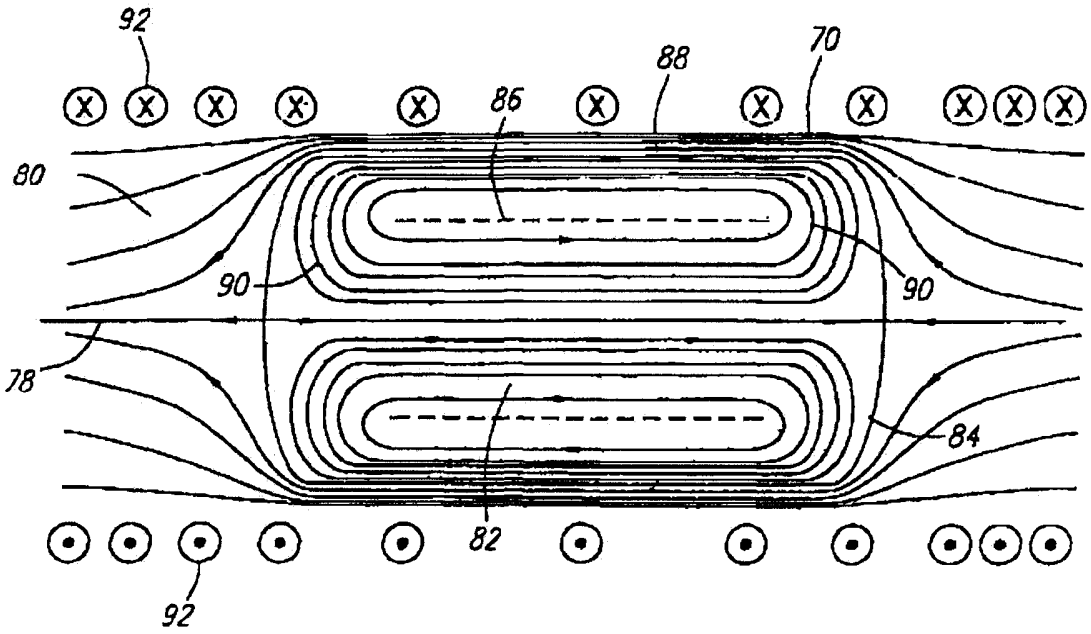
18. Inverzný konvertor podľa nárokov 11 až 17, **vyznačujúci sa tým,** že skupina cievok (325) je symetrická.

19. Inverzný konvertor podľa nárokov 11 až 18, **vyznačujúci sa tým,** že skupina elektród (494) obsahuje štyri štvorvalcové elektródy (494) tvoriace pozdĺžnu dutinu, pričom sú navzájom rozmiestnené tak, že sú medzi nimi štyri podlhovasté medzery (497).

