

Energia gwiazd

Energia dla naszej planety





Fusion Expo

Koncepcja ekspozycji (1993):

P.J. Paris (CRRP-EPFL, Lausanne - CH)
W. Kienzle (CERN, Genève - CH)

Adaptacja (2001):

Teksty:

B. de Gentile (CEA/Cadarache - F)
R. Saison (DG Research, European Commission)
D. Bartlett (DG Research, European Commission)
F. Casci (EFDA - Garching - D)
W. Spears (ITER - Garching - D)

Grafika:

H. Desmedt (DG Research, European Commission)

Konsultacja techniczna:

H. Desmedt (DG Research, European Commission)
U. Paccagnella (Consorzio RFX - Padova - I)

Wersja polska:

A. Furmanek (EFDA – Garching - D)

Konsultacja wersji polskiej:

J. Sielanko (IF UMCS - Lublin - PL)
Z. Składanowski (IFPiLM – Warszawa – PL)
S. Jednoróg (IFPiLM – Warszawa – PL)

Sponsor i koordynator:

European Fusion Development Agreement (EFDA)
Consorzio RFX (Padova - I)

Spis treści

Dział A:	Wprowadzenie: Od fizyki plazmy do badań i rozwoju w dziedzinie syntezy jądrowej.	4
Dział B:	Magnetycznie utrzymywana synteza jądrowa. Podwyższanie parametrów plazmy tokamaka.	24
Dział C:	Badania i rozwój syntezy jądrowej w Europie.	42
Dział D:	Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie: prace podstawowe i aplikacyjne.	62

Multimedia: CD-Rom

Proponowana literatura:

**Tokamaks (second edition)
John Wesson
Oxford Science Publications (1997)
ISBN 0-19-856293-4**

**Strony internetowe Europejskiej Sieci Informacji
o Syntezie Jądrowej:
<http://www.fusion-eur.org>
<http://www.efda.org>**

Dodatkowe informacje:

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

Bezpieczne i trwałe źródła energii mają podstawowe znaczenie dla naszego standardu życia

W ciągu ostatnich 40-tu lat ludność świata wzrosła z 3 do 6 miliardów, a do roku 2100 ma wzrosnąć do 8-12 miliardów, przy czym największy przyrost ma wystąpić w krajach rozwijających się.

Możliwe do osiągnięcia oszczędności energetyczne w krajach wysoko uprzemysłowionych zostaną znacznie przewyższone potrzebami krajów rozwijających się. Różne prognozy przewidują dwu a nawet trzykrotny wzrost zapotrzebowania na energię w obecnym wieku.

Wydajne i bezpieczne źródła energii odgrywają decydującą rolę przy zapewnieniu odpowiedniego standardu życia.

4

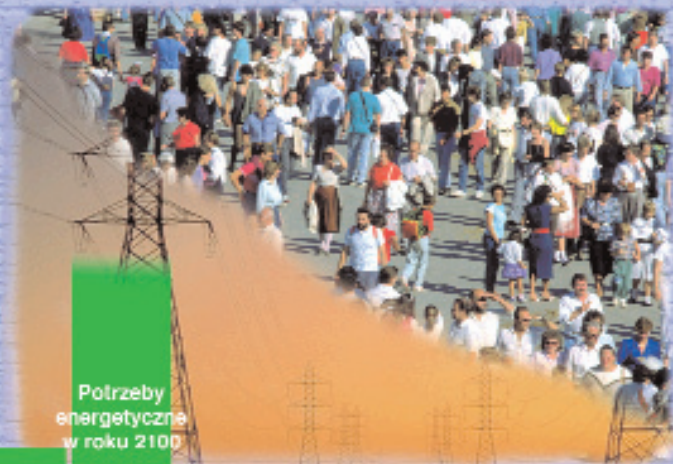
Z ustaleń Zielonej Karty Zaopatrzenia w Energię opracowanej przez Komisję Europejską wynika, że jeśli nie zostaną podjęte środki zaradcze, to w roku 2020 Wspólnota Europejska będzie zmuszona importować ponad 70% energii.

Potrzeby energetyczne rosnącej populacji świata

Szacuje się, że do roku 2100
zaludnienie ziemi wzrośnie
do 8-12 miliardów

Obecnie
6 miliardów

W roku
2100
8-12
miliardów



Potrzeby
energetyczne
w roku 2100

Obecne
potrzeby
energetyczne

**Zapotrzebowanie na energię wzrośnie zdecydowanie
w obecnym wieku.**

Jakie źródła energii zaspokoją taki wzrost potrzeb?

Energia syntezy jądrowej jest jedną z niewielu, które mogą być wykorzystywane w przyszłości

Duża część energii zużywanej w Europie pochodzi z importu (50% w 1999r). Jeśli nie podejmie się środków zaradczych udział ten może wzrosnąć w nadchodzących dekadach do 70%. Źródłami energii mogącymi pokryć to zapotrzebowanie są paliwa kopalne, odnawialne źródła energii, energia atomowa, a w przyszłości również energia syntezy jądrowej.

Paliwa kopalne muszą być najczęściej importowane, a ich zasoby są na wyczerpaniu. Używanie ich stanowi poważne zagrożenie dla środowiska naturalnego i klimatu.

W przyszłości będą więc potrzebne wydajne i nieemitujące CO₂ źródła energii. Odnawialne źródła energii mają wprawdzie duży potencjał, lecz możliwość ich użycia do zaspokojenia podstawowych potrzeb energetycznych jest ciągle trudna do zrealizowania. Duża część zapotrzebowania na energię mogłaby pochodzić z reakcji rozszczepienia atomów, lecz nie cieszy się to akceptacją społeczną.

6

Energia syntezy jądrowej może pomóc rozwiązać te problemy i to na tysiąclecia. Paliwo do syntezy jądrowej jest szeroko dostępne (np. w wodzie morskiej), a jego zapasy są praktycznie niewyczerpalne. Ponadto ten rodzaj energii jest szczególnie przydatny do pokrycia podstawowego zapotrzebowania na energię elektryczną. Ogromną zaletą energii pochodzącej z syntezy jądrowej jest to, że jej produkcja jest bezpieczna dla ludzi i środowiska naturalnego. Przy jej wytwarzaniu nie wydzielają się gazy cieplarniane.

Synteza jądrowa może stać się jednym z przyszłościowych źródeł energii.

Dlaczego synteza jądrowa?

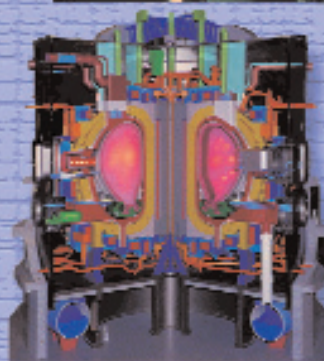


Węgiel ropa i gaz:

- ograniczone zapasy
- efekt cieplarniany
- zależność od importu surowców

Inne źródła energii:

- zasoby?
- społeczna akceptacja?
- koszty?



Synteza jądrowa należy do jednego z niewielu przyszłościowych źródeł energii

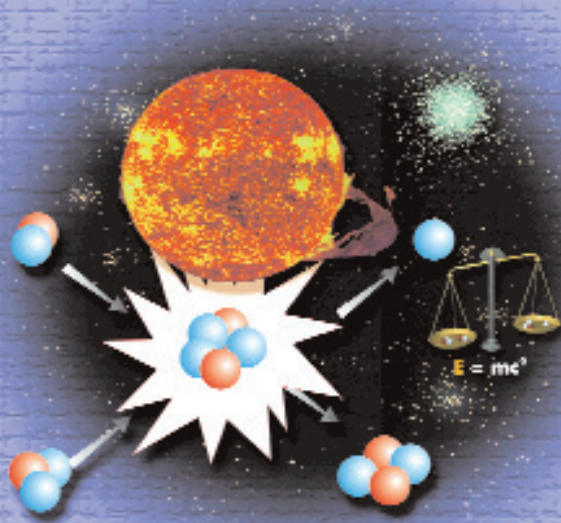
Źródło energii gwiazd

Reakcja syntezy jądrowej jest źródłem energii słońca i gwiazd – jądra atomów lekkich łączą się tworząc jądra cięższych atomów. We wnętrzu słońca w temperaturze 10 mln °C jądra wodoru łączą się tworząc hel. Proces ten jest źródłem energii, która wypromieniowana w postaci światła umożliwia życie na ziemi.

We wnętrzu słońca „paliwo wodorowe” jest ogrzewane i utrzymywane siłami grawitacji słońca. Na ziemi utrzymanie tego paliwa musi być zrealizowane w inny sposób, a do osiągnięcia „zapłonu” reakcji syntezy potrzebna jest temperatura powyżej 100 mln °C, czyli około 10 razy wyższa niż temperatura słonecznego jądra.

Energia gwiazd

Reakcja syntezy jądrowej zachodzi w sposób naturalny we wnętrzu gwiazd w temperaturach około 10 mln °C



Energia zostaje uwolniona, gdy jądra dwóch atomów lekkich łączą się

Aby synteza jądrowa zaszła na ziemi potrzebna jest temperatura wyższa niż 100 mln °C

Fizyka plazmy podstawą badań syntezy jądrowej

Rzeczywisty rozwój fizyki plazmy został zapoczątkowany w latach 20-tych i wywołany między innymi próbą zrozumienia istoty źródła energii gwiazd.

Jeżeli gaz zostanie wystarczająco mocno podgrzany, elektrony opuszczają powłoki elektronowe atomów. Tak zjonizowany gaz nazywany „plazmą” (czwarty stan skupienia materii) jest dobrym przewodnikiem prądu elektrycznego. Wszechświat składa się niemal wyłącznie z plazmy (więcej niż 99%).

Znaczny wzrost zainteresowania fizyką plazmy wywołała teoria Atkinsona i Houtermansa (1928) wskazująca na energię syntezy jądrowej jako możliwego źródła energii wnętrza gwiazd.

