

Czy fizyka jądrowa rozwiąże problemy energii dla przyszłych pokoleń?

Urszula Woźnicka

Dzień Otwarty

Instytutu Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk

26 września 2008

Streszczenie

Gdy przed ponad 100 laty człowiek nauczył się kontrolować i przesyłać energię z miejsca na miejsce w postaci elektryczności, było to odkrycie rewolucyjne. Dziś trudno sobie wyobrazić świat bez energii elektrycznej. Istnieje wiele sposobów generowania energii elektrycznej. Najpowszechniejszy polega na przemianie innych źródeł energii: ciepła lub energii potencjalnej w energię elektryczną.

Ogromnym, wydajnym źródłem energii jest Słońce. Energia Słońca i gwiazd powstaje w wyniku reakcji syntezy (fuzji) jądrowej – jądra atomów lekkich łączą się tworząc jądra cięższych atomów. We wnętrzu Słońca w temperaturze ponad 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. Przeprowadzona na Ziemi fuzja jądrowa będzie źródłem energii na skalę dużo mniejszą niż w Słońcu. Ale ta mniejsza skala oznacza, że temperatura niezbędna do tego, aby fuzja jądrowa była praktycznym źródłem energii, musi być dużo wyższa (powyżej 100 mln °C). Zrealizowanie tego procesu jest największym wyzwaniem, przed którym stoją naukowcy i inżynierowie z całego świata.

Reakcja syntezy jądrowej, którą najłatwiej przeprowadzić na Ziemi, to synteza dwóch izotopów wodoru – deuteru i trytu. Produktem tej reakcji jest cząstka alfa (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.

Światowe zapotrzebowanie na energię może wzrosnąć dwukrotnie w ciągu następnych 50 lat, głównie wskutek wzrostu zamożności społeczeństw krajów rozwijających się. Energia syntezy jądrowej może pomóc rozwiązać problemy zaspokojenia potrzeb energetycznych ludzkości na tysiąclecia. Paliwo do syntezy jądrowej (izotop wodoru – deuter) jest szeroko dostępne (np. w wodzie morskiej), a jego zapasy są praktycznie niewyczerpalne. Jest to rodzaj energii szczególnie przydatny do przetwarzania w 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. Rozpoczął się kolejny krok na drodze do realizacji tego celu. Naukowcy 20 krajów świata, pod auspicjami Unii Europejskiej rozpoczęli realizację programu eksperymentalnego pod nazwą ITER (**I**nternational **T**hermonuclear **E**xperimental **R**eactor). ITER jest projektem badawczym, którego celem jest zbadanie możliwości produkowania na wielką skalę energii z fuzji jądrowej. Synteza jądrowa odbywać się będzie w tokamaku, urządzeniu, którego budowę już rozpoczęto w Cadarache na południu Francji, wspólnymi siłami Unii Europejskiej, Japonii, Rosji, Chin, Indii, Korei Pd. i Stanów Zjednoczonych.

1. Wstęp. Historia energii.

W ciągu ostatnich czterdziestu lat ludność świata wzrosła z 3 do 6 miliardów, a do roku 2100 ma wzrosnąć do 8-12 miliardów, przy czym największy przyrost spodziewany jest w krajach 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.

Czym tak na prawdę jest „zapotrzebowanie na energię”, co to są „źródła energii”.

Pierwszym źródłem energii było i jest słońce. Na pewnym etapie rozwoju ludzie nauczyli się rozniecać ogień. To było ich pierwsze kontrolowane „źródło energii”. Umiejętność posługiwania się ogniem i jego rozniecania była najważniejszą wynalazką epoki prehistorycznej. Słońce i ognisko dostarczały ciepła. Z rysunków znalezionych w jaskiniach wiemy, że dla ludzi w epoce kamiennej (około 30 000 lat temu) „zapotrzebowanie na energię” wiązało się z przygotowaniem posiłków, ogrzewaniem, oświetleniem jaskiń i chat, ochroną przed dzikimi zwierzętami.

W ten sposób możemy prześledzić całą historię ludzkości. Ogień stosowano do wytopu żelaza i brązu. Energię słońca zamieniano na płody rolne. Około 5 000 lat przed naszą erą energia wiatru była wykorzystywana do napędu statków na Nilu, a kilka wieków przed narodzinami Chrystusa Chińczycy budowali wiatraki, które służyły im do pompowania wody. Z paliw kopalnych najdłuższą historię ma węgiel. Chińczycy używali węgla już około 3000 lat temu, natomiast Rzymianie używali węgla w Anglii około 100 – 200 r. n.e. Obecnie węgiel jest jednym z najważniejszych źródeł energii dla ludzkości.

Węgiel okazał się dość powszechnym surowcem. Pod koniec XVII wieku ludzie nauczyli się uszlachetniać węgiel (usuwać siarkę), dzięki czemu spalał się w wyższej temperaturze. To upowszechniło użycie węgla do wytopu metali. Kolejnym impulsem zwiększającym rolę węgla było wynalezienie silnika parowego przez Thomasa Newcomena w 1712 r., właśnie dla potrzeb górnictwa. Używano go do wypompowywania wód gruntowych z kopalń. James Watt ulepszył maszynę parową w 1765 r., dzięki czemu mogła ona służyć nie tylko do pompowania wody, ale także do napędu wielu innych maszyn.