16 výkresov

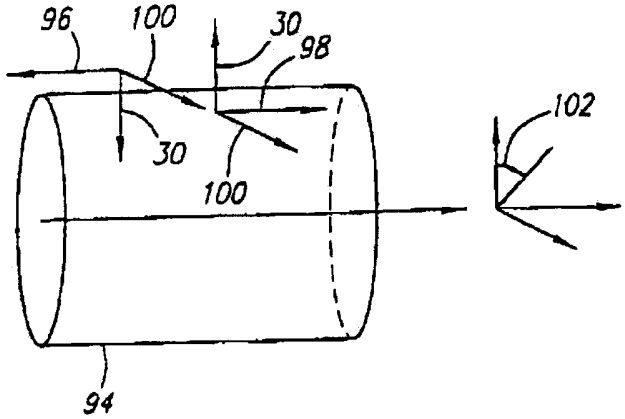

330
325
340
330
300
305
345
340
315
320
345
335
310
330
325
330

Obr. 1

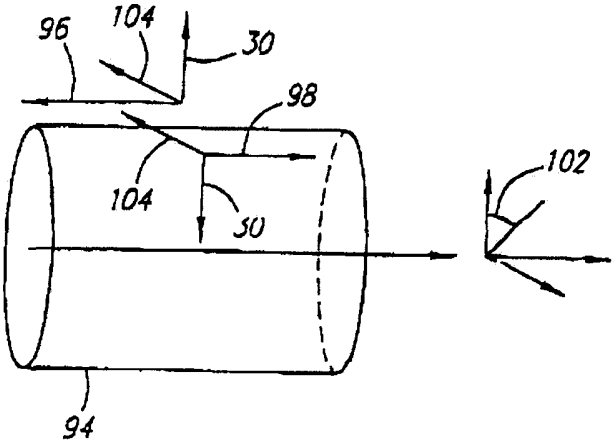

92
88
70
86
80
90
90
78
84
82
92

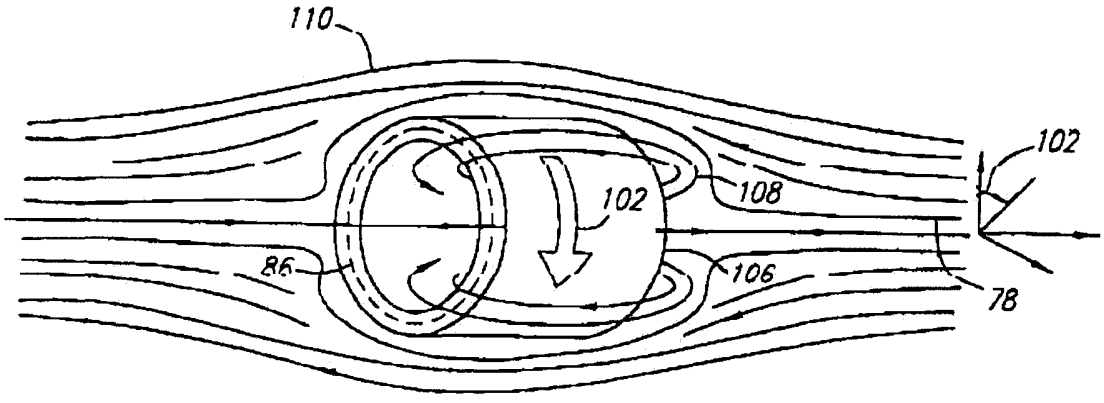
Obr. 2

Obr. 3A

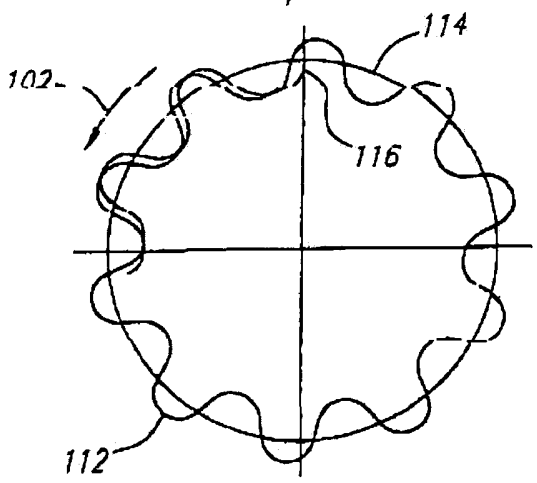


Obr. 3B

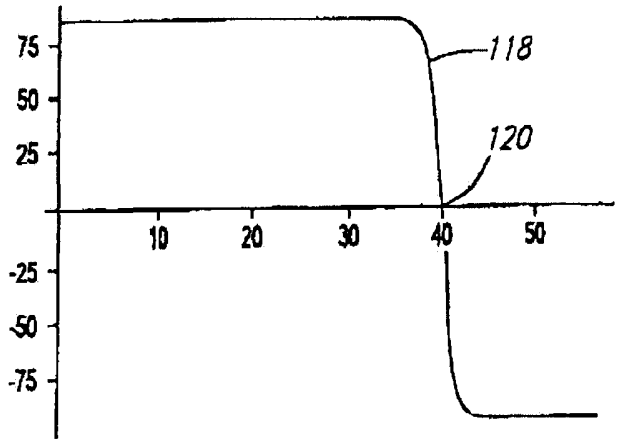




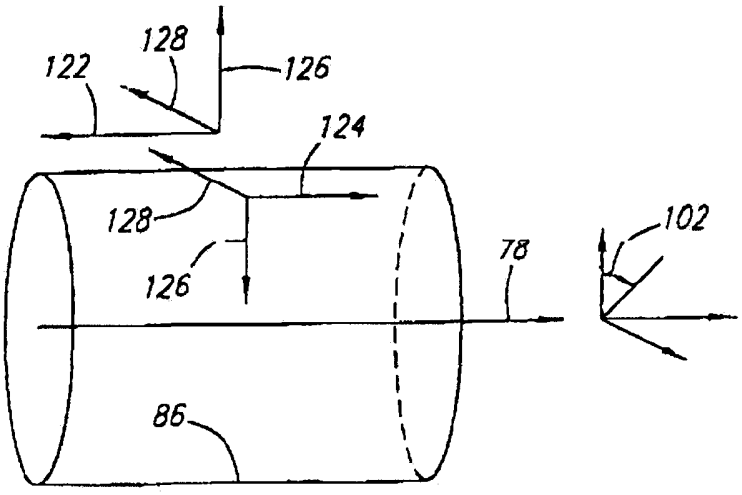
Obr. 4



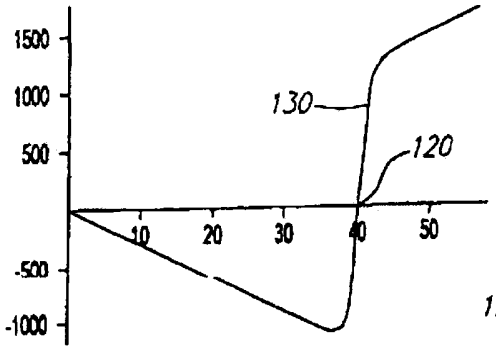
Obr. 5