Fizyka plazmy podstawą badań syntezy jądrowej

Materia występuje w kilku stanach skupienia w zależności od jej temperatury:



Plazma



Elektrony zostają uwolnione z powłok elektronowych atomów i mogą poruszać się swobodnie

Gaz



Elektrony krążą wokół jąder atomów

Ciecz

Ciało stałe

Przykłady występowania i zastosowania plazmy



Głównica



Spawanie plazmowe



Plazma plazmatrony



Neony

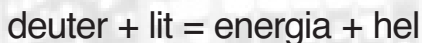
Plazma – każda cząstka posiada ładunek elektryczny

Na ziemi „najłatwiej” przeprowadzić reakcję syntezy pomiędzy jądrami dwóch izotopów wodoru

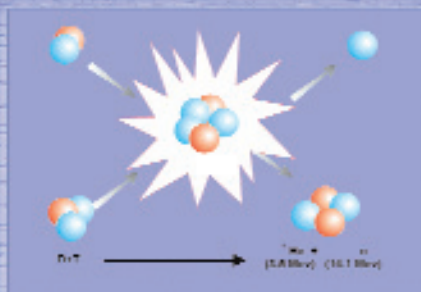
Reakcja syntezy jądrowej, którą najłatwiej przeprowadzić na ziemi, to synteza dwóch izotopów wodoru – deuteru (D) i trytu (T). Produktem tej reakcji jest cząstka α (jądro atomu helu) i neutron posiadające energię kinetyczną 17,6 MeV. Jeden gram paliwa deuterowo-trytowego może dostarczyć 100 megawatogodzin energii elektrycznej. Aby uzyskać tę samą ilość energii należałoby spalić około 11 ton węgla.

Deuter nie jest izotopem radioaktywnym i może być wytwarzany z wody – 1 m³ wody zawiera około 30 g deuteru. Radioaktywny tryt występuje na ziemi tylko w niewielkich ilościach, lecz może być wytwarzany z litu – lekkiego metalicznego pierwiastka występującego w ogromnych ilościach w skorupie ziemskiej i wodzie morskiej.

Tryt może być wytwarzany przez napromieniowanie litu neutronami uwalnianymi podczas syntezy jądrowej. Ostatecznie więc cykl paliwowy tej reakcji przedstawia się następująco:



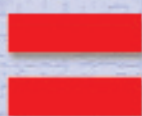
Synteza deuteru i trytu



Na ziemi „najłatwiej”
przeprowadzić reakcję
syntezy pomiędzy jądrami
dwóch izotopów wodoru
– deuteru i trytu



1 gram paliwa deuter-tryt



11 ton węgla

Bez emisji CO₂



Deuter uzyskuje się z wody a tryt wytwarzany jest
z litu – lekkiego metalicznego pierwiastka

Reakcja syntezy jądrowej stawia bardzo wysokie wymagania dotyczące temperatury i termicznej izolacji plazmy

Reakcja syntezy zachodzi tylko wtedy, kiedy prędkość zderzających się jąder atomów jest wystarczająco duża do pokonania sił odpychania elektrostatycznego. Aby doprowadzić do syntezy deuteru i trytu potrzebna jest więc temperatura powyżej 100 mln °C, znacznie wyższa od temperatury potrzebnej do zjonizowania gazu i przekształcenia go w plazmę.

Osiągnięcie takich temperatur wymaga zastosowania bardzo intensywnego „grzania”. Jednocześnie straty ciepła muszą być ograniczone do minimum poprzez termiczne izolowanie plazmy od ścian reaktora.

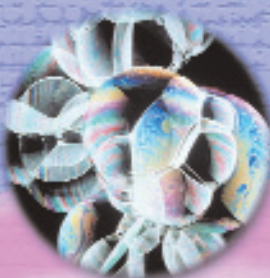
Zadanie to wymaga zarówno zrozumienia złożonych procesów fizycznych zachodzących w plaźmie, jak też opracowania i zastosowania nowych wyrafinowanych technologii.

Wysokie wymagania syntezy jądrowej

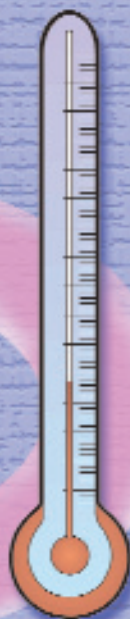
Trzy warunki muszą być spełnione
jednocześnie



Czas termicznego
utrzymania plazmy
– kilka sekund



Gęstość plazmy
– 1 mg/m^3



Temperatura plazmy
– powyżej 100 mln $^{\circ}\text{C}$

Magnetyczne utrzymywanie plazmy

W magnetycznie utrzymywanej syntezie jądrowej stosuje się silne pole magnetyczne celem termicznego izolowania plazmy od ścian reaktora. Ukształtowanie pola magnetycznego w formie torusa pozwoliło znacznie zredukować straty termiczne.

Używa się tu „paliwa” o niewielkiej gęstości (mniejszej niż gęstość powietrza atmosferycznego). Metoda ta umożliwia utrzymanie energii plazmy przez kilka sekund i pozwala na uzyskanie ciągłego procesu syntezy.

W przypadku bezwładnościowo utrzymywanej syntezy jądrowej stosuje się lasery lub działa jonowe ogromnej mocy do ogrzewania i zagęszczania małych porcji paliwa (do gęstości 10 000-krotnie przewyższającej gęstość ciała stałego). Prowadzi to do „zapłonu” i rozprzestrzeniania się reakcji w zagęszczonym paliwie.

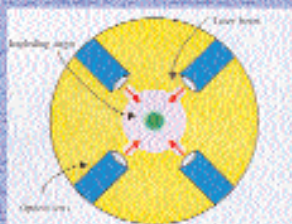
Badania i rozwój w dziedzinie syntezy jądrowej



Magnetycznie utrzymywana synteza jądrowa – możliwość trwałego procesu



Bezładnościowo utrzymywana synteza jądrowa - mikroeksplozje



Rozwój i postęp w badaniach reakcji syntezy jądrowej jest wynikiem ogólnościatowej współpracy

Bezpieczeństwo jest podstawową cechą reaktorów syntezy jądrowej

Reaktor syntezy jądrowej jest rodzajem pieca, w którym „pali się” jednocześnie bardzo mała ilość „paliwa plazmowego” (około 1 g mieszanki deuteru i trytu w objętości 1000 m³). W przypadku awarii plazma „wygasa” samoczynnie w ciągu kilku sekund, tak że zjawisko podobne do stopienia się rdzenia w zwykłym reaktorze jądrowym jest absolutnie niemożliwe.

Zarówno paliwo do reaktora (deuter i lit) jak i „popiół” (produkt reakcji syntezy – hel) nie są radioaktywne. Konieczny do reakcji syntezy jądrowej radioaktywny tryt (okres połowicznego rozpadu 12,3 lat) będzie wytwarzany i zużywany bezpośrednio w reaktorze. Uwalniane podczas reakcji syntezy szybkie neutrony napromieniowują wewnętrzne ściany komory plazmowej, które aktywizują się i pozostają radioaktywne po zakończeniu pracy reaktora.

18

Synteza deuteru i trytu jest reakcją, w której emitowane jest promieniowanie radioaktywne (neutrony i cząstki α), a gorąca plazma jest również źródłem promieniowania rentgenowskiego. Radioaktywność ta jednak zanika równocześnie z wygaśnięciem reakcji syntezy.

Reaktor syntezy jądrowej jest tak zbudowany, że nawet w najgorszym wypadku nie zaistnieje potrzeba ewakuacji mieszkającej w pobliżu ludności.

Aspekty bezpieczeństwa

W reaktorze znajduje się nie więcej niż 1 gram mieszanki deuteru i trytu



Nawet największa awaria reaktora nie wymaga ewakuowania mieszkającej w pobliżu ludności

Bezpieczeństwo jest jedną z podstawowych cech reaktorów syntezy jądrowej

Elektrownie wykorzystujące energię syntezy jądrowej będą miały tylko niewielki wpływ na środowisko naturalne

Reaktory syntezy jądrowej nie wytwarzają gazów cieplarnianych takich jak CO_2 , SO_2 , NO_x , które są niebezpieczne dla środowiska naturalnego i zaburzają równowagę klimatyczną ziemi.

Obserwując postęp technologiczny można przewidywać, że uciążliwość dla środowiska naturalnego elektrowni plazmowych (wykorzystujących energię syntezy jądrowej) będzie dalej zmniejszana poprzez minimalizowanie zużycia trytu, bądź wyeliminowanie go jako składnika paliwa oraz przez użycie do budowy reaktorów materiałów tylko w niewielkim stopniu aktywujących się. Promieniowanie neutronowe bowiem aktywuje wewnętrzne części komory plazmowej i pogarsza stopniowo ich właściwości. Powoduje to konieczność okresowej ich wymiany i tworzy odpad radioaktywny. Ten rodzaj radioaktywności jednak szybko zmniejsza się (kilka rzędów wielkości w ciągu kilku dziesiątków lat). Z tego względu 30 do 40% odpadów promieniotwórczych, powstających w ilościach porównywalnych z wytwarzanymi przez zwykłe reaktory jądrowe, może być natychmiast przetworzone i użyte. Pozostałe 60% można ponownie użyć po upływie około 100 lat. Jedynie kilka procent odpadów musi być zabezpieczone i składowane przez dłuższy czas.

Niewielki wpływ na środowisko naturalne



Europejski tokamak JET - Culham (Anglia)

Synteza jądrowa jest przyjazna dla środowiska naturalnego:

- zerowa emisja gazów cieplarnianych
- brak odpadów radioaktywnych o długim okresie połowicznego rozpadu
- materiały zastosowane do budowy reaktora mogą być ponownie użyte po około 100 latach

Elektrownie plazmowe są szczególnie predysponowane do zaspokajania potrzeb energetycznych wielkich miast

Rosnące potrzeby energetyczne wielkich miast mogą zaspokoić tylko wielkie elektrownie. Elektrownia plazmowa będzie różnić się od innych typów elektrowni jedynie rdzeniem wytwarzającym energię (komora reaktora, cewki elektromagnetyczne i urządzenia mechaniczne). Pozostałe części elektrowni wraz z turbinami i generatorami wytwarzającymi prąd będą takie same.

Elektrownia plazmowa będzie zużywała bardzo małe ilości paliwa.

Dla porównania:

- klasyczna elektrownia o mocy 1 gigawata spala ponad 1,5 miliona ton węgla kamiennego w ciągu roku,
- elektrownia plazmowa o tej samej mocy będzie zużywała mniej niż 100 kg deuteru i około 10 ton litu (niewielka ciężarówka jeden raz w roku).

