

Wizja energetyki przyszłości

Autor: Jakub Spiechowicz, III Liceum Ogólnokształcące, ul. Towarowa 61 43-609 Jaworzno

„Cóż za smutna epoka, w której łatwiej jest rozbić atom niż zniszczyć przesąd.”
A. Einstein

Począwszy od narodzin ludzkości, człowiek uczył się jak wykorzystywać energię, aby zaspokoić swoje podstawowe potrzeby i uczynić życie bardziej komfortowym. W czasach prehistorycznych jego los był uzależniony od energii zgromadzonej w żywności, którą udało mu się zdobyć. Szybko nauczył się jak używać drewna do ogrzewania i oświetlania. Następnym krokiem ewolucji gospodarowania energią było wykorzystanie mocy udomowionych zwierząt do wykonywania pracy. Później, w czasach rewolucji przemysłowej spowodowanej wzrostem produkcji i wydajności, dzięki zastosowaniu napędu parowego i węgla, zbudował fundamenty społeczeństwa technologicznego, jakie znamy dzisiaj. Energia zasila nasz świat. Wraz z rozwojem cywilizacji jej zużycie ogromnie wzrosło. Kiedyś do wykonania pracy używaliśmy energii zgromadzonej wyłącznie w naszym organizmie. Dziś używamy jej powszechnie w domu do ogrzewania, gotowania, oświetlania, słuchania muzyki i wielu innych. Nasz przemysł i system komunikacji zużywają ogromne ilości energii. Szacuje się, że jej roczna konsumpcja przypadająca na człowieka epoki technologicznej wynosi blisko 35 gigadżuli! Jeżeli energia, którą dzisiaj wykorzystujemy w Unii Europejskiej miałyby być wytworzona przez ludzi wykonujących prace mechaniczną na rowerach, średnio 100 osób musiałoby pedałować dzień i noc, aby dostarczyć energii dla zaledwie jednej osoby! W czasach prehistorycznych człowiek wykorzystywał wyłącznie energię skoncentrowaną w jego naturalnym środowisku. Używał mocy udomowionych zwierząt, zbierał drewno, nauczył się wytwarzać energię z pomocą wiatru i spadającej wody. Dzięki tej energii uprawiał zboże, żeglował po morzach i ogrzewał swój dom. Odkrycie paliw kopalnianych – gazu, węgla i ropy - dramatycznie zmieniło sytuację. Dzisiaj ludzkość używa ogromnych rezerw skoncentrowanej energii, wytworzonej przez naturę miliony lat temu, ze szczątków martwych roślin i zwierząt. Obecnie około 80% energii pochodzi z eksploatacji paliw kopalnianych.

Jeszcze cztery wieki temu świat był relatywnie słabo zaludniony. Z powodu rewolucji agrarnej, medycznej i przemysłowej, światowa populacja zwiększyła się ponad dziesięciokrotnie, do liczby 6,5 miliarda ludzi, którzy dzisiaj zamieszkują Ziemię. Zgodnie z danymi przedstawionymi przez Organizację Narodów Zjednoczonych, w ciągu najbliższych 50 lat, światowa populacja wzrośnie do wartości z przedziału od 8 do 13 miliardów ludzi. Dostarczenie wszystkim tym osobom przystępnych w cenie, czystych i bezpiecznych źródeł energii jest jednym z najpoważniejszych wyzwań współczesnej cywilizacji. Szacuje się, że w ciągu tego okresu światowa produkcja energii będzie musiała wzrosnąć dwukrotnie, a może nawet trzykrotnie. Spośród 6,5 miliardów ludzi, zwłaszcza w krajach zachodnich, miliony są przyzwyczajone do wysokiego standardu życia. Także miliony żyją w nędzy, bez czystej wody oraz energii do ogrzewania i gotowania. Blisko jedna trzecia ludzkości nie posiada dostępu do elektryczności. Największy wzrost populacji nastąpi w regionach rozwijających się, takich jak Afryka i Azja, gdzie postęp ekonomiczny jest pilnie potrzebny, aby poprawić warunki życia i gdzie zużycie energii wynosi około jednej dziesiątej krajów zachodnich. Szczególnie w Chinach i Indiach, gdzie energia wykorzystywana do rozwoju ekonomicznego eskaluje w zastraszającym tempie. Szacuje się, że codzienne zużycie ropy Chin i Indii w 2000 roku wyniosło około 7 milionów baryłek, a w 2020 wzrośnie ponad dwukrotnie. Zapotrzebowanie energetyczne nieustannie rośnie.