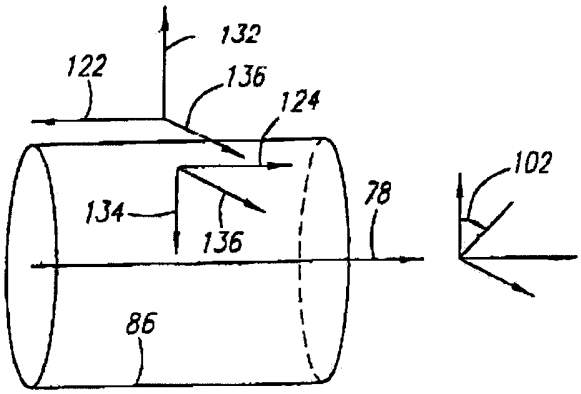
Obr. 6A



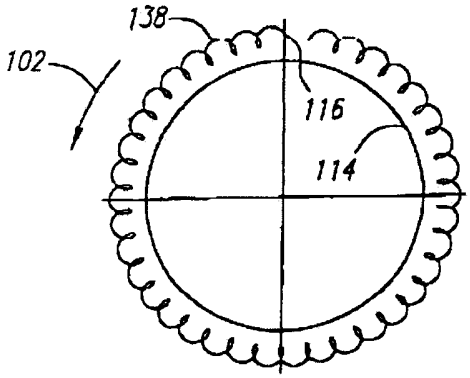
Obr. 6B



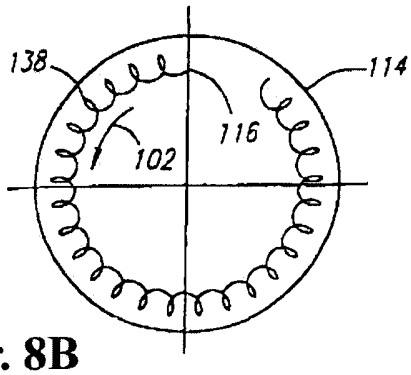
Obr. 7A



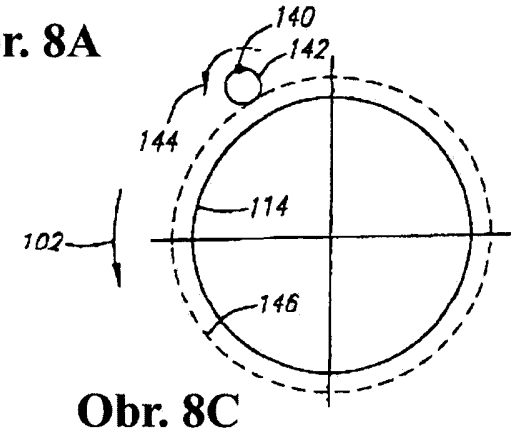
Obr. 7B



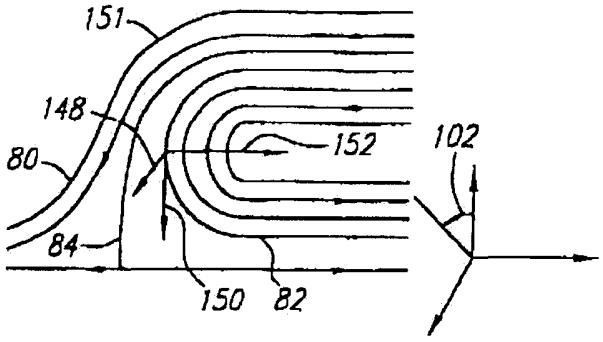
Obr. 8A



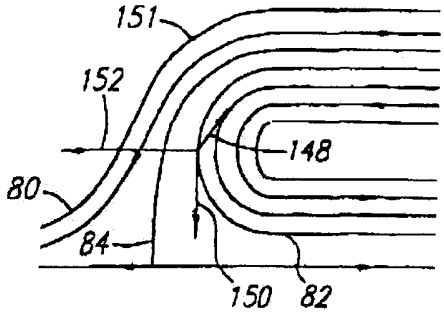
Obr. 8B



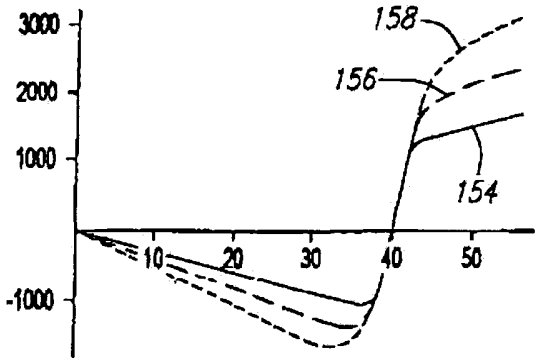
Obr. 8C



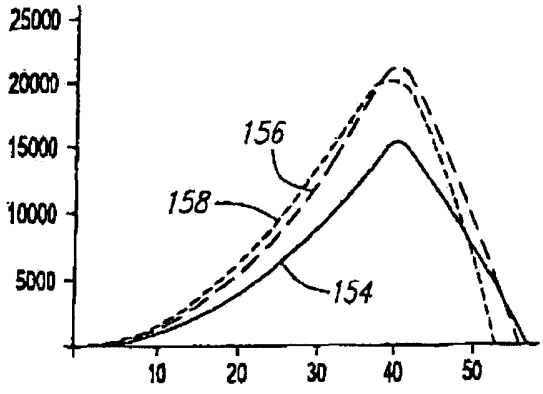
Obr. 9A



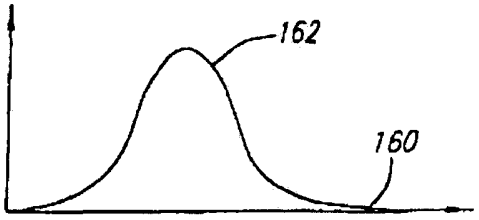