Znaczenie wynalazku maszyny parowej polegało na tym, że po raz pierwszy energia cieplna uzyskana podczas spalania paliwa została zamieniona w ruch. Wcześniej, aby uzyskać energię ruchu trzeba było zbudować wiatrak lub turbinę wodną. Maszyna parowa pozwoliła na korzystanie ze źródła energii w dowolnym miejscu – powstało przenośne źródło energii. Jednym z najważniejszych praktycznych zastosowań maszyny parowej była lokomotywa. Pierwsze pociągi ruszyły na trasy na początku XIX wieku, dokonując prawdziwej rewolucji w transporcie lądowym.

W 1799 roku włoski fizyk i wynalazca Alessandro Volta (1745 – 1827) zbudował ogniwo galwaniczne - pierwsze źródło energii elektrycznej. W XIX wieku ludzie zaczęli eksperymentować z generatorami elektrycznymi napędzanymi przez turbiny wodne i wiatraki. W 1880 roku ruszyła pierwsza elektrownia z generatorem elektrycznym napędzanym przez maszynę parową. Jej twórcą był Thomas Edison, a elektrownia dostarczała prąd do oświetlenia ulicznego na Wall Street.

W 1859 roku w Pensylwanii w USA zaczęto wydobywać ropę naftową. Z czasem ludzie nauczyli się jak przerabiać ropę, aby otrzymać olej napędowy, który mógł być użyty jako paliwo dla nowego wynalazku: silnika spalinowego. W 1885 roku niemiecki inżynier Benz użył takiego silnika do zbudowania pierwszego samochodu.

Ciekawostką jest fakt, że pierwszymi samochodami były pojazdy elektryczne, wyparte jednak z rynku z początkiem 20 wieku przez pojazdy z silnikami spalinowymi. Główną przyczyną tego zjawiska były ograniczenia technologiczne ówczesnej techniki elektroenergetycznej, co powodowało, że pojazdy te nie rozwijały dużych szybkości (około 32 km/h). Dopiero w 1947 roku dokonał się punkt zwrotny w historii pojazdów elektrycznych za sprawą skonstruowania pierwszego tranzystora. Obecnie w Stanach Zjednoczonych występuje ciągły wzrost liczby pojazdów napędzanych z baterii od ok. 56 000 w roku 2004 do ok. 76 000 w 2006 roku.

W 1903 roku bracia Orville i Wilbur Wright, amerykańscy pionierzy lotnictwa, zastosowali silnik spalinowy w maszynie latającej – powstał pierwszy samolot. Mniej więcej w tym samym czasie we Włoszech ruszyła pierwsza elektrociepłownia geotermalna wykorzystująca gorące źródła do ogrzewania mieszkań.

W 1905 roku Albert Einstein opublikował teorię względności. Ludzkość odkryła nowe źródło energii zgromadzone w jądrach atomów, Austriacka fizyczka, Lise Meitner, wyjaśniła teoretycznie zjawisko rozbitcia jądra atomowego, którego dokonał Otto Hahn w 1938 roku. Lise Meitner po raz pierwszy użyła przy tej okazji terminu *rozszczenie jądra atomowego*. Od lat 50-tych XX wieku na całym świecie zaczęły powstawać elektrownie jądrowe, w których energia wyzwalana podczas reakcji rozszczepienia wykorzystywana jest do wytwarzania energii elektrycznej. Równoległe naukowcy na całym świecie zaczęli pracować nad opanowaniem reakcji syntezy jądrowej. Elektrownie wykorzystujące reakcję syntezy mogą rozwiązać problemy energii dla przyszłych pokoleń.

2. Produkcja energii elektrycznej. Elektrownia ciepła.

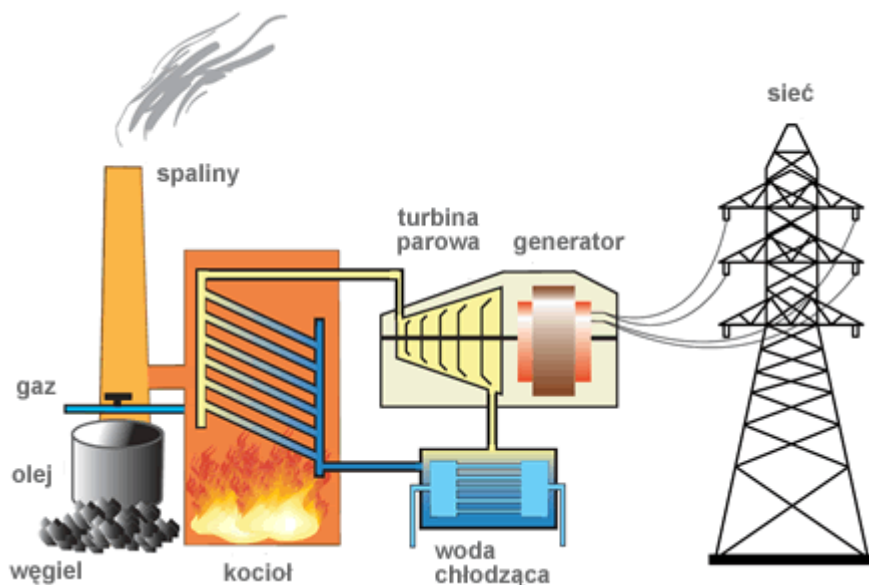
Niewątpliwie energia elektryczna jest najbardziej wszechstronnym źródłem energii. Wytwarzana jest w elektrowni przez przetwarzanie innych rodzajów energii. Rozróżniamy typy elektrowni ze względu na źródła energii pierwotnej. Mówimy o elektrowni ciepłej, wodnej, szczytowo-pompowej, słonecznej, wiatrowej, maretermicznej, geotermicznej.