Paliwo dla elektrowni plazmowych jest tanie i ogólnie dostępne a jego zapasy są niemal niewyczerpalne – mogą starczyć na tysiąclecia. Koszt wytwarzania prądu w klasycznej elektrowni określa głównie koszt paliwa. W elektrowni plazmowej natomiast głównym składnikiem kosztów będzie sama konstrukcja reaktora, okresowa wymiana jego wewnętrznych części oraz koszty demontażu i ewentualnego składowania po zakończeniu eksploatacji.

Elektrownia plazmowa – podstawowe zaopatrzenie w energię elektryczną

Zarówno ilość wielkich miast jak i liczba ich mieszkańców, a więc i ich zapotrzebowanie na energię elektryczną, rosną nieprzerwanie.

Elektrownia plazmowa nie będzie zajmować dużych obszarów i będzie zużywać tylko niewielkie ilości paliwa.



Paliwo plazmowe jest tanie i występuje na świecie w niemal niewyczerpalnych ilościach. Jego zapasy mogą starczyć na tysiąclecia

W magnetycznie utrzymywanej syntezie jądrowej wykorzystuje się oddziaływanie pola magnetycznego i elektrycznego na plazmę

Elektrycznie naładowane cząstki plazmy – jony i elektrony – mają właściwość poruszania się po spiralnych torach wokół linii sił pola magnetycznego. Poprzez odpowiednie ukształtowanie tego pola utrzymuje się plazmę we wnętrzu komory reaktora w pewnej odległości od jej ścian, co zdecydowanie zmniejsza straty termiczne gorącej plazmy.

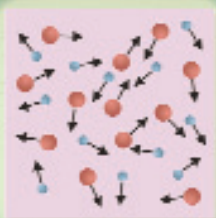
Pole magnetyczne wytwarzane jest przez cewki elektromagnetyczne umieszczone wokół komory reaktora, a w niektórych typach reaktorów również przez prąd elektryczny płynący w strumieniu samej plazmy (tokamak).

Magnetyczne utrzymywanie plazmy umożliwia uzyskanie ciągłego procesu syntezy jądrowej.

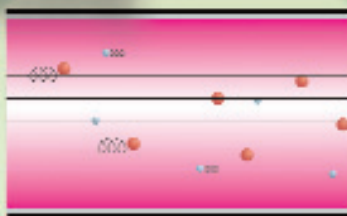
24

Program europejski koncentruje się nad rozwojem magnetycznie utrzymywanej syntezy jądrowej

Magnetyczne utrzymywanie syntezy jądrowej



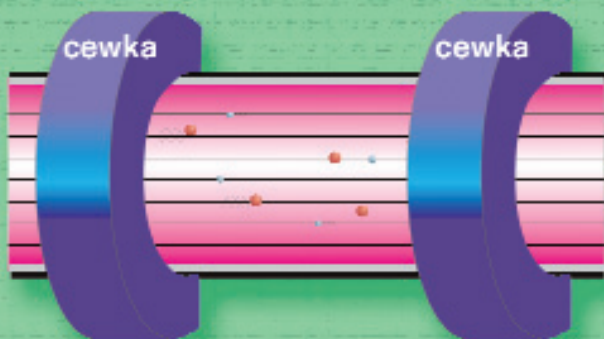
Gorąca plazma poza polem magnetycznym



Gorąca plazma w polu magnetycznym

Cząstki plazmy poruszają się spiralnie wokół linii sił pola magnetycznego.

Redukuje to zdecydowanie straty energii w kierunku prostopadłym do linii sił pola.



Pole magnetyczne jest wytwarzane przez cewki elektromagnetyczne

W magnetycznie utrzymywanej syntezie jądrowej wykorzystuje się oddziaływanie pola magnetycznego i elektrycznego na plazmę

Magnetycznie utrzymywana synteza jądrowa.
Podwyższanie parametrów plazmy tokamaka.

Konfiguracje toroidalne, w odróżnieniu od liniowych, redukują znacznie ucieczkę cząstek do ścian komory i gwarantują lepsze utrzymywanie plazmy

W początkowym okresie prac nad syntezą jądrową stosowano liniową konfigurację pola magnetycznego (reaktory zwierciadlane). W cylindrycznej komorze plazmowej równoległe do niej pole magnetyczne utrzymuje cząstki w kierunku prostopadłym do jej osi. Straty energii na końcach cylindra zredukowane są natomiast poprzez odpowiednio uformowane „zwierciadła magnetyczne”, które odbijają pewną ilość cząstek z powrotem do wnętrza cylindra.

Straty te mogą być wyeliminowane poprzez zakrzywienie cylindra i utworzenie zamkniętego pierścienia (torusa). Utworzone w ten sposób pole magnetyczne nazywa się polem toroidalnym. Jednak również i takie pole nie jest w stanie utrzymać rozszerzającej się pod własnym ciśnieniem plazmy.

Dlatego też stosowane są dodatkowe pola „poloidalne”. Wytwarzać można je przez oddzielne zestawy cewek, jak w tokamakach, lub przez odpowiednie ukształtowanie cewek, jak w przypadku stellaratorów. Każda z tych konfiguracji ma swoje zalety.

Konfiguracje toroidalne

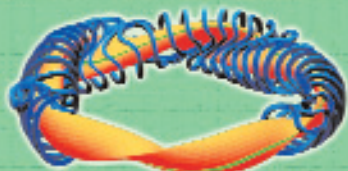
Aby zredukować straty energii plazmy w cylindrycznym polu magnetycznym można pole to odpowiednio „zagłąć” nadając mu formę pierścienia



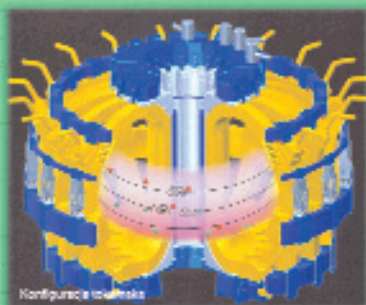
Pierścień plazmowy

Pierścień plazmowy rozszerza się jednak pod własnym ciśnieniem

Poprzez dodatkowe skręcenie pola magnetycznego wzdłuż jego osi można pierścień plazmowy ustabilizować



Konfiguracja di-dimera



Konfiguracja tokamaka

Konfiguracje toroidalne umożliwiają dobre odizolowanie termiczne plazmy od ścian reaktora

Magnetycznie utrzymywana synteza jądrowa.
Podwyższanie parametrów plazmy tokamaka.

Tokamaki i stellaratory

Silne toroidalne pole magnetyczne tokamaka (kilka tesli) wytwarzane jest przez cewki elektromagnetyczne otaczające pierścieniową komorę reaktora.

Toroidalny prąd o dużym natężeniu (10 do 20 milionów amper) płynący przez plazmę indukowany jest przez transformator i wytwarza własne poloidalne pole magnetyczne. Ponieważ transformator nie jest w stanie indukować prądu stałego, przepływ prądu przez plazmę musi być podtrzymywany innymi metodami.

W stellaratorze nie indukuje się prądu toroidalnego. Pole magnetyczne stellaratora wytwarzane jest przez system odpowiednio ukształtowanych cewek i jest osiowo niesymetryczne. Ten rodzaj reaktora ma właściwość pracy ciągłej.

Tokamaki i stellaratory

Tokamaki

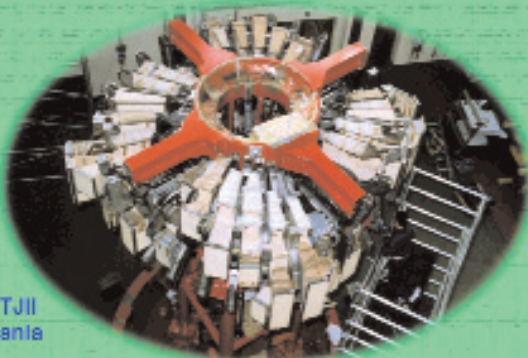


- silne pole magnetyczne
- silny prąd elektryczny w pierścieniu plazmy (10-20 mln A)
- pracuje podobnie jak wielki transformator

Tokamak Tore Supra
CAE / Cadarache - Francja

Stellaratory

- złożona konfiguracja pola magnetycznego
- właściwość pracy ciągłej



Stellarator TJII
Ciemet / Medryt - Hiszpania

Tokamaki mają prosty układ cewek i pola magnetycznego

Stellaratory mają właściwość pracy ciągłej bez dodatkowych systemów.

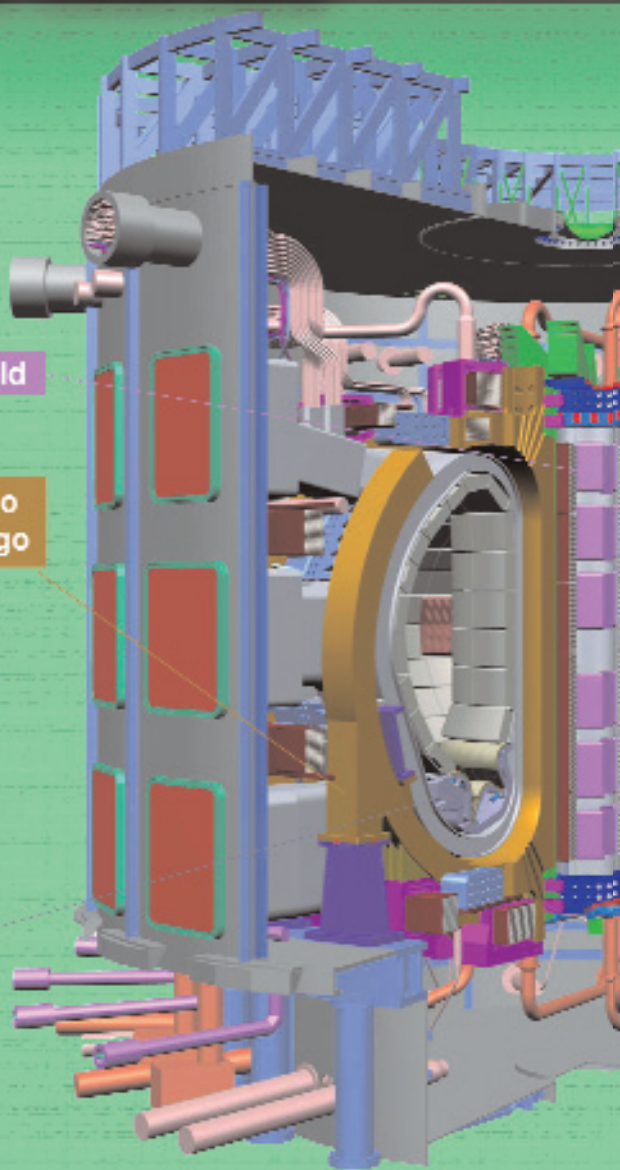
Magnetycznie utrzymywana synteza jądrowa.
Podwyższanie parametrów plazmy tokamaka.