Obr. 9B



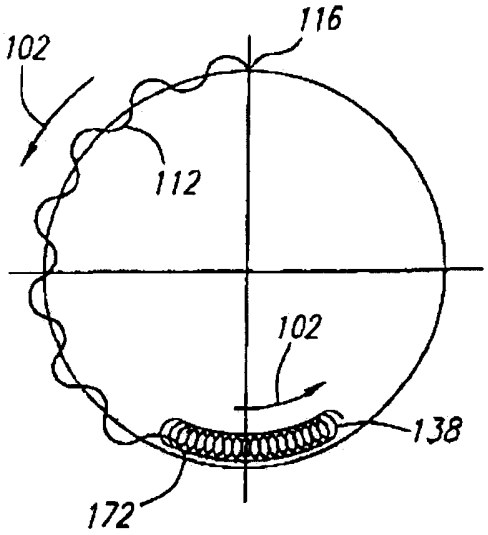
Obr. 10A



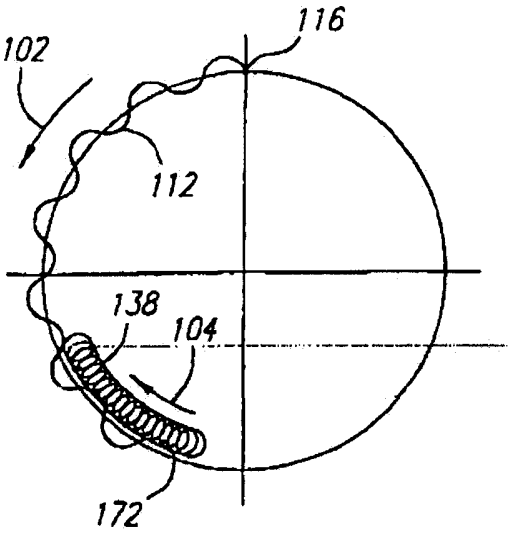
Obr. 10B



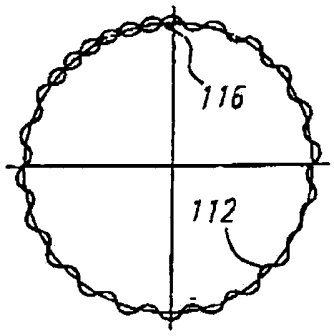
Obr. 11



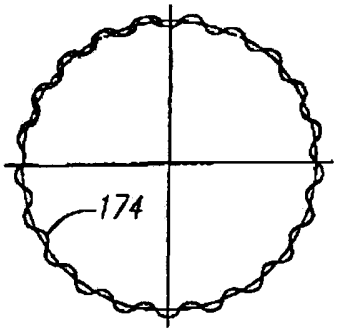
Obr. 12A



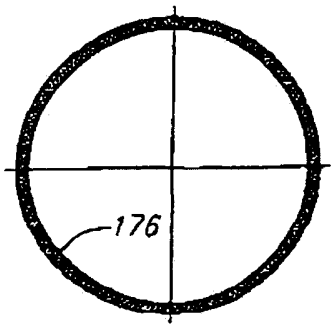
Obr. 12B



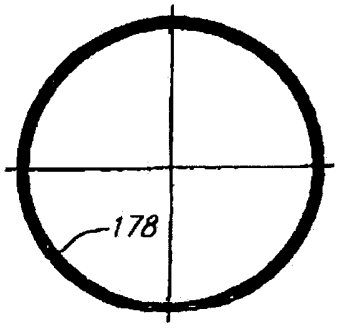
Obr. 13A



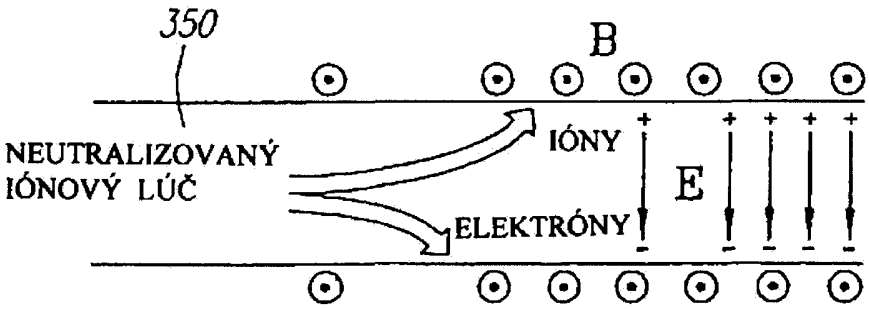
Obr. 13B



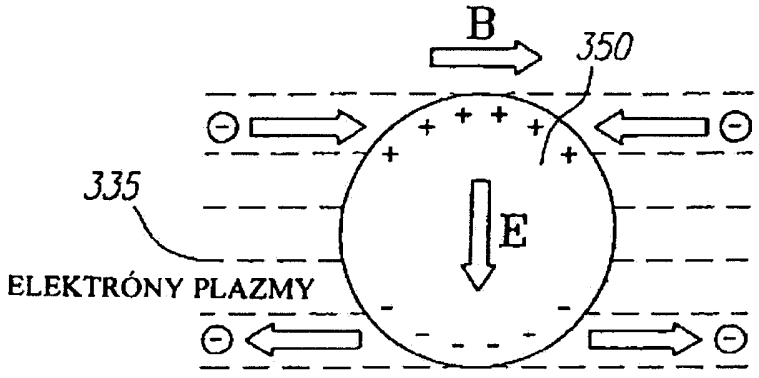
Obr. 13C



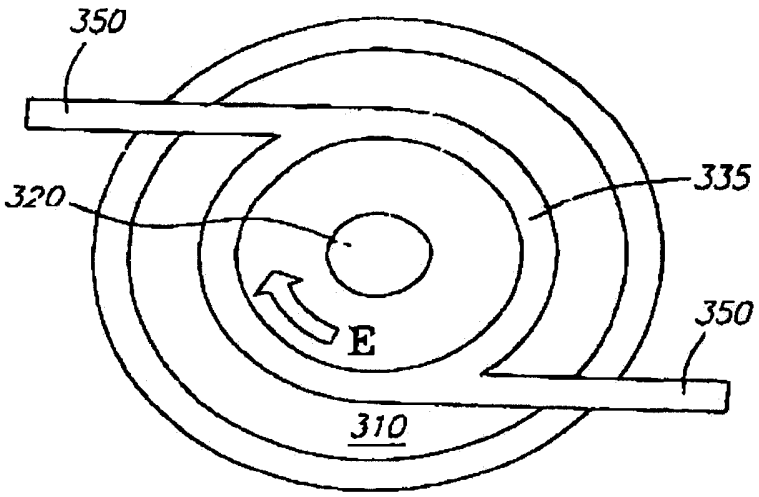