Najpopularniejszym paliwem w elektrowniach ciepłych jest węgiel kamienny lub brunatny. Ale może to być również ciepło uzyskiwane z energii jądrowej uzyskiwane w procesie rozszczepienia lub syntezy jądrowej.

Abstrahując od tego, w jaki sposób uzyskujemy ciepło, elektrownia składa się z trzech głównych elementów: kotła, turbiny i generatora prądu elektrycznego. Kocioł jest stale zasilany wodą, paliwem i powietrzem. Produktem głównym kotła jest para wodna o określonych parametrach, produktami ubocznymi, które należy usunąć, są spaliny, popiół i żużel. Energia elektryczna wytwarzana w elektrowni przekazywana jest do systemu elektroenergetycznego, skąd pobierana jest przez odbiorców.

Jeżeli mówimy o energetyce jądrowej, to tak na prawdę myślimy o sposobie dostarczania ciepła do turbiny parowej. Tak zasilaną elektrownię ciepłą nazywamy elektrownią jądrową. Osiągnięcia nauki pozwalają dokonać kolejnego podziału: elektrownia jądrowa pracująca w oparciu o rozszczepienie ciężkich jąder i elektrownia jądrowa pracująca w oparciu o proces syntezy jąder lekkich.

Energia syntezy jądrowej może pomóc rozwiązać problemy energetyczne świata na tysiąclecia. Jest to rodzaj energii szczególnie przydatny do produkcji energii elektrycznej, czyli ogrzewania kotła elektrowni ciepłej. Paliwo do syntezy jądrowej jest szeroko dostępne. 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.



Schemat budowy elektrowni ciepłej.

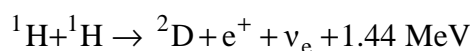
Źródło: FM.T. Westra, S. Kuyvenhoven - Energy powering your world (wikipedia).

3. Energia syntezy jądrowej – energia gwiazd

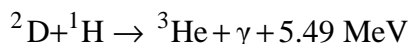
Reakcja syntezy jądrowej jest źródłem energii słońca i gwiazd – jądra atomów lekkich łączą się tworząc cięższe jądra. We wnętrzu słońca, w temperaturze kilkunastu milionów kelwinów, jądra wodoru łączą się tworząc hel. Proces ten jest źródłem energii, która wypromieniowana w postaci światła umożliwia 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 kelwinów, czyli około 10 razy wyższa niż temperatura słonecznego jądra.

W 1920 roku, Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944), wybitny astrofizyk brytyjski, jako pierwszy wysunął hipotezę, że reakcją odpowiedzialną za wytwarzanie ogromnej ilości energii w Słońcu jest reakcja termojądrowa, czyli kreowanie cięższych pierwiastków poprzez fuzję lżejszych. Osiemnaście lat później, w 1938 roku, Hans Albrecht Bethe (1906-2005), amerykański fizyk niemieckiego pochodzenia, wyjaśnił procesy wyzwiania energii w gwiazdach. W 1967 otrzymał on Nagrodę Nobla za wkład w teorię reakcji jądrowych, szczególnie za odkrycia dotyczące tzw. cyklu protonowego (cykl Bethego).

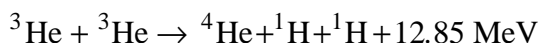
Cykl protonowy jest to sekwencja reakcji jądrowych, w których z czterech jąder wodoru powstaje stabilne jądro helu. Ponadto podczas przemian uwalniana jest energia jądrowa, która jest głównym źródłem energii Słońca i innych niezbyt masywnych gwiazd. Cykl pp zachodzi w jądrach gwiazd o temperaturze od kilku do kilkunastu milionów kelwinów. Cykl rozpoczyna fuzja dwóch protonów, która jest możliwa, gdy mają one dostatecznie wysoką energię, by pokonać barierę kulombowską. Zbliżenie protonów jest możliwe także dzięki znanemu z mechaniki kwantowej efektowi tunelowemu. W wyniku tej reakcji powstaje jądro deuteru ${}^2\text{D}$, pozyton i neutrino elektronowe:



Pozyton natychmiast anihiluje z elektronem i zostają wypromieniowane dwa kwanty promieniowania gamma. Następnie jądro deuteru ${}^2\text{D}$ łączy się z jądrem wodoru ${}^1\text{H}$ tworząc jądro helu ${}^3\text{He}$. Dodatkowo zostaje wypromieniowany kwant promieniowania gamma:



Cykl ppI kończy reakcja fuzji dwóch jąder helu ${}^3\text{He}$, w efekcie której powstaje jądro helu ${}^4\text{He}$ i dwa jądra wodoru ${}^1\text{H}$. Cykl ten zachodzi głównie w temperaturze od 10 do 14 MK.