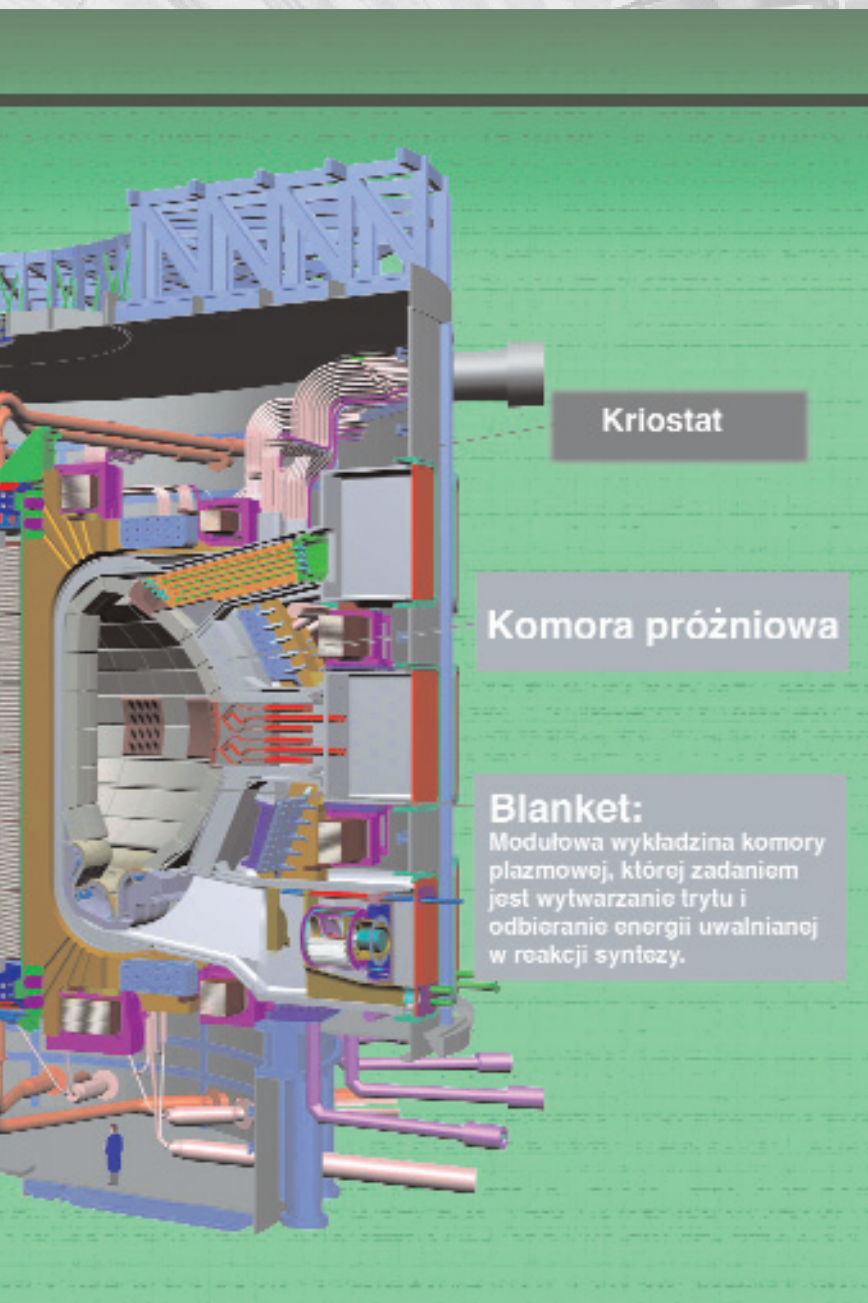
Budowa tokamaka

Centralny solenoid

Cewka toroidalnego pola magnetycznego

Divertor:
Urządzenie
oddzielające
zanieczyszczenia
z plazmy





Kriostat

Komora próżniowa

Blanket:

Modułowa wykładzina komory plazmowej, której zadaniem jest wytwarzanie trytu i odbieranie energii uwalnianej w reakcji syntezy.

Magnetycznie utrzymywana synteza jądrowa.
Podwyższanie parametrów plazmy tokamaka.

Grzanie oporowe

Podobnie jak w przypadku zwykłych przewodników, prąd elektryczny płynąc przez plazmę podgrzewa ją. Jest to wynikiem zderzeń elektronów z innymi cząstkami plazmy.

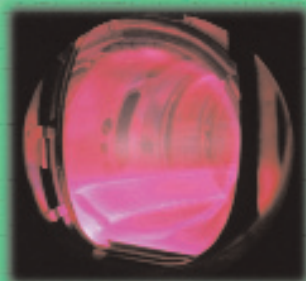
Ten sposób ogrzewania ma jednak swoiste ograniczenia, ponieważ:

- wraz ze wzrostem temperatury zmniejsza się częstość zderzeń, co stopniowo zmniejsza efektywność grzania,
- nawet przy doskonałej izolacji termicznej plazma traci energię na skutek elektromagnetycznego promieniowania elektronów plazmy.

Grzaniem oporowym można więc podnieść temperaturę plazmy najwyżej do 10 - 20 milionów stopni.

Aby jednak doprowadzić do syntezy jądrowej potrzebne są temperatury dziesięciokrotnie wyższe.

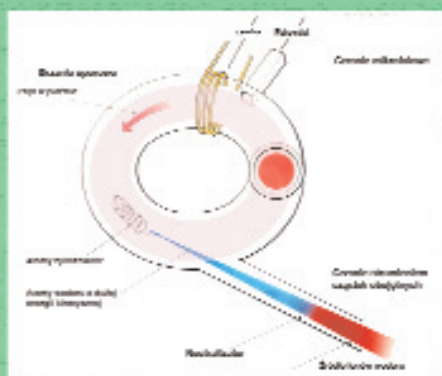
Grzanie oporowe



TEXTOR tokamak
FZJ / Julich Niemcy

Prąd elektryczny płynący przez plazmę podgrzewa ją. Wzrost temperatury plazmy zmniejsza jednak jej opór elektryczny ograniczając efekt grzania oporowego.

W ten sposób można podgrzać plazmę do temperatury 10-20 mln °C, co jednak nie wystarcza do osiągnięcia zapłonu plazmy. Potrzebne są więc dodatkowe systemy grzewcze.



Grzanie oporowe umożliwia osiągnięcie temperatury plazmy rzędu kilkudziesięciu mln °C.

Dodatkowe systemy grzania

Przy ogrzewaniu plazmy strumieniem wysokoenergetycznych cząstek obojętnych, są one wytwarzane w źródle jonów i przyspieszane dużą różnicą potencjałów (rzędu 100 kV i więcej), a następnie neutralizowane podczas przejścia przez cylinder wypełniony gazem (neutralizator). Pole magnetyczne reaktora nie oddziałuje na strumień cząstek obojętnych, co umożliwia wstrzelenie ich do komory plazmowej, gdzie zderzając się z cząstkami plazmy przekazują im swoją energię.

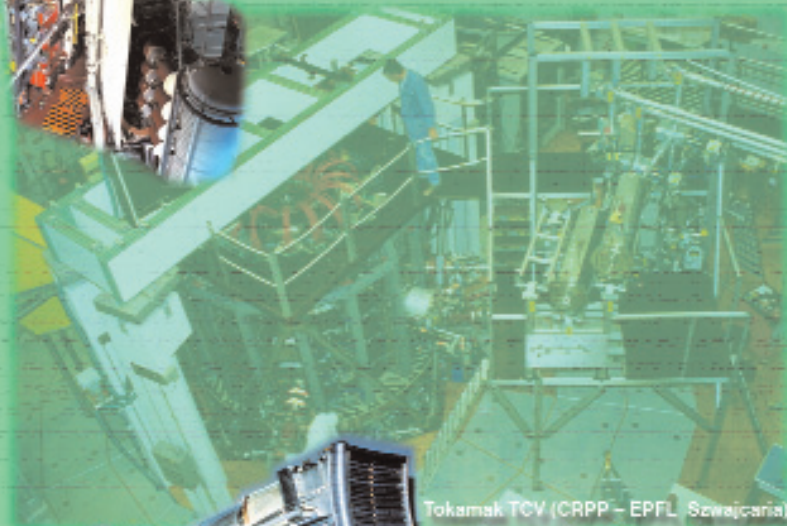
W ogrzewaniu wysokoczęstotliwościowym stosuje się mikrofałe, bądź fale radiowe dużej mocy o częstotliwościach zbliżonych do drgań własnych cząstek plazmy w polu magnetycznym (rezonans). Umożliwia to przekazywanie energii plazmie i ogrzewanie jej.

Stosuje się tu systemy rezonansowego grzania cyklotronowego jonów (klistrony - 20 MHz-10 GHz), bądź rezonansowego grzania cyklotronowego elektronów (girotrony – 50-200 GHz).

Dodatkowe systemy grzania

Grzanie strumieniem cząstek neutralnych

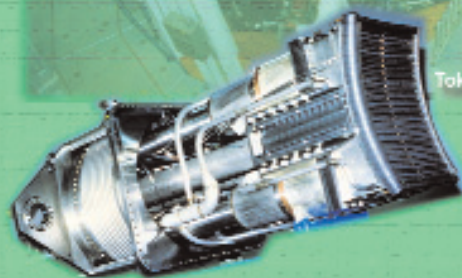
JET Culham Anglia
NEI System



Tokamak TCV (CRPP - EPFL, Szwajcaria)

Grzanie falami o częstotliwości radiowej (R-F)

Antena 50-60 Mhz (1 MW)
Tore Supra (EURATOM-
CEA / Cadarache)



Dodatkowe systemy grzania pozwalają osiągnąć temperatury niezbędne do zainicjowania syntezy jądrowej

Magnetycznie utrzymywana synteza jądrowa.
Podwyższanie parametrów plazmy tokamaka.

Tworzące się w trakcie reakcji syntezy cząstki α ogrzewają plazmę. Wspomagające systemy grzania potrzebne są do sterowania przebiegiem tej reakcji.