Obr. 13D


350
B
NEUTRALIZOVANÝ
IÓNOVÝ LÚČ
IÓNY
E
ELEKTRÓNY

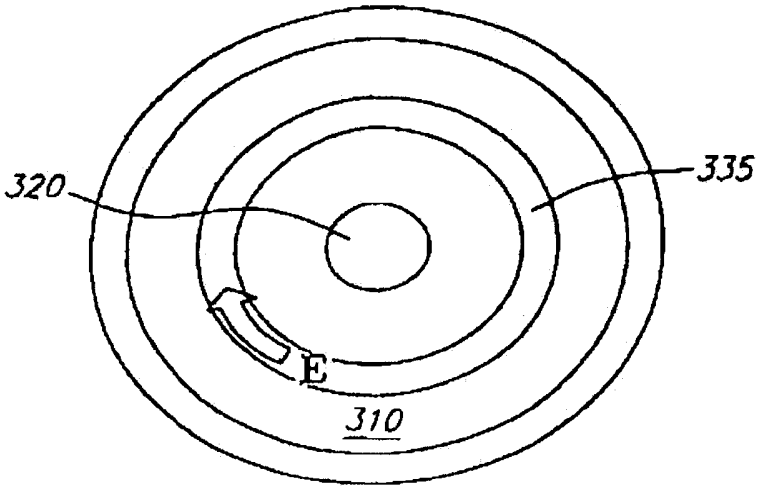
Obr. 14


B
350
335
E
ELEKTRÓNY PLAZMY

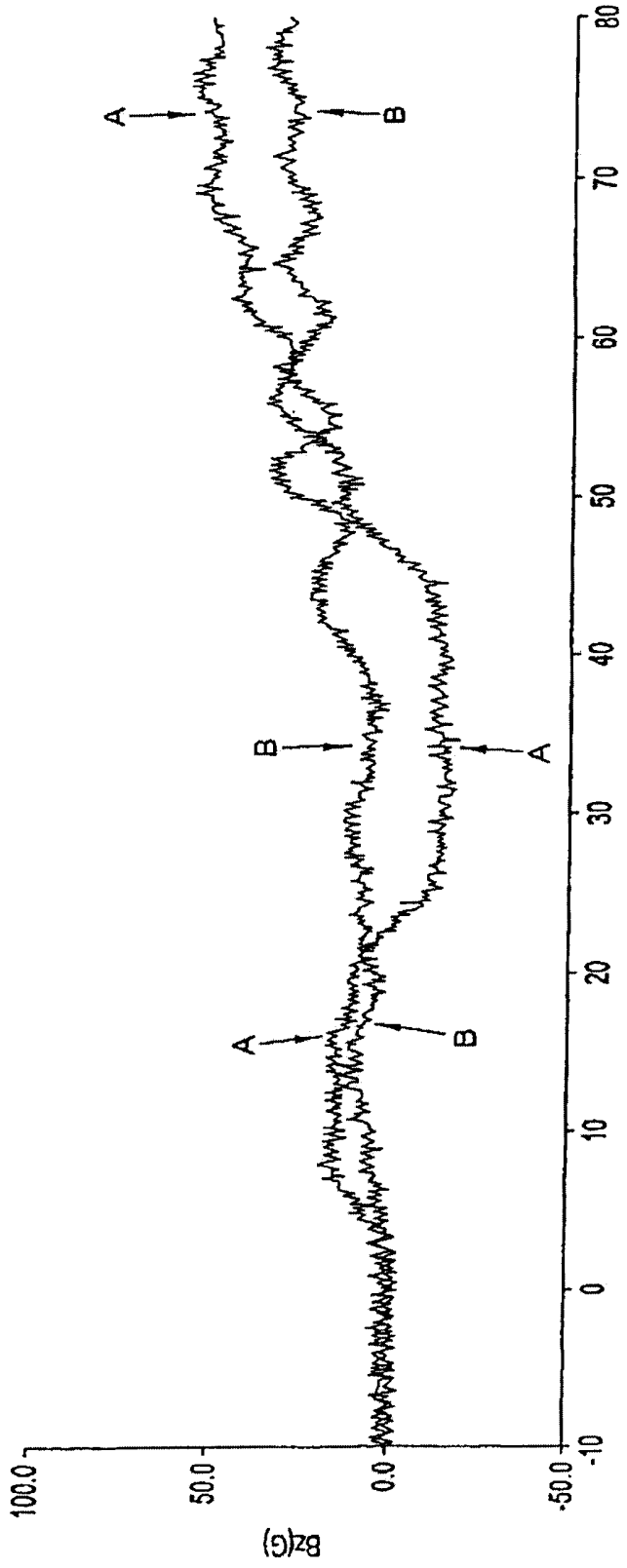
Obr. 15



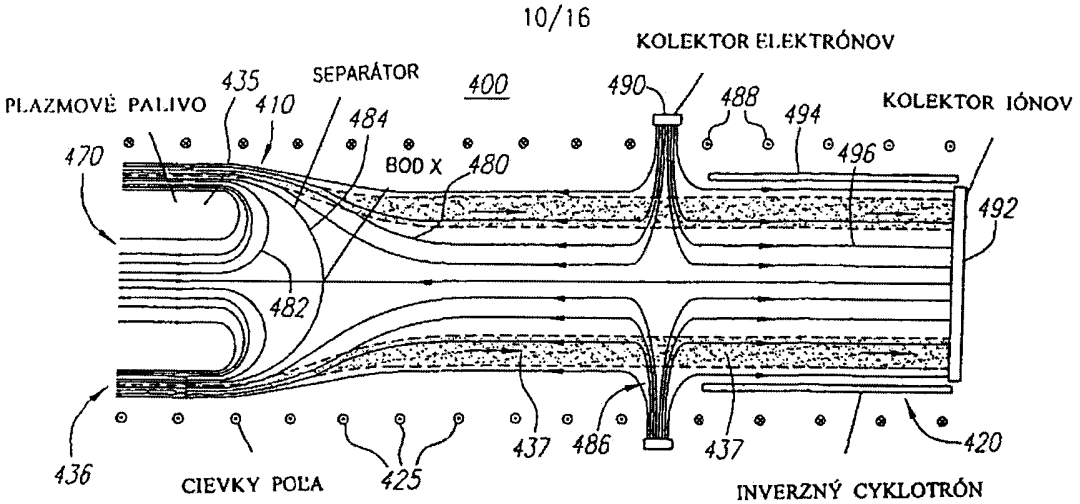
Obr. 16



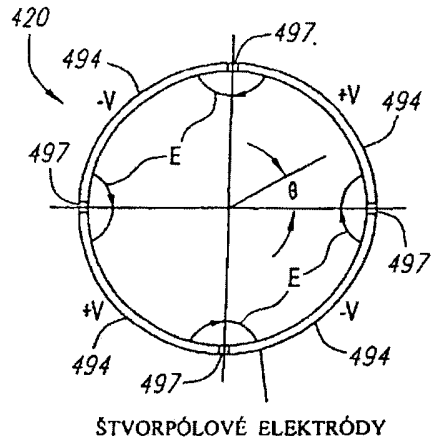
Obr. 17


A - VNÚTRAJŠOK VRSTVY PALIVA
B – VONKAJŠIA ČASŤ VRSTVY PALIVA
Bz(G)
100.0
50.0
0.0
-50.0
-10
0
10
20
30
40
50
60
70
80
ČAS (V MIKROSEKUNDÁCH)
A
B