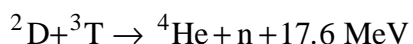
4. Fizyka plazmy podstawą badań syntezy jądrowej

Plazma to silnie zjonizowany gaz, w którym mogą występować neutralne cząsteczki, zjonizowane atomy oraz elektrony, jednak cała objętość zajmowana przez plazmę z "globalnego" punktu widzenia jest elektrycznie obojętna. Uważa się ją za czwarty stan skupienia materii. Plazma przewodzi prąd elektryczny, a jej opór elektryczny, inaczej niż w przypadku metali, maleje ze wzrostem jej temperatury.

Termin plazma wszedł do codziennego słownictwa. Palnik plazmowy (plazmotron) to urządzenie do obróbki materiału: obojętny gaz (argon, azot, itp.) zostaje ogrzany w palącym się łuku elektrycznym i tworzy strumień plazmy kierowany następnie z palnika do obrabianego materiału.

Ekran plazmowy działa na zasadzie doprowadzenia mieszaniny gazów (głównie ksenonu i neonu) do stanu plazmy. Zjonizowane gazy zaczynają emitować fotony światła ultrafioletowego, które padając na luminofor pobudzają go do emisji światła widzialnego odpowiedniego dla danego rodzaju luminoforu.

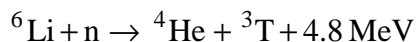
Gdy mówimy o wykorzystaniu zjawiska syntezy (fuzji) termojądrowej dla potrzeb energetyki, mamy na myśli plazmę wysokotemperaturową składającą się z gazów będących izotopami wodoru: deuteru i trytu. Synteza deuteru i trytu jest reakcją, którą najłatwiej jest przeprowadzić na Ziemi. Produktem tej reakcji jest hel (cząstka α) i neutron:



Jest to dobrze znana reakcja jądrowa wykorzystywana np. w generatorach neutronów. W urządzeniach tych rozpędzone deuterony uderzają w stałą tarczę z wdyfundowanym trytem, co powoduje emisję neutronów zgodnie z powyższą reakcją. Takie urządzenie znajduje się w IFJ PAN i służy jako źródło neutronowe do rozmaitych badań naukowych. Oczywiście nie ma tu mowy o plaźmie. Aby uzyskać wysokotemperaturową plazmę deuterowo-trytową musimy umieścić obydwie gazy w odpowiednim pojemniku i doprowadzić do stanu, aby ich jony uzyskały znaczną prędkość (czyli ogrzały się). A ponieważ temperatura, która jest konieczna do zainicjowania reakcji fuzji jest ekstremalnie wysoka, musimy stworzyć takie warunki, aby cząsteczki plazmy nie dotykały ścian naczynia. Stworzeniu takich warunków służą pola magnetyczne. Urządzenia – reaktory, w których generuje się plazmę wysokotemperaturową to tokamaki, stellaratory i urządzenia typu Z-pinch.

Jeden gram paliwa deuterowo-trytowego może dostarczyć 100 megawatogodzin energii elektrycznej. Aby uzyskać tę samą ilość energii należałoby spalić około 11 ton węgla. Deuter znajduje się w wodzie – 1 m³ wody zawiera około 30 g deuteru. Tryt występuje na ziemi tylko w niewielkich ilościach, lecz może być wytwarzany z litu – lekkiego metalicznego pierwiastka występującego w dużych ilościach w skorupie ziemskiej i wodzie morskiej. Tryt

może być wytwarzany w reakcji jądrowej litu i neutronów, które są uwalniane podczas reakcji D+T:



5. Tokamaki i stellaratory

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 temperatura powyżej 100 mln kelwinów, 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 plazmie, jak też opracowania i zastosowania wyrafinowanych technologii.

Aby zaszła reakcja syntezy w plazmie muszą zostać spełnione jednocześnie trzy warunki. Dotyczą one temperatury, gęstości oraz czasu utrzymania. Iloczyn tych wielkości nazywany jest iloczynem potrójnym. Jest to kryterium Lawsona, sformułowane w roku 1955 i nazwane od nazwiska angielskiego badacza, który je sformułował. Kryterium Lawsona definiuje warunek, po przekroczeniu którego energia pozyskiwana z syntezy przewyższa energię potrzebną do ogrzania i utrzymania plazmy.

Aby synteza zachodziła z wymaganą wydajnością, gęstość jonowa paliwa (mierzona w gramach na metr sześcienny) musi być ściśle określona. Moc otrzymywana w czasie syntezy ulega redukcji, gdyż paliwo ulega wypalaniu i zanieczyszczeniu przez inne atomy oraz poprzez nagromadzenie jonów helu. Paliwo, deuter i tryt, musi być uzupełniane, a hel stanowiący swoisty popiół należy usuwać. Czas utrzymania plazmy świadczy o utrzymywaniu w plazmie wystarczającej energii podtrzymującej proces syntezy. Czas utrzymania wzrasta gwałtownie wraz ze wzrostem objętości plazmy. Szczególnym przykładem jest Słońce, dla którego czas utrzymania energii jest olbrzymi.