Powstałe w wyniku reakcji syntezy wysokoenergetyczne jądra atomów helu – cząstki α - zderzając się z innymi cząstkami plazmy ogrzewają ją. Gdy reakcja ta osiągnie stan samopodtrzymywania się, to znaczy, gdy wszystkie straty energetyczne plazmy zostaną skompensowane przez ogrzewanie cząstkami α , będzie można powiedzieć, że osiągnięto stan zapłonu plazmy. Paliwo plazmowe będzie mogło wtedy ogrzewać się w zasadzie samoistnie bez potrzeby stosowania dodatkowych źródeł energii.

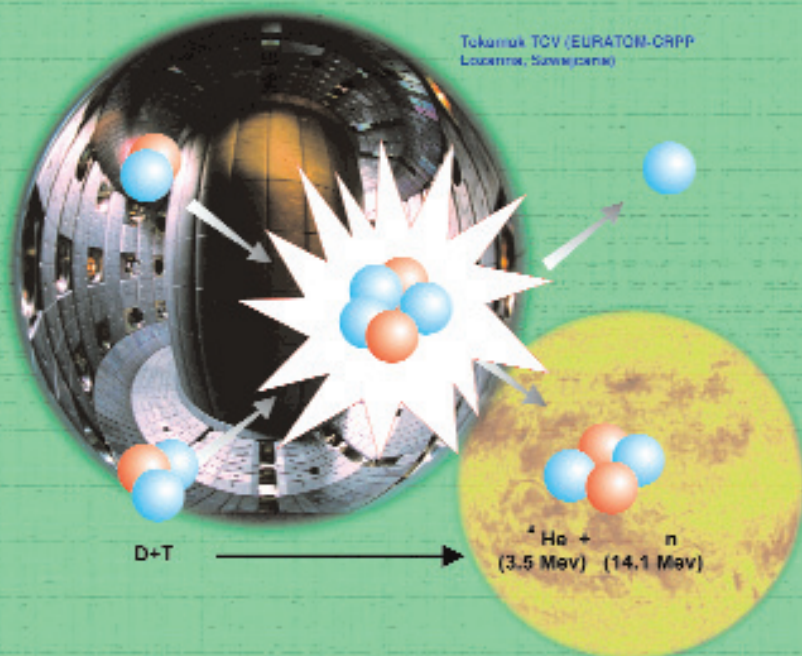
Plazma może być też utrzymywana w stanie nieco poniżej punktu zapłonu. Umożliwi to precyzyjne sterowanie przebiegiem syntezy poprzez użycie grzania zewnętrznego.

36

Dla zapewnienia kontroli przebiegu reakcji syntezy potrzebna jest zawsze pewna część energii z dodatkowych źródeł grzania. W reaktorach, w których przez plazmę płynie prąd elektryczny (n.p. tokamaki), zewnętrzne systemy grzania potrzebne są do podtrzymywania temperatury plazmy zarówno w warunkach długich pulsów jak i pracy ciągłej.

Samonagrzewanie się plazmy

- Wytworzone podczas reakcji syntezy cząstki α unoszące 20 % uwolnionej energii używane są do ogrzewania plazmy.
- Opuszczające obszar reakcji neutrony prędkie przekazują 80 % jej energii ścianom komory plazmowej, gdzie jest ona odbierana i przekazywana dalej w celu wytwarzania prądu elektrycznego.



Głównym sposobem ogrzewania plazmy w przyszłych reaktorach będzie ogrzewanie jej cząstkami α .

Magnetycznie utrzymywana synteza jądrowa.
Podwyższanie parametrów plazmy tokamaka.

Systemy pomocnicze

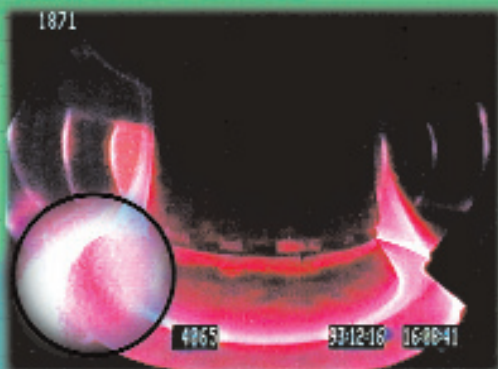
Neutrony prędkie uwalniane podczas syntezy nie oddziałują z plazmą. Opuszczają one obszar reakcji i są spowalniane w wykładzinie ściany reaktora nagrzewając ją. W elektrowni plazmowej ciepło to używane jest do wytwarzania pary wodnej napędzającej turbiny i generatory prądu elektrycznego.

Lit zawarty w wykładzinie ściany reaktora oddziałując z neutronami przekształca się w tryt. Gaz ten jest odzyskiwany, oczyszczany i wraz z deuterem wprowadzany ponownie do reaktora jako paliwo plazmowe.

Inne systemy pomocnicze to:

- systemy dostarczania paliwa (w postaci gazu, zamrożonych pastylek i strumienia cząstek obojętnych),
- systemy przeciwdziałające ucieczce energii i cząstek plazmy,
- systemu wyłapywania „popiołu plazmowego” – helu oraz zanieczyszczeń z wnętrza reaktora,
- systemy diagnostyczne i sterujące reaktora.

Systemy pomocnicze

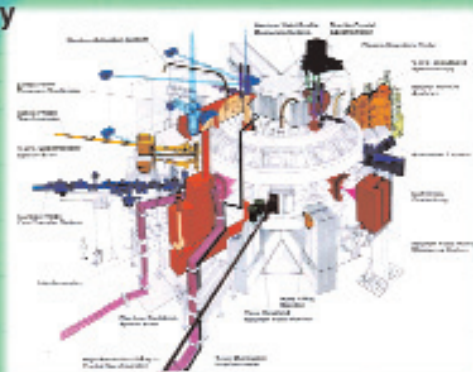


Tokamak Asdex Upgrade
(Instytut Fizyki Plazmy / Garching, Niemcy)

Separowanie odpadu
reakcji syntezy (helu)
i zanieczyszczeń plazmy



Systemy diagnostyczne



Aby reaktor termojądrowy mógł
działać potrzebne są również
systemy pomocnicze

Magnetycznie utrzymywana synteza jądrowa.
Podwyższanie parametrów plazmy tokamaka.

Konsekwentne dążenie do celu

Do oceny postępu w dziedzinie syntezy jądrowej używa się zwykle współczynnika Q (współczynnik wzmocnienia energii), określającego stosunek energii uzyskanej z syntezy do energii zużytej na podgrzanie plazmy.

Jak dotąd najwyższe parametry syntezy osiągnęły tokamaki. Wartość $Q \sim 1$ (tak zwany breakeven) została osiągnięta w europejskim tokamaku JET (Joint European Torus), jedynym urządzeniu na świecie mogącym pracować na paliwie deuterowo-trytowym (paliwo przyszłych elektrowni plazmowych). Ekstrapolując parametry plazmy uzyskane w największym japońskim tokamaku JT-60, pracującym jedynie z plazmą deuterową, osiągnięto wynik $Q=1,25$.

Oznacza to 10 000 krotny wzrost parametrów plazmy od czasu uzyskania pierwszej gorącej plazmy w rosyjskim tokamaku T3 w roku 1968.

Synteza jądrowa w Europie

- 45 lat postępu

„Badanie syntezy jądrowej ze szczególnym uwzględnieniem zachowania się zjonizowanej plazmy pod wpływem sił elektromagnetycznych” było częścią programu inicjującego współpracę europejską w ramach Euratom w roku 1958.

Prace nad syntezą jądrową we Wspólnocie Europejskiej koncentrowały się na metodzie magnetycznego utrzymywania plazmy realizowanej w tokamakach i układach o podobnej konfiguracji. 30 maja 1978 roku Europejska Rada Ministrów zdecydowała o budowie dużego reaktora JET (Joint European Torus). Głównym celem budowy JET-a były „badania plazmy w warunkach i rozmiarze koniecznym dla reaktora termojądrowego”. JET osiągnął, a niekiedy i przekroczył wszystkie wytyczone mu cele.

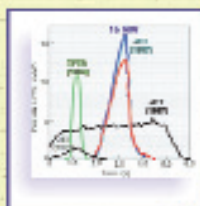
42 Celem założonej w 1999 roku organizacji EFDA (European Fusion Development Agreement) jest dalsze zintensyfikowanie europejskiej współpracy w dziedzinie syntezy jądrowej. Organizacja ta koordynuje badania europejskich ośrodków badawczych syntezy jądrowej i ich współpracę z przemysłem, wspólną eksploatację JET-a oraz udział Europy we współpracy międzynarodowej (np. ITER)

Synteza jądrowa w Europie - 45 lat postępu

2001 Ukończenie prac projektowych reaktora ITER

1999 Utworzenie „European Fusion Development Agreement” (EFDA)

1997 JET uzyskuje 16 MW mocy z syntezy jądrowej



1988 Decyzja Rady Ministrów „dla zainicjowania ... szczegółowego projektu Następnego Europejskiego Torusa poprzez pełną eksploatację JET-a i innych tokamaków a także badań nad reaktorami zwierciadlanymi oraz stellaratorami”

1978 Uchwała Rady Ministrów „badania plazmy w warunkach i rozmiarze koniecznym dla reaktora termojądrowego (JET)

1958 Porozumienie Euratom „badanie syntezy jądrowej ze szczególnym uwzględnieniem zachowania się plazmy pod wpływem sił elektromagnetycznych”



Prace nad syntezą jądrową we Wspólnocie Europejskiej koncentrowały się na metodzie magnetycznego utrzymywania plazmy - na tokamakach i układach o podobnej konfiguracji

Europejska strategia w dziedzinie badań i rozwoju syntezy jądrowej ukierunkowana jest na zbudowanie komercyjnej elektrowni plazmowej

Celem badań i rozwoju w dziedzinie syntezy jądrowej krajów członkowskich Wspólnoty Europejskiej, oraz Szwajcarii i krajów współpracujących w ramach programu Euratom jest wspólna realizacja bezpiecznych dla ludności i środowiska naturalnego oraz opłacalnych ekonomicznie prototypowych reaktorów dla elektrowni plazmowych.