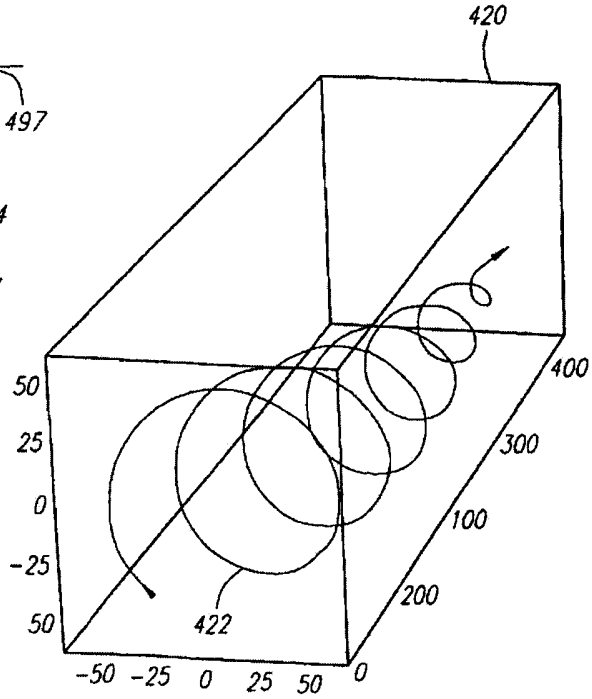
Obr. 18



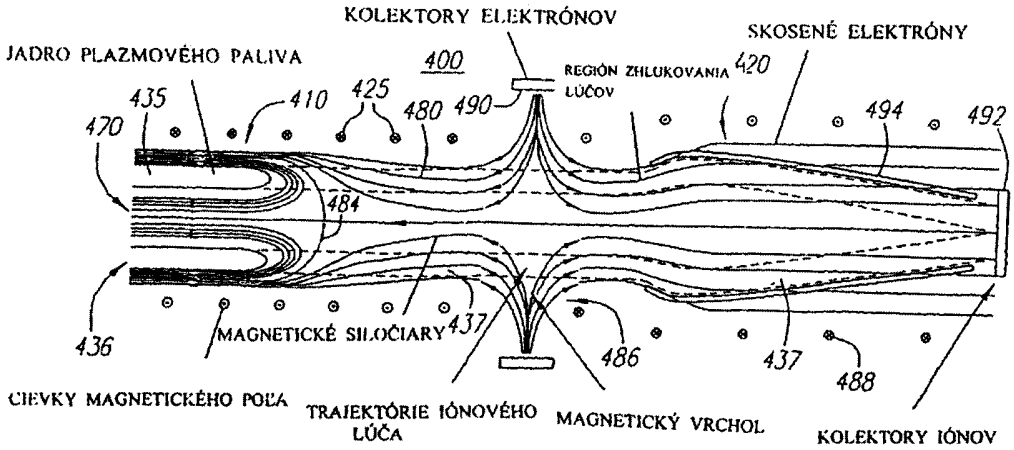
Obr. 19A



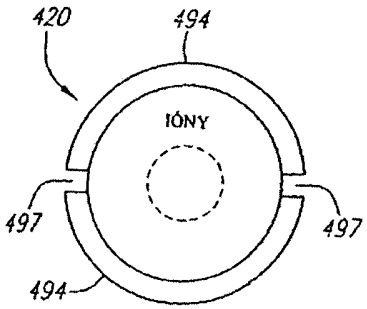
Obr. 19B



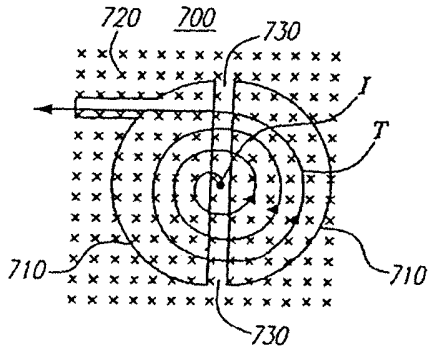
Obr. 19C



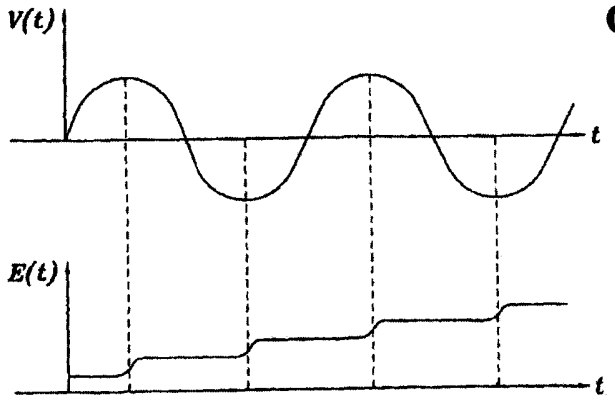
Obr. 20A



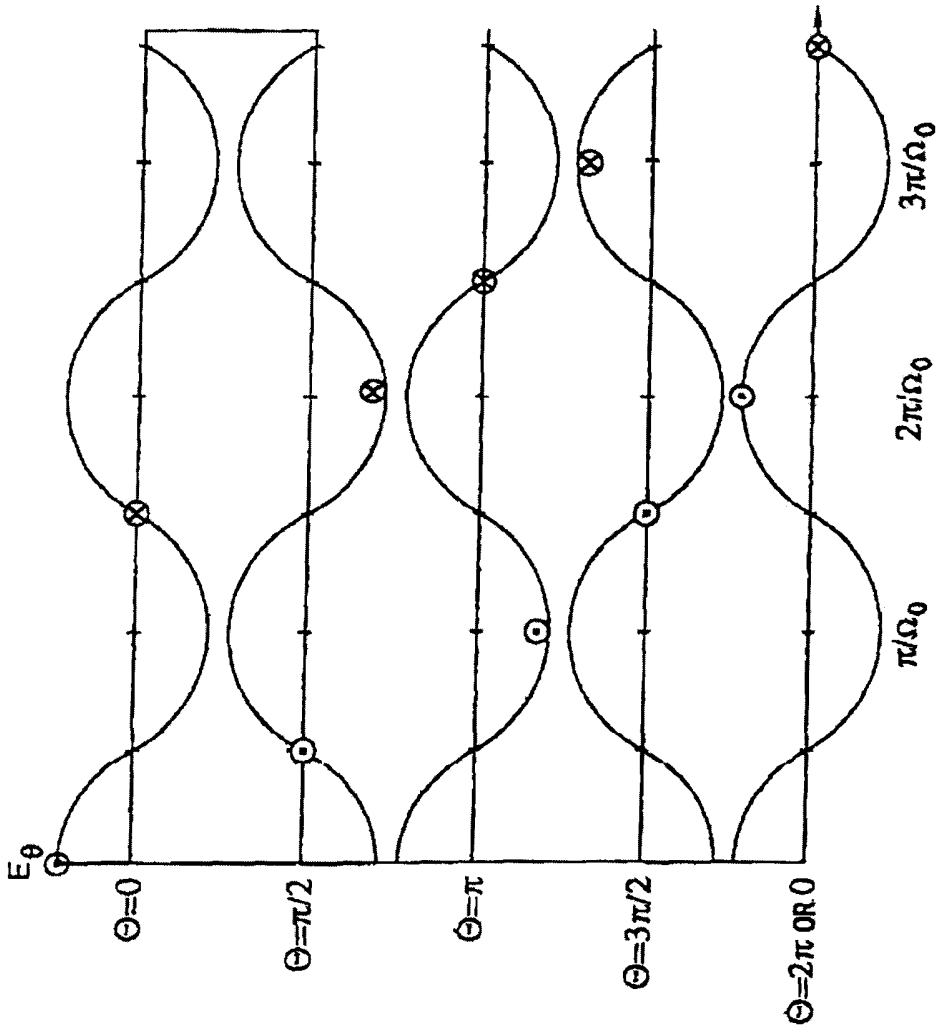
Obr. 20B



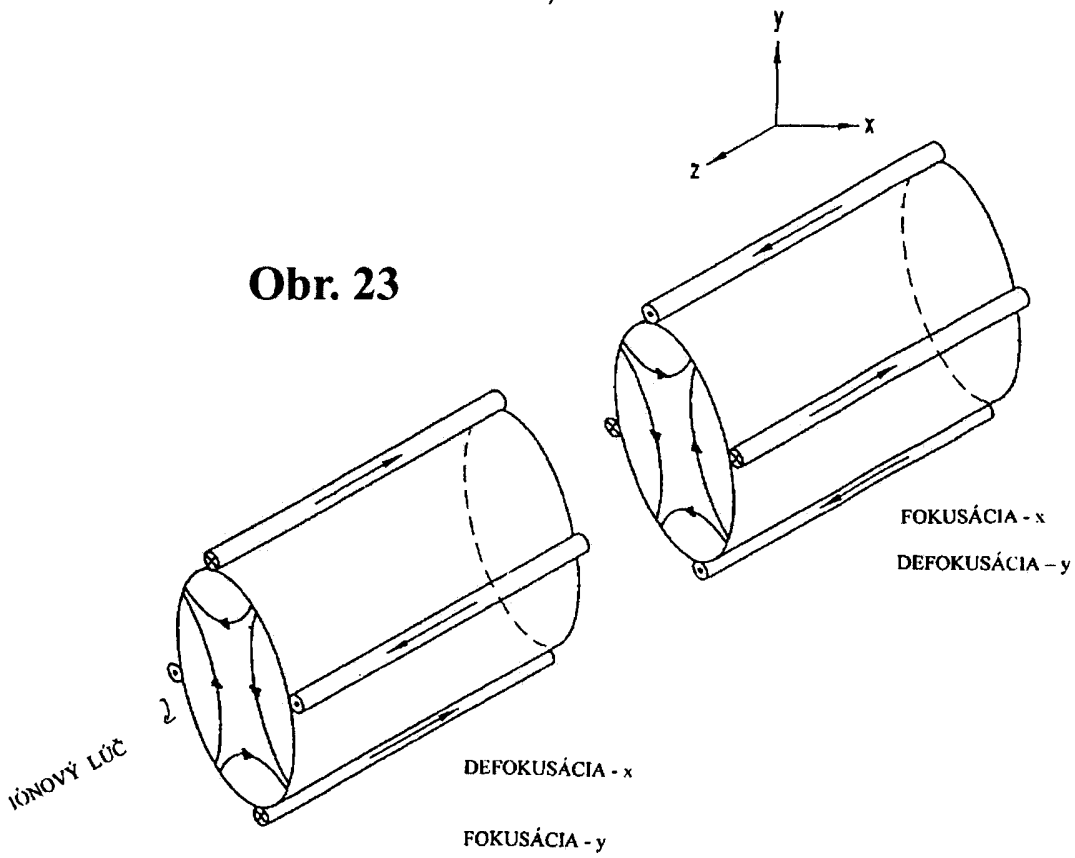