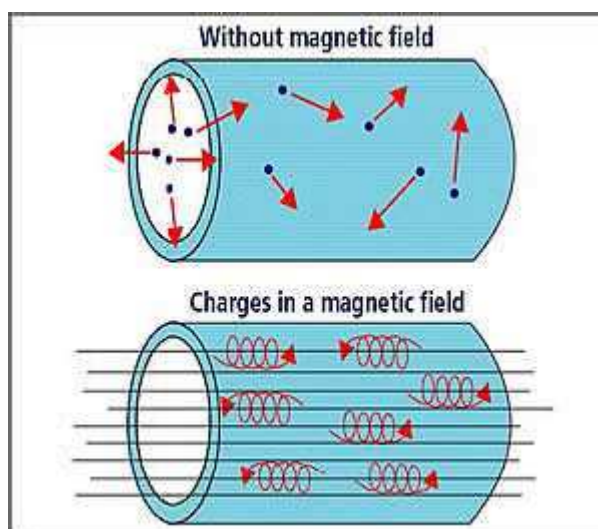
Kryterium Lawsona dla plazmy deuterowo-trytowej wymaga:

- temperatury plazmy: 100 - 200 milionów kelwinów,
- czasu utrzymania: 1 - 2 sekund,
- gęstości w osi: $(2 - 3) \times 10^{20}$ cząstek/m³ ($\sim 1/1000$ g/m³).

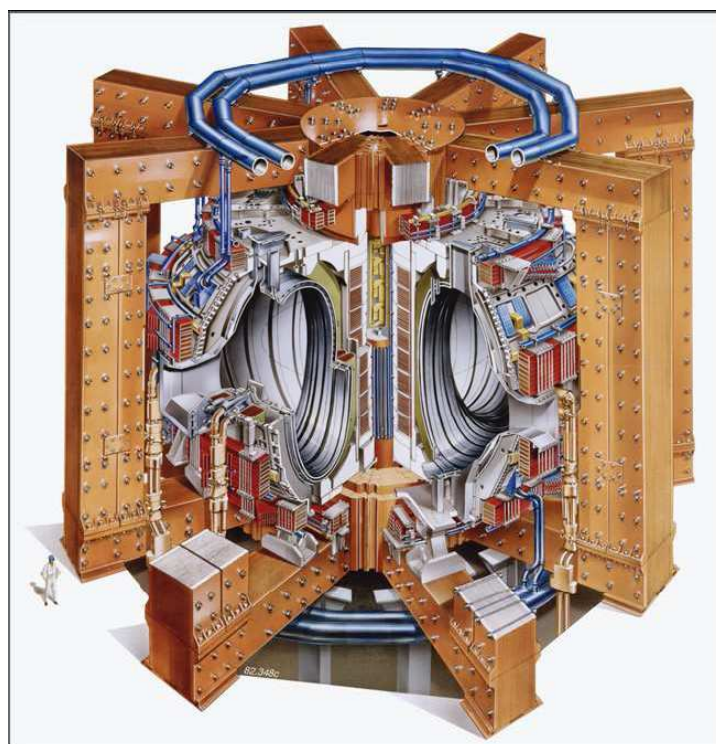
Elektrycznie naładowane cząstki plazmy – jony i elektrony – mają właściwość poruszania się po spiralnych torach wokół linii sił pola magnetycznego. Poprzez odpowiednie ukształtowanie tego pola utrzymuje się plazmę we wnętrzu komory reaktora w pewnej odległości od jej ścian, co zdecydowanie zmniejsza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

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 redukowane 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.



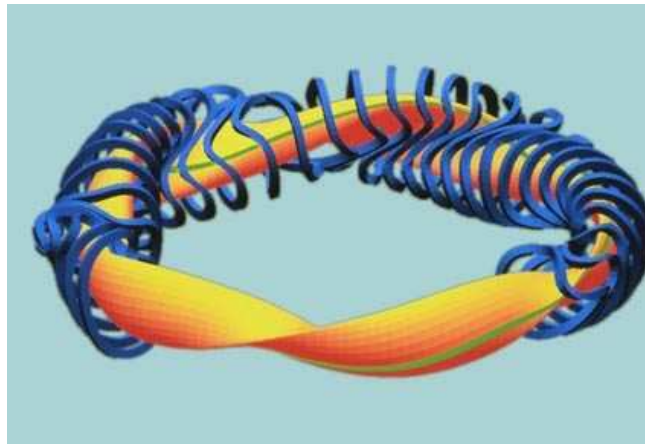
Chaotyczny ruch cząstek naładowanych przy braku pola magnetycznego oraz spiralny ruch – w obecności pola.



Tokamak jest układem transformatora, którego uzwojeniem wtórnym jest plazma wewnątrz torusa.

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 amperów) 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.