Strategia osiągnięcia tego celu przewiduje skonstruowanie i budowę eksperymentalnego reaktora (ITER), a następnie prototypowej elektrowni plazmowej (DEMO). Działaniom tym mają towarzyszyć prace badawcze i rozwojowe w dziedzinie fizyki i technologii, w które ma być również zaangażowany europejski przemysł.

W szeroko zakrojonych badaniach analizuje się również socjologiczno ekonomiczne aspekty wykorzystania syntezy jądrowej do „czystego” i bezpiecznego wytwarzania energii elektrycznej.

Strategia europejska

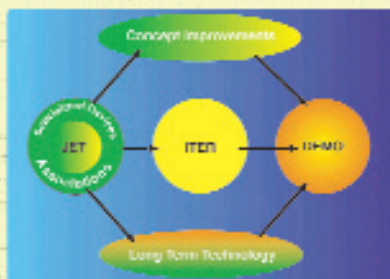
Wspólny cel

Wspólna realizacja prototypu elektrowni plazmowej spełniającej wymagania społeczne:

- bezpieczeństwa dla ludności,
- bezpieczeństwa dla środowiska naturalnego,
- opłacalności ekonomicznej.

Wspólny program

Program ten realizują państwa Wspólnoty Europejskiej i Szwajcaria wraz z innymi państwami współdziałającymi w ramach Europejskiego Programu Euratom



Wspólna strategia

ITER: reaktor eksperymentalny

DEMO: prototyp elektrowni plazmowej

Trzy główne kierunki działania

Prace dla ITER
Laboratoria syntezy jądrowej + przemysł

Udoskonalanie koncepcji
Laboratoria syntezy jądrowej + uniwersytety

Rozwój technologii
Laboratoria syntezy jądrowej + laboratoria technologiczne

Europejska strategia w dziedzinie syntezy jądrowej ukierunkowana jest na zbudowanie komercyjnej elektrowni plazmowej

ITER - droga do energii uzyskiwanej z syntezy jądrowej

ITER jest kamieniem milowym na drodze do produkcji energii elektrycznej z wykorzystaniem syntezy jądrowej.

Projekt ITER powstał we współpracy międzynarodowej. Wspólnota Europejska, Japonia, Federacja Rosyjska, Chiny, Stany Zjednoczone Ameryki i Korea Południowa uczestniczą w negocjacjach mających na celu wybór miejsca budowy reaktora i utworzenie organizacji do zrealizowania tego przedsięwzięcia.

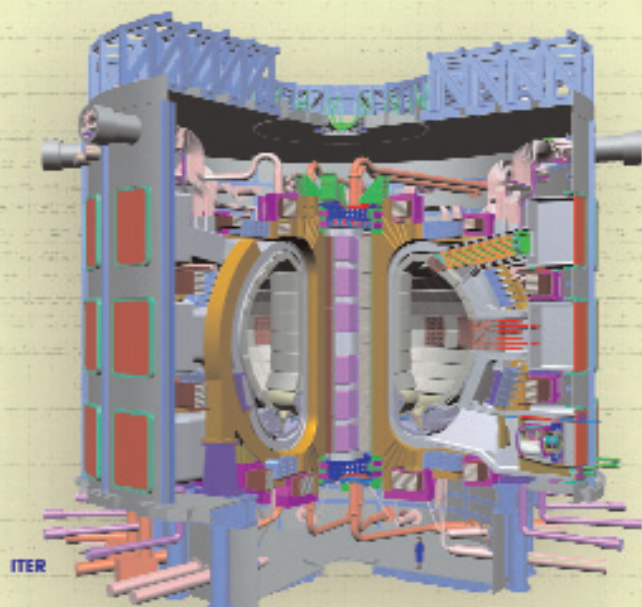
ITER ma zademonstrować naukową i techniczną możliwość zrealizowania samopodtrzymującej się syntezy jądrowej.

ITER ma wytwarzać 500 MW energii pochodzącej z syntezy jądrowej w 15-30-minutowych pulsach, które będą wydłużane w celu uzyskania pracy ciągłej.

ITER bazuje na naukowych osiągnięciach uzyskanych przy pomocy różnych urządzeń rozsianych po całym świecie ze szczególnym uwzględnieniem reaktora JET. Obecnie rozpatruje się dwie kandydatury lokalizacji ITER. Jedną z nich jest Wspólnota Europejska (Francja), a drugą Japonia (Rokkasho-mura). Obydwie propozycje zostały ocenione jako technicznie odpowiednie dla budowy reaktora. Ostateczny wybór lokalizacji i podjęcie decyzji budowy ma nastąpić w 2004 roku.

ITER, droga do energii uzyskiwanej z syntezy jądrowej

- ITER jest kamieniem milowym na drodze do produkcji energii elektrycznej z wykorzystaniem syntezy jądrowej.
- Projekt ITER powstał we współpracy międzynarodowej. Wspólnota Europejska, Japonia, Federacja Rosyjska, Chiny, Stany Zjednoczone Ameryki i Korea Południowa uczestniczą w negocjacjach mających na celu wybór miejsca budowy reaktora i utworzenie organizacji do zrealizowania tego przedsięwzięcia.
- Budowa ITER będzie trwała 8 – 10 lat a jego eksploatacja około 20 lat.



**Przewidywana budowa reaktora
będzie prowadzona również w
ramach projektu ITER**

Doskonalenie koncepcji oraz programy towarzyszące

Poprzez opracowywanie i analizę rozwiązań alternatywnych dąży się do dalszego doskonalenia koncepcji tokamaka i zdefiniowania założeń przyszłego reaktora DEMO.

Będące już w użyciu urządzenia plazmowe umożliwiają prowadzenie prac w dziedzinie podstaw fizyki reakcji syntezy i rozwoju urządzeń diagnostycznych, a także pozwalają doskonalic metody współpracy naukowej przy dużych eksperymentach i szkolic młode kadry naukowe.

Prace te prowadzone są w laboratoriach wyposażonych w wyspecjalizowane tokamaki takich jak np. JET, a także w ramach programów towarzyszących krajów członkowskich.

48

Równolegle do prac nad rozwojem tokamaka oraz badań innych koncepcji - tokamaka sferycznego czy reaktora zwierciadlanego - kontynuuje się także studia nad stellaratorami, które posiadają naturalną właściwość pracy ciągłej. Nowy duży stellarator Wendelstein 7-X jest właśnie budowany.

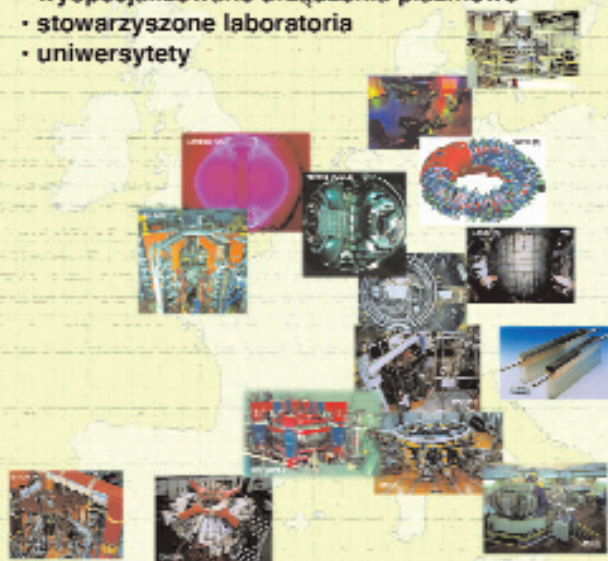
Doskonalenie koncepcji reaktora

Cele:

- zrozumienie podstaw fizyki syntezy jądrowej
- rozwój diagnostyki
- opracowanie metod współpracy przy dużych eksperymentach
- szkolenie młodych kadr naukowych

Uczestnicy:

- JET
- wyspecjalizowane urządzenia plazmowe
- stowarzyszone laboratoria
- uniwersytety



Celem prac nad rozwojem technologii jest przygotowanie projektu reaktora DEMO i prototypu elektrowni plazmowej

Aktualnie studiuje się kilka koncepcji elementu ściany reaktora (blanket), który ma wytwarzać tryt w ilościach wystarczających do kontynuowania syntezy. Badania europejskie koncentrują się na dwóch chłodzonych helem urządzeniach. W jednym z nich stosuje się stop litowo-ołowiowy, a w drugim granulát ceramiczny zawierający lit.

Aby wykorzystać w pełni potencjał tkwiący w syntezie jądrowej konieczne jest opracowanie niskoaktywujących się materiałów konstrukcyjnych. Wysiłki europejskie skupiają się tu na specjalnych stalach ferrytycznych i martensytycznych, a w dalszej perspektywie na kompozytach z węgla krzemu.

Materiały te będą testowane w urządzeniu IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility), które ma być zbudowane równolegle do projektu ITER.

Prace badawcze prowadzi się również w aspekcie bezpieczeństwa i ochrony środowiska. Koncentrują się one na poprawie koncepcji tokamaka i minimalizacji ilości aktywujących się materiałów.

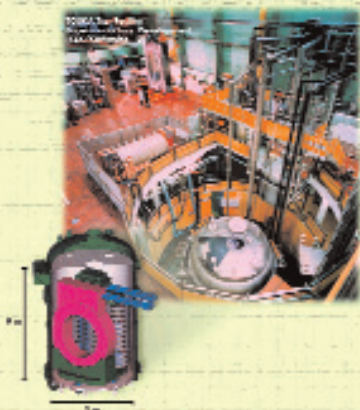
Badania socjologiczno ekonomiczne natomiast analizują opłacalność i potencjał rozwojowy elektrowni plazmowych.

Rozwój technologii

Technologia trytu



Materiały konstrukcyjne



Studium
elementu
ściany reaktora
(blanket)
wytwarzającego
tryt



Celem prac nad rozwojem technologii jest przygotowanie do budowy reaktora DEMO, a następnie elektrowni plazmowej

Badania i rozwój syntezy jądrowej w Europie są w pełni zintegrowaną akcją Ramowego Programu Badawczego Komisji Europejskiej

Prace badawcze i rozwojowe w dziedzinie syntezy jądrowej w Europie prowadzi się w ramach:

- porozumienia organizacji naukowych krajów członkowskich i krajów współpracujących,
- kontraktów o ograniczonym czasie trwania,
- europejskiego porozumienia ds. rozwoju w dziedzinie syntezy jądrowej (EFDA) wspierającego:
 - rozwój tej technologii we współpracy z instytutami i przemysłem europejskim,
 - wspólną eksploatację JET-a,
 - udział Europy w międzynarodowych projektach takich jak ITER,
- porozumienia d.s. wspierania wymiany naukowców i działalności stypendialnej EURATOM.