Obr. 21B



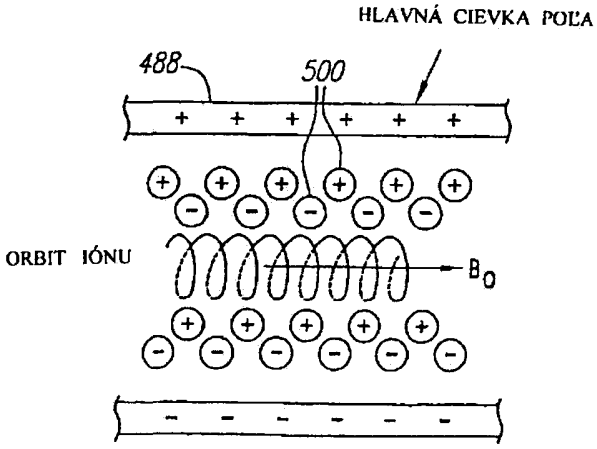
Obr. 21C



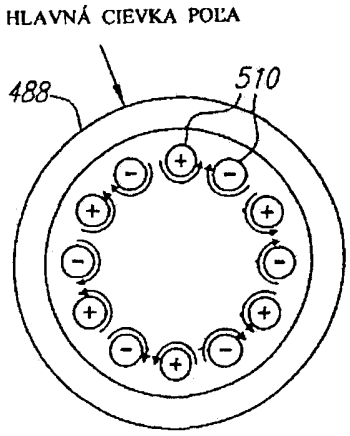
Obr. 22



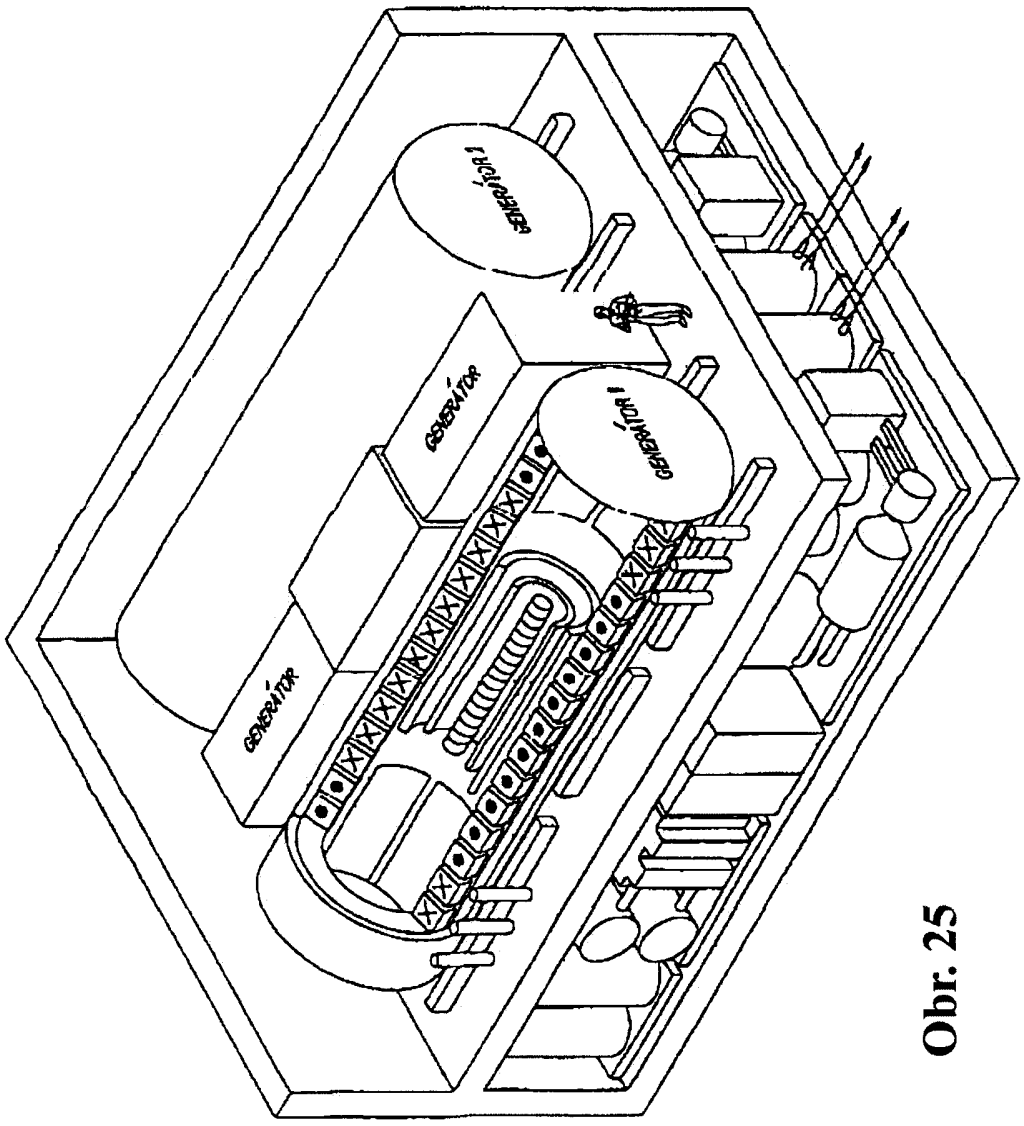
Obr. 23



Obr. 24A

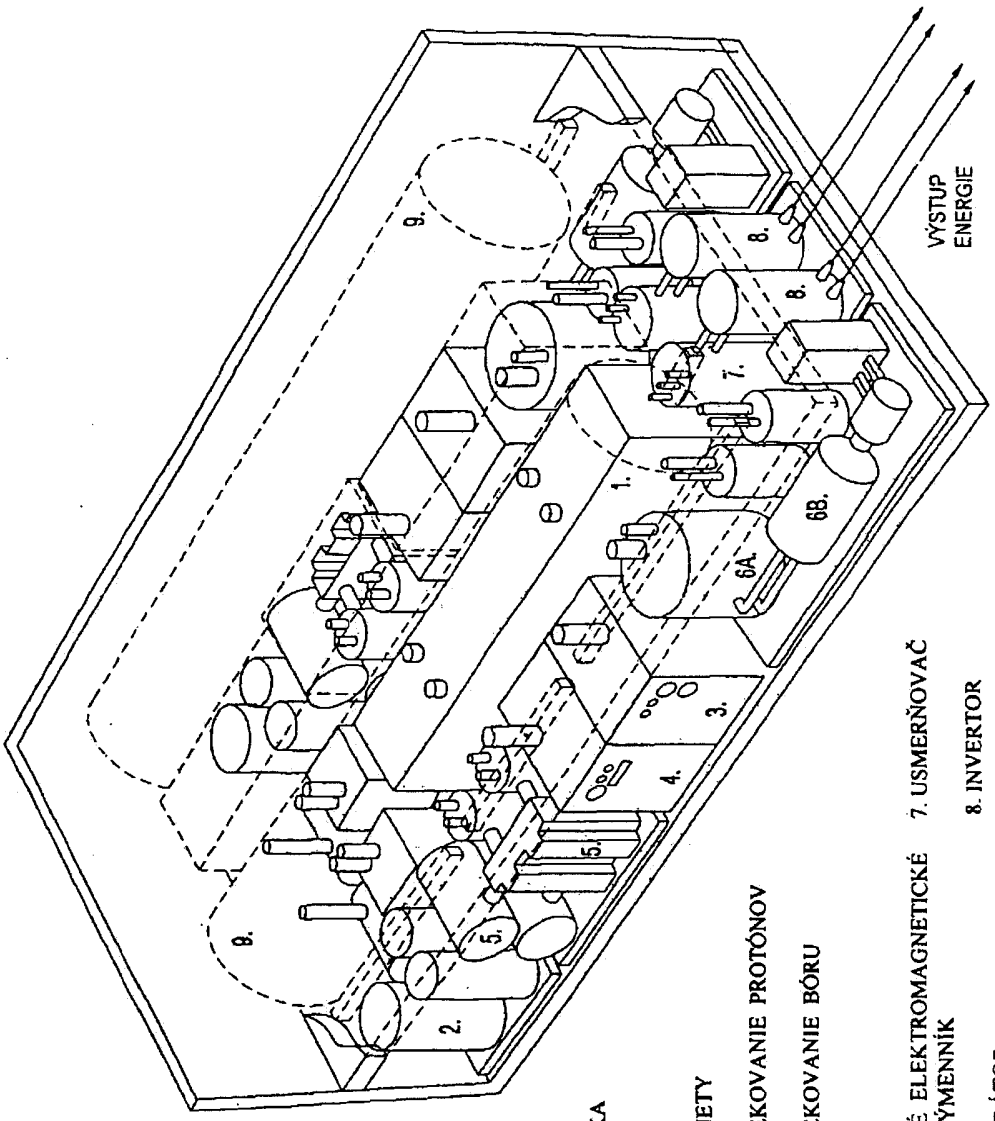


Obr. 24B



Obr. 25

Obr. 26



POMOCNÉ ZARIADENIE REAKTORA

KONDENZÁTOROVÁ BANKA PRE INDUKČNÝ ŠTART