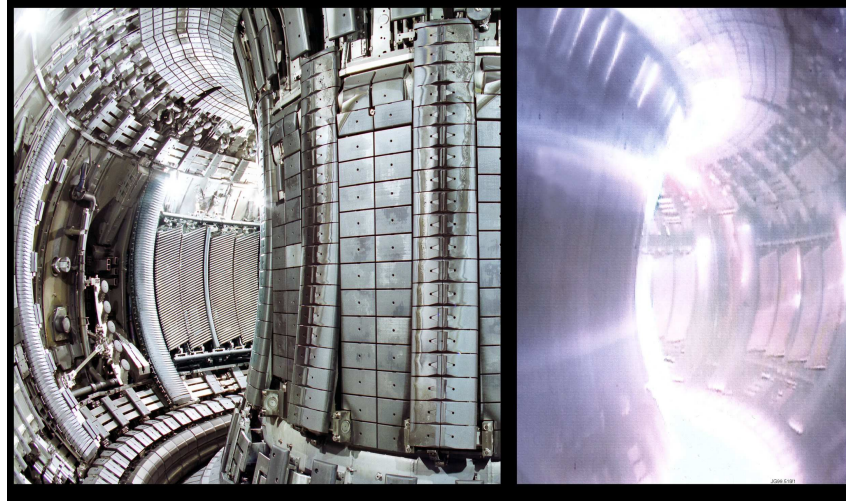
W stellaratorze nie indukuje się prądu toroidalnego. Pole magnetyczne stellaratora wytwarzane jest przez system odpowiednio ukształtowanych cewek i jest osiowo niesymetryczne. Ten rodzaj reaktora ma właściwość pracy ciągłej.



Stellarator: ukształtowanie sznura plazmowego (bez przepływu prądu w plazmie) w skomplikowanej geometrii pola magnetycznego.

Pierwszy tokamak powstał w 1950 roku w Instytucie Energii Atomowej w Moskwie. Zasadę działania tego urządzenia opracowali Igor J. Tamm i Andriej D. Sacharow. Rosyjskie tokamaki były budowane pod kierunkiem profesora Lwa Arcymowicza. Ich nazwa, która przyjęła się powszechnie, to skrót od rosyjskiej nazwy urządzenia: *Toroidalnaja Kamiera s Magnitnymi Katuszkami*, – pierścieniowa komora z cewką magnetyczną.

Największym działającym obecnie tokamakiem jest JET, Joint European Torus, w Wielkiej Brytanii. Jego budowę prowadziły wspólnie kraje europejskie – rozpoczęła się w 1978 r., a pierwsze eksperymenty przeprowadzono w 1983 r. Badania prowadzone z użyciem JET koordynuje organizacja European Fusion Development Agreement. Biorą w nich udział także polscy naukowcy. Tokamak JET jest przystosowany do reakcji syntezy termojądrowej z wykorzystaniem deuteru i trytu. JET osiągnął rekordową moc syntezy termojądrowej – 16 MW. Aktualnie prowadzone z jego użyciem eksperymenty mają posłużyć głównie do projektowania reaktora ITER.



Po lewej: wnętrze tokamaka JET. Po prawej: obraz plazmy uzyskany za pośrednictwem kamery wideo przez okno kwarcowe.

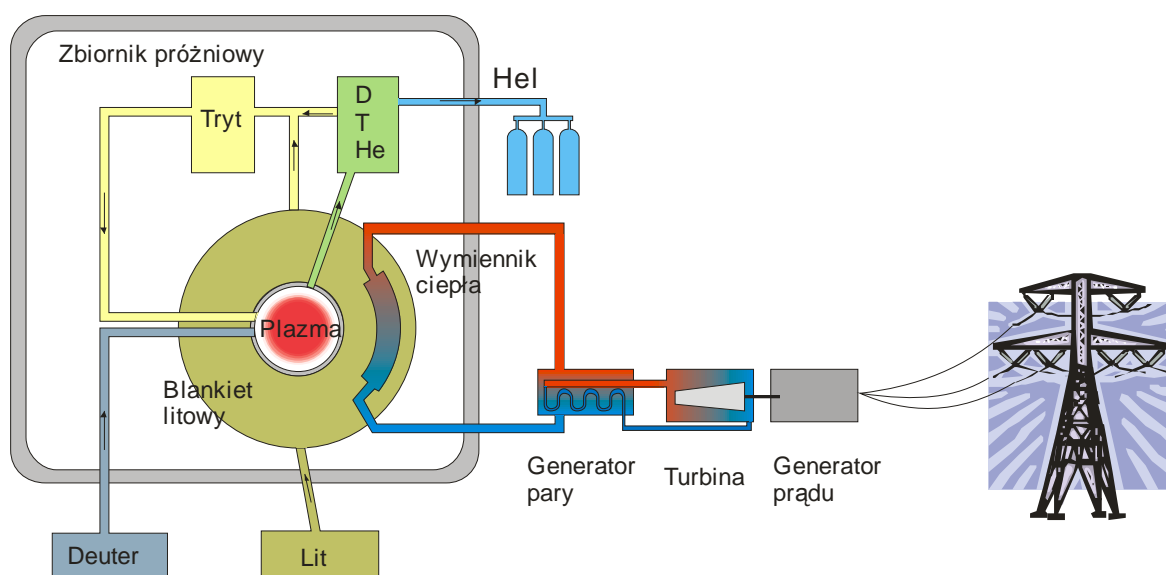
Grzanie oporowe. Podobnie jak w przypadku zwykłych przewodników, prąd elektryczny płynąc przez plazmę podgrzewa ją. Jest to wynikiem zderzeń elektronów z innymi cząstkami plazmy. Ten sposób ogrzewania ma jednak swoje ograniczenia, ponieważ wraz ze wzrostem temperatury zmniejsza się częstość zderzeń, a tym samym stopniowo zmniejsza się 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 kelwinów.