Roczny budżet 5-go Ramowego Programu Badawczego (FP5) wynosił około 450 mln €, z czego około 200 mln € zostało sfinansowane przez Wspólnotę Europejską. Badania w dziedzinie energii syntezy jądrowej są priorytetowym tematem 6-go Ramowego Programu Badawczego. Budżet na lata 2002-2006 przeznaczony w tym programie na cele syntezy jądrowej wynosi 750 mln € (w czym 200 mln € wyłącznie dla ITER)

Badania i rozwój syntezy jądrowej w Europie

Kadra naukowa i techniczna

2000 fizyków i inżynierów z europejskich instytutów i zakładów przemysłowych

Budżet

750 mln € w ramach 6-go Programu Badań (2002-2006)

Kraje biorące udział w Europejskim Programie Syntezy Jądrowej

- Państwa członkowskie
- Kraje związowane Ramowego Programu Eurotor
- Instytuty i zakłady przemysłowe jądrowe



Badania i rozwój syntezy jądrowej w Europie są w pełni zintegrowane i koordynowane przez Komisję Europejską

W dziedzinie magnetycznie utrzymywanej syntezy jądrowej Europa zajmuje czołową pozycję na świecie

W roku 1997 w największym i najsprawniejszym na świecie tokamaku JET uzyskano 16 MW mocy z syntezy jądrowej.

JET jest jedynym jak dotąd urządzeniem na świecie zdolnym do pracy na mieszance deuter + tryt, tzn. na paliwie przyszłych elektrowni plazmowych.

Podstawą tego sukcesu była praca około 2000 fizyków i inżynierów z europejskich instytutów naukowych i zakładów przemysłowych.

Współdziałanie europejskich instytutów zajmujących się syntezą jądrową umożliwiło postęp, który nie byłby możliwy do osiągnięcia w pojedynczych krajach członkowskich.

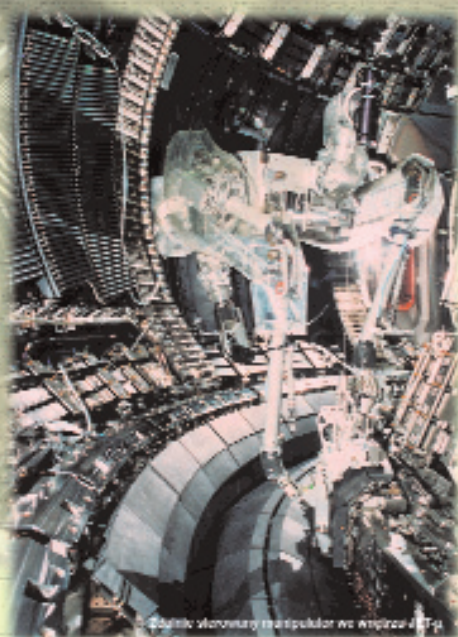
Wszystkie te osiągnięcia pozwoliły na utworzenie solidnych podstaw dla projektu ITER.

Europa przoduje w badaniach i rozwoju magnetycznie utrzymywanej syntezy jądrowej

TEXTOR (D-NL-8)

JET – europejski tokamak osiągnął najlepsze wyniki na świecie

- 16 MW mocy plazmowej uzyskano w 1997
- jedyne na świecie urządzenie zdolne do pracy na paliwie D-T



© British International Tokamak Fusion Programme (JET)

Budowa pierwszego eksperymentalnego reaktora syntezy jądrowej

- jest możliwa z naukowego i technicznego punktu widzenia
- może być zakończona w ciągu 10-ciu lat

Osiągnięty postęp nie byłby możliwy bez szerokiej współpracy w Europie

Złożona problematyka badań i rozwoju syntezy jądrowej doprowadziła do szerokiej współpracy nie tylko pomiędzy instytutami europejskimi, lecz także z laboratoriami z całego świata

Wszystkie europejskie instytuty syntezy jądrowej współpracują ze sobą i są partnerami w EFDA przy projektach JET i ITER.

W całej Europie istnieje ścisła naukowa i techniczna współpraca dużych i małych instytutów pracujących dla osiągnięcia wspólnego celu. Na płaszczyźnie międzynarodowej najważniejszym projektem jest ITER pod auspicjami Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA) w Wiedniu. Głównym celem ITER jest zademonstrowanie naukowej i technicznej możliwości wykorzystania energii syntezy jądrowej do celów pokojowych.

56

Porozumienia zawarte w ramach działalności Międzynarodowej Agencji Energii (IEA) w Paryżu wspierają natomiast współpracę przy rozwiązywaniu specyficznych problemów naukowych.

Dwustronne i wielostronne umowy pomiędzy europejskimi i pozaeuropejskimi instytutami uzupełniają obraz tej współpracy.

Współpraca jest koniecznością

Na forum europejskim

- współpraca wszystkich Instytutów zajmujących się syntezą jądrową i ich udział w pracach EFDA przy projektach JET i ITER

Na forum międzynarodowym

- prace przy projekcie ITER pod auspicjami Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA) w Wiedniu
- specjalistyczne umowy w ramach prac Międzynarodowej Agencji Energii (IEA) w Paryżu
- dwustronne i wielostronne umowy z instytutami pozaeuropejskimi



Złożona problematyka badań i rozwoju syntezy jądrowej doprowadziła do szerokiej współpracy w tej dziedzinie

Badania i rozwój w dziedzinie syntezy jądrowej doprowadziły do powstania rozwiązań technicznych, które znalazły zastosowanie także i w innych wysoko zaawansowanych gałęziach techniki

Przemysł współdziałający w budowie urządzeń i rozwoju technologii dla syntezy jądrowej wykorzystuje te rozwiązania do rozwoju własnych produktów w takich dziedzinach jak technika plazmowa, wyładowania w gazach, plazmowa obróbka powierzchni, technika oświetleniowa, ekrany plazmowe, technika próżniowa, elektronika dużych mocy, metalurgia czy energia odnawialna.

Przykłady:

- Opracowane dla JET-a konwertory dużych mocy stosowane są obecnie w większości nowoczesnych lokomotyw elektrycznych.
- Najkrótsza na świecie linia walcarek stali (180 m) pracuje w Kremonie we Włoszech. Jej energooszczędny i bezpieczny dla środowiska naturalnego proces technologiczny ISP (Inline Strip Production) został opracowany przy użyciu modelu komputerowego opracowanego do badań wpływu silnych pól magnetycznych tokamaka na materiały konstrukcyjne.
- Nowy anemometr umożliwiający pracę elektrowni wiatrowych w ekstremalnych warunkach, w którym wykorzystano laser CO₂, został opracowany przez fizyków w Risø (Dania) do mierzenia parametrów plazmy.
- Wykonane przy użyciu technologii AMC (Active Metal Casting) odporne na wysokie temperatury metale używane w reaktorach, stosowane są również do budowy statków kosmicznych.

Transfer technologii związanej z syntezą jądrową

Zróżnicowane wysokorozwinięte technologie:

Technologia nadprzewodników, plazmowa obróbka powierzchni, technika oświetleniowa, ekrany plazmowe, technika próżniowa i kriogeniczna, robotyka, elektronika dużych mocy, mechanika precyzyjna, metalurgia i inżynieria materiałowa.

Synteza jądrowa przyczyniła się do postępu w przemyśle



**Multidyscyplinarna natura badań
i rozwoju syntezy jądrowej przyczyniła
się do szybkiego rozwoju innych
wysoko zaawansowanych technologii**

EFDA - European Fusion Development Agreement

EFDA European Fusion Development Agreement
Boltzmannstrasse 2
D-85748 Garching bei München - Germany

European Fusion Associations

ASSOCIATION EURATOM/ÖAW

Österreichische Akademie der
Wissenschaften
Technische Universitaet Wien Institut fuer
Allgemeine Physik
Wiedner Hauptstrasse 8-12/134
A-1040 WIEN-Austria

ASSOCIATION EURATOM/Etat Belge (ERM/KMS)

Ecole Royale Militaire/Koninklijke Militaire
School -
Laboratoire de Physique des
Plasmas/Laboratorium voor Plasmafysica
Association "Euratom-Etat belge"/Associatie
"Euratom-Belgische Staat"
avenue de la Renaissance 30
B-1040 Brussels - Belgium

ASSOCIATION EURATOM/Etat Belge (ULB)

Physique Statistique, Plasmas et Optique
Université Libre de Bruxelles
Campus de la Plaine 231
Boulevard du Triomphe
B-1050 Bruxelles - Belgium

ASSOCIATION EURATOM/Etat Belge

(SCK.CEN) SCK.CEN
Boeretang 200
B-2400 Mol - Belgium

ASSOCIATION EURATOM/RISØ

Risø National Laboratory
Fusion Research Unit
OFD – 128 .O. Box 49
K-4000 Roskilde - Denmark

ASSOCIATION EURATOM/TEKES

Technology Development Centre Finland
(TEKES)
P.O. Box 69
FIN-00101 Helsinki - Finland

VTT Energy/Nuclear Energy

Tekniikantie, 4 C, Espoo
P.O. Box 1604
FIN-02044 VTT - Finland

ASSOCIATION EURATOM/CEA

Département de Recherches sur la Fusion
Contrôlée Centre d'Etudes de Cadarache
Boîte Postale 1
F-13108 Saint-Paul-lez-Durance - France

ASSOCIATION EURATOM/IPP

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
Boltzmannstrasse 2
D-85748 Garching bei München - Germany

ASSOCIATION EURATOM/FZJ

"Institut für Plasmaphysik" and "Projekt Kernfusion"
Partner in the Trilateral Euregio Cluster (TEC)
Forschungszentrum Jülich (FZJ)
D-52425 Jülich - Germany

ASSOCIATION EURATOM/FZK

Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) GmbH
Nuclear Fusion Project
P.O. Box 3640
D-76021 Karlsruhe - Germany

ASSOCIATION EURATOM/GREECE

National Centre for Scientific Research
"Demokritos"
Institute of Nuclear Technology-Radiation
Protection
PO Box 60228 Aghia Paraskevi, Athens -
Greece