KRYOGÉNNE ZARIADENIE PRE SUPRAVODIVÉ MAGNETY

AKCELERÁTOR NA VSTREKOVANIE PROTÓNOV

AKCELERÁTOR NA VSTREKOVANIE BÓRU

VÁKUOVÉ ČERPADLÁ

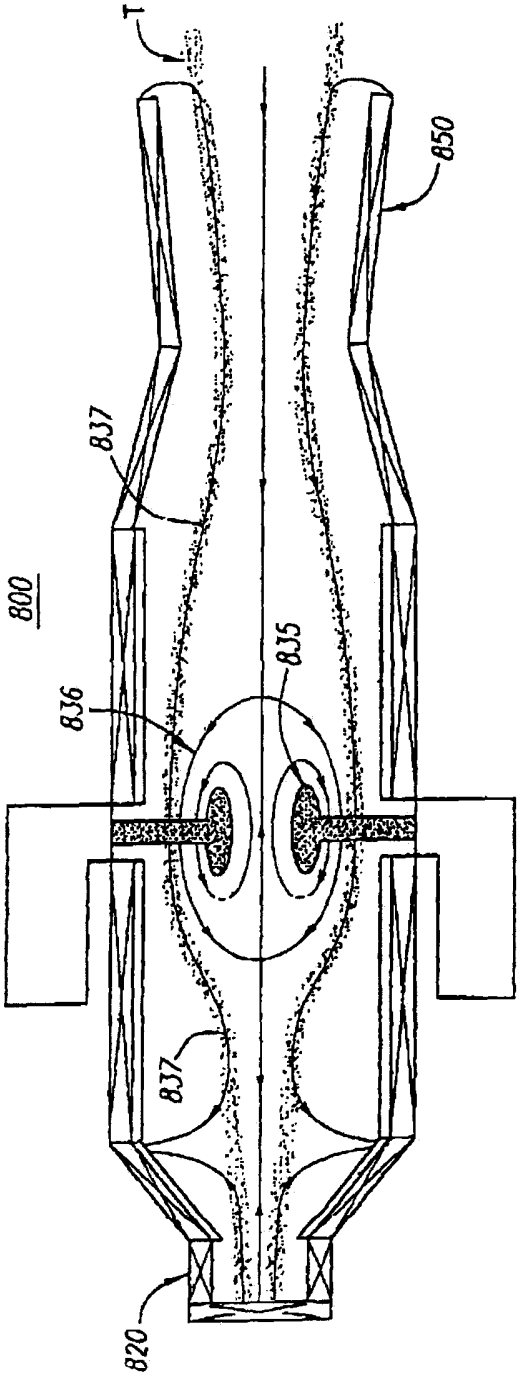
LÍTIOVÉ ALEBO TANKOVÉ ELEKTROMAGNETICKÉ ČERPADLO A TEPELNÝ VÝMENNÍK

PARNÁ TURBÍNA A GENERÁTOR

7. USMERŇOVAČ

8. INVERTOR

9. OBRYS REAKTORA



Obr. 27

Koniec dokumentu