Dodatkowe systemy grzania. Ogrzewanie plazmy strumieniem wysokoenergetycznych cząstek obojętnych. Cząstki te - deuterony, są wytwarzane w źródle jonów i przyspieszane dużą różnicą potencjałów (rzędu 100 kV i więcej), a następnie neutralizowane podczas przejścia przez cylinder wypełniony gazem (neutralizator) i wstrzeliwane do wnętrza komory plazmowej (co jest możliwe, ponieważ pole magnetyczne reaktora nie oddziałuje na strumień cząstek obojętnych), gdzie przekazują swoją energię i podgrzewają plazmę. W ogrzewaniu wysokoczęstotliwościowym stosuje się mikrofales, bądź fale radiowe dużej mocy o częstotliwościach zbliżonych do drgań własnych cząstek plazmy w polu magnetycznym (rezonans). Umożliwia to przekazywanie energii plazmie i jej ogrzewanie. Stosuje się tu systemy rezonansowego grzania cyklotronowego jonów (klistrony 20 MHz- 10 GHz), bądź rezonansowego grzania cyklotronowego elektronów (girotrony 50 - 200 GHz). Powstałe w wyniku reakcji syntezy wysokoenergetyczne jądra atomów helu zderzając się z innymi cząstkami plazmy również ogrzewają ją.

Gdy reakcja syntezy 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. 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 (np. tokamaki), zewnętrzne systemy grzania potrzebne są do podtrzymywania temperatury plazmy zarówno w warunkach długich pulsów jak i pracy ciągłej.

Ciepło syntezy dla elektrowni

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 zostanie zużyte do wytwarzania pary wodnej napędzającej turbinę i generatory prądu elektrycznego. Lit zawarty w wykładzinie ściany reaktora oddziałując z neutronami wytwarza tryt. Gaz ten jest odzyskiwany, oczyszczany i wraz z deuterem wprowadzany ponownie do reaktora jako paliwo plazmowe.



Schemat działania elektrowni ciepłej zasilanej energią syntezy jądrowej.

6. Bezpieczeństwo - podstawowa cecha 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. Zjawisko podobne do stopienia się rdzenia w rozszczepieniowym reaktorze jądrowym jest absolutnie niemożliwe. Zarówno paliwo do reaktora (deuter i lit) jak i „popiół” (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 aktywują się i pozostają radioaktywne po zakończeniu pracy reaktora. Synteza deuteru i trytu jest reakcją, w której emitowane neutrony i cząstki α , a gorąca plazma jest również źródłem promieniowania rentgenowskiego. Radioaktywność ta zanika równocześnie z wygaśnięciem reakcji syntezy. Reaktory syntezy jądrowej nie wytwarzają gazów cieplarnianych, 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 aktywuje i uszkadza wewnętrzne części komory plazmowej i pogarsza stopniowo jej właściwości. Powoduje to konieczność okresowej wymiany wewnętrznej powłoki i tworzy odpad radioaktywny. Ten rodzaj

radioaktywności szybko zanika (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.

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).

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.

7. Synteza jądrowa w Europie - 50 lat postępu

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.

„Badanie syntezy jądrowej ze szczególnym uwzględnieniem zachowania się zjonizowanej plazmy pod wpływem sił elektromagnetycznych” było częścią programu inicjującego współpracę europejską w ramach Euratom już 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 nawet przekroczył wszystkie wytyczone mu cele. 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. 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 towarzyszą prace badawcze i rozwojowe w dziedzinie fizyki i technologii, w które ma być również zaangażowany europejski przemysł.

ITER - droga do energii uzyskiwanej z syntezy jądrowej

ITER (z łaciny – droga) 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). 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. 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 doskonalić metody współpracy naukowej przy dużych eksperymentach i szkolić 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. 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 granulację ceramiczną zawierającą 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 martenzytycznych, 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.

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 w Niemczech przy współdziałaniu polskich specjalistów z IFJ PAN.

Wykorzystano materiały:

1. http://ec.europa.eu/research/leaflets/iter/article_3090_pl.html
2. <http://www.efda.org>
3. <http://www.iter.org>
4. <http://www.postcarbon.pl/2008/01/05/synteza-jadrowa/>
5. Energia gwiazd. Energia dla naszej planety. Fusion Expo. European Fusion Development Agreement, Consorzio RFX (Padova-I)
6. Sławomir Jednoróg, Maria Karpińska: ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) panaceum na kłopoty energetyczne! www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mtj/ITER-SJ.pdf

Why do we need to develop fusion power?