ASSOCIATION EURATOM/ENEA

Centro Ricerche Energia
ENEA
Via E. Fermi 27
I-00044 Frascati - Italy

ASSOCIATION EURATOM/ENEA

Istituto di Fisica del Plasma "Piero Caldirola"
Associazione Euratom/ENEA/CNR
Via R. Cozzi 53
I-20125 Milano - Italy

ASSOCIATION EURATOM/ENEA

Istituto Gas Ionizzati
Consiglio Nazionale della Ricerche
Corso Stati Uniti 4
I-35020-CAMIN PADOVA - Italy

ASSOCIATION EURATOM/DCU
Dublin City University School of Physical
Sciences

Glasnevin EI-DUBLIN 9 - Ireland
ASSOCIATION EURATOM/FOM
FOM-Instituut voor Plasmafysica "Rijnhuizen"
Edisonbaan 14
NL-3439 MN Nieuwegein - Netherlands

ASSOCIATION EURATOM/FOM
Netherlands Energy Research Foundation NRG
Business Unit ECN-Nuclear Energy
P.O. Box 1
NL-1755 ZG PETTEN - Netherlands

ASSOCIATION EURATOM/IST
Centro de Fusao Nuclear
Instituto Superior Tecnico
P-1096 LISBOA Codex - Portugal

ASSOCIATION EURATOM-CIEMAT
CIEMAT (Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales y
Tecnológicas)
avenida Complutense 22
E-28040 Madrid - Spain

ASSOCIATION EURATOM - Confédération Suisse
Centre de Recherches en Physique des Plasmas
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
Bâtiment PPB
CH - 1015 Lausanne
Switzerland

ASSOCIATION EURATOM/VR
Royal Institute of Technology
Plasma Physics and Fusion Research
Technical Ring 31
S-10044 Stockholm 70 - Sweden


ASSOCIATION EURATOM/UKAEA
UKAEA Fusion
Culham, Abingdon
Oxon OX14 3DB - United Kingdom

ASSOCIATION EURATOM - IPP.CR
Institute of Plasma Physics Association
of Sciences of the Czech Republic
Za Slovankov, 3
P.O. Box 17
CZ- 182 21 Praha 8 - Czech Republic

ASSOCIATION EURATOM - HAS
Hungarian Academy of Sciences
Nádor u. 7
H-1051 HUNGARY

ASSOCIATION EURATOM - MEC
National Agency for Science Technology and
Innovation
21-25 Mendeleeev Str.
RO-70168, Sector 1 Bucharest - Romania

ASSOCIATION EURATOM/Univ.of Latvia
Institute of Solid State Physics
University of Latvia
8 Kengaraga Str.
LV-1063 Riga Latvia



**Instytut Fizyki Plazmy
i Laserowej Mikrosyntezy
w Warszawie:
prace podstawowe
i aplikacyjne**

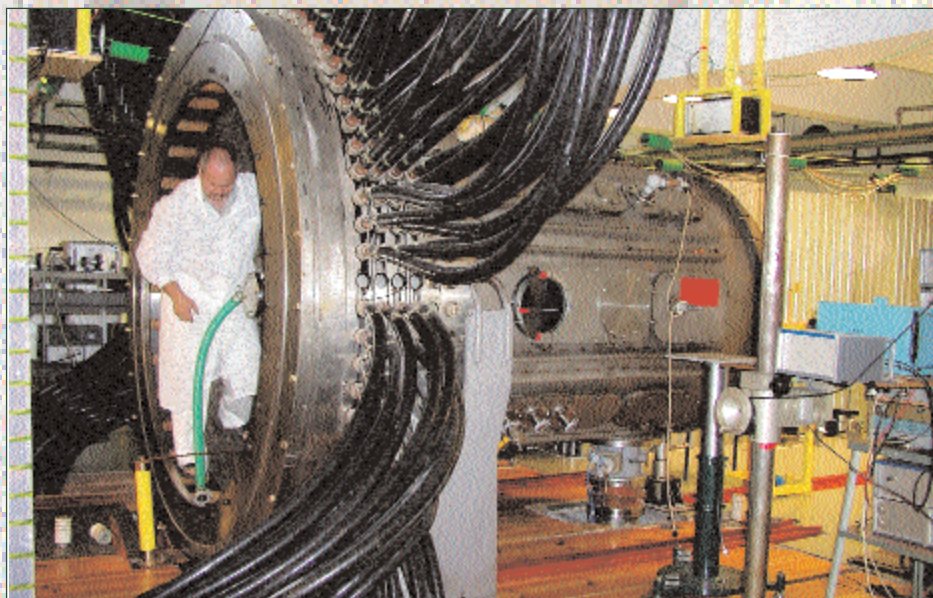
62

FUSION EXPO

Od przeszło trzydziestu lat Polsce trwają prace badawcze nad kontrolowaną syntezą termojądrową i fizyką gorącej plazmy. Dziedzinami tymi zajmuje się powstały w 1976 roku w Warszawie Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy.

Najważniejsze kierunki badawczo rozwojowe w IFPILM związane są z:

- gęstą namagnetyzowaną plazmą otrzymywaną, w urządzeniu „plasma-focus” - PF-1000.
- syntezą inercyjną czyli badaniem plazmy otrzymywanej za pomocą laserów
- zastosowaniem wyładowań wielkiej mocy do badania odporności systemów energetycznych i elektronicznych oraz urządzeń, w tym samolotów i śmigłowców

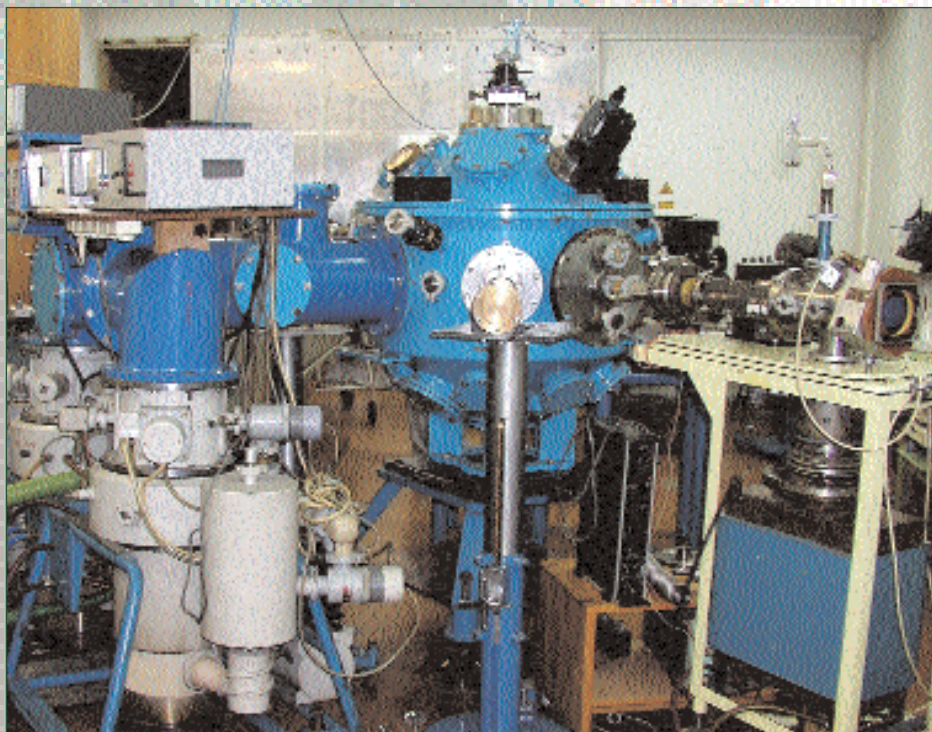


PF-1000 jest urządzeniem do wytwarzania plazmy o parametrach termojądrowych. Prowadzi się w nim międzynarodowe badania naukowe oraz szkolenia stypendystów w ramach programu UNESCO

Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie

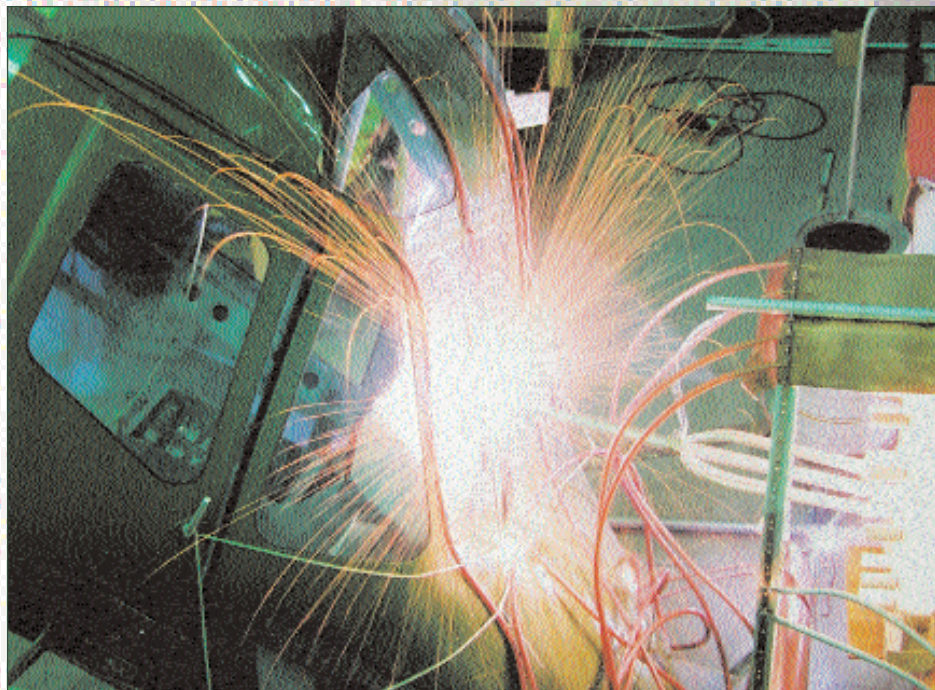
Lasery wielkiej mocy służą do grzania plazmy do temperatury takiej jak wewnątrz Słońca. Zachodzą wtedy reakcje syntezy termojądrowej, którym towarzyszy wydzielanie energii.

Prowadzone w Polsce, w IFPiLM, we współpracy z Międzynarodową Agencją Energii Atomowej w Wiedniu, badania dotyczą zagadnień syntezy laserowej.



Komora do badania plazmy wytwarzanej laserem

Wyładowanie wielkiej mocy:



Śmigłowiec na stanowisku badawczym