Urszula Woźnicka

Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics, Kraków, Poland

The energy demand of the world is growing due to the increase in world population and the increasing energy (and especially electricity) use per capita. Our present energy system relies heavily on fossil fuels, which supply 80% of the world energy demand. In order to curb the well known problems related to our present energy system, such as climate change and security of supply, we need to move to a sustainable energy mix.

The world's population is projected to increase substantially in this. The proportion of the population living in developing regions will increase the most, and increased access to electricity in developing countries is essential to ensure an increasing quality of life. Furthermore, for international stability, nations will seek electricity supply solutions which allow them to become as far as possible independent of the possessors of scarce fuel resources.

Today most of the worldwide electricity demand is satisfied by fossil fuels, basically by oil, natural gas and coal. If this pattern does not change, the conventional oil and gas resources will last for a couple of generations at present levels of consumption. Increasing scarcity will drive the prices up. At higher prices, oil and gas from unconventional sources such as oil shales and tar sands can also be supplied. Coal reserves are abundant, but their use raises local and global environmental concern. The suppliers of fossil fuels and related technologies are working on technologies to separate CO₂ from exhaust gases and to bury it, but the development, acceptability and economics of this technology are still uncertain.

Oil is also currently the major fuel for transport, and there seems to be no alternative in sight for air transport. In future, because of the increased price and reduction in oil availability, increasing interest is likely to focus on battery-powered electric vehicles and the use of hydrogen fuel generated by splitting water, recombining it to release energy in fuel cells or burning it directly. This will have the effect of increasing electricity demand, and its share in energy demand, particularly in developed countries.

Against this background, new energy sources are needed. The renewable energy technologies, namely solar, wind, tidal, wave, biomass, geothermal and hydro are already fully or in the process of being developed. Their future use is expected to grow under favourable market conditions, especially over the first half of this century. However, they suffer from isolated availability and are variable in nature, are subject to sudden local climatic change, and require complex management of the electricity supply network or the additional cost of accompanying energy storage. They can make a large contribution in countries with a distributed population and lack of electricity network, but they can only cover a minor part of the energy demands at those locations where developed nations currently live.

In the past, nuclear energy based on fission has been adopted by many developed and the most advanced developing countries. Technically, the ability to deploy fission as a long-term energy source has been demonstrated, and the fuel cycle economics and environmental impact are known. A number of countries consider fission a vital element in their current and future electricity supply mix. The long term wider deployment of fission depends on a full public appreciation of the options and alternatives, allowing them to make a balanced judgement. Clearly, having developed the technology, and the infrastructure of its management, it is

highly likely, to at least justify the economics of that infrastructure, that fission will continue to have a future role alongside other electricity supply alternatives.

For the second half of this century, **controlled fusion looks also to be a promising development line.** Although not all is yet understood of the physics and engineering of a power station based on controlled fusion, the basic principles have been elaborated in detail, and no matters of principle have been identified to stop its development into a viable source of electricity in the future. The open questions facing fusion are rather how to optimise the process, and make it attractive and economically viable.

The long-term objective of fusion research is to harness the nuclear energy provided by the fusion of light atoms to help meet mankind's future energy needs. This research, which is carried out by scientists from all over the world, has made tremendous progress over the last decades. The fusion community is now ready to take the next step, and has together designed the international ITER experiment. The aim of ITER is to show fusion could be used to generate electrical power, and to gain the necessary data to design and operate the first electricity-producing plant.

ITER is planned to operate at a nominal fusion power of 500 MW_t. If DEMO (the next device after ITER, and the first to generate electricity) is to be a device of approximately similar physical size (and hence cost), its fusion power level has to be increased by about a factor of 4, so that the electrical power potentially delivered to the network will be in the range of 500 MW_e, typical of one of today's power stations (albeit rather a small one). The general level of heat fluxes through the walls will be about 4 times higher than in ITER, and plasma performance needs to be improved to gain this 4-fold increase. Calculations show that this performance could be achieved with an ~15% increase in ITER linear dimensions, and an ~30% increase in the plasma density above the nominal expected to be confined by the basic magnetic fields on ITER (this capability can be checked on ITER). It then remains for enough to be learnt on the ITER blanket test beds to allow the DEMO blanket to be designed to withstand 4 times the ITER steady heat loads on those components.

Fusion Power Reactor Economics: Assuming plant capital cost scales with the tokamak volume, one can expect DEMO capital costs in the region of 14 €/W based on the cost estimates for ITER. Those of PROTO will then be typically 8€/W and, with economies of series production of fusion plants subsequently, capital costs could reduce to ~ 4 €/W. This should be compared to today's fission and coal plants at ~ 3 €/W and 1.5 €/W respectively. However, the capital costs of today's coal plants do not include costs to mitigate environmental damage, nor do any of the above costs include the fuel, operating and decommissioning costs, which for coal are typically comparable to the capital costs and should be lowest for fusion.

Fusion therefore currently looks like it can reach a position of economic competitiveness with other energy sources, that will be available at that time, if things work out well.

On the basis of: <http://www.iter.org>