Węgiel, ropa i gaz zasilają nasz świat. W rzeczywistości dostarczają około 80% energii wykorzystywanej na świecie. Są używane głównie jako ciało robocze w napędach środków komunikacji, do ogrzewania, produkowania energii oraz wytwarzania innych materiałów, takich jak plastik. W procesie spalania paliw kopalnianych do atmosfery dostaje się dwutlenek węgla, który zatrzymuje ciepło generowane przez Ziemię, zachowując się jak szklarnia. W ostatnim wieku średnia temperatura na Ziemi podniosła się o około 0,6 stopnia Celsjusza. Jeżeli nie zaprzestaniemy emisji dwutlenku węgla do atmosfery, temperatura w granicznym przypadku może podnieść się o 5,8 stopnia Celsjusza. Inne gazy, takie jak np. metan, wywołują identyczny efekt. Razem z efektem cieplarnianym ekstremalne anomalie pogodowe będą coraz częstsze. Poza wzrostem temperatury istnieją także inne konsekwencje eksploatacji paliw kopalnianych, takie jak kwaśne deszcze i smog, które bezpośrednio wpływają na naszą rzeczywistość. Wydobywanie paliw kopalnianych może więc skutkować poważnymi konsekwencjami dla środowiska naturalnego i zdrowia ludzi. Kwaśne deszcze są spowodowane emisją dwutlenku siarki, który dostaje się do atmosfery w procesie spalania węgla. Dwutlenek siarki nadaje deszczom kwaśny charakter, które powodują śmierć roślin, zwierząt, populacji ryb w jeziorach i uszkodzenia budynków wznoszonych przez ludzkość z takim trudem. Wydajne wykorzystywanie energii jest jednym z najlepszych sposobów zapobiegania zmianom klimatycznym i minimalizowania zużycia niebezpiecznych paliw kopalnianych. Nowoczesne lampy wymagają dziesięć razy mniej energii niż tradycyjne żarówki, nowe lodówki potrzebują zdecydowanie mniej energii niż stare, wydajne silniki spalinowe zużywają mniej benzyny. Wraz z rozwojem techniki, możemy zrobić o wiele więcej, wykorzystując przy tym tę samą ilość energii. Ponieważ jej znaczna część jest potrzebna do procesów produkcyjnych, efektywne wykorzystanie energii jest jednym z kluczowych aspektów ekonomii współczesnych państw. Wydajność jest podstawową cechą trwałych systemów energetycznych. Musimy chronić nasze środowisko naturalne.

Zasoby węgla, ropy i gazu nie są rozmieszczone na Ziemi równomiernie. Szacuje się, że około 70% z nich znajduje się w środkowo wschodniej części świata. Oznacza to, że wiele państw jest uzależnionych od energetycznych potentatów. Dzisiaj w Europie około 50% energii pochodzi z importu, ostatnie przewidywania mówią, że do roku 2030 samodzielnie będziemy wytwarzać jedynie 30% z niej. Takie uzależnienie może stwarzać międzynarodowe napięcia, czasem nawet wojny. Z tego powodu coraz więcej państw świata szuka niezależności energetycznej. Wyczerpujemy zasoby paliw kopalnianych w dużo szybszym tempie, niż zostały stworzone. Jeżeli będziemy używać ropy, gazu i węgla w obecny sposób, jeszcze w tym stuleciu doprowadzimy do ich dotkliwych braków. Ropa stanie się coraz droższa, a my będziemy bardziej zależni od importu energii z innych krajów. Ponieważ zasoby paliw kopalnianych są mocno ograniczone, nie powinniśmy ich marnować. Stanowią bardzo wartościowy materiał, z którego ludzkość wytwarza m.in. lekarstwa. Według najnowszych ocen przy obecnym wykorzystaniu węgla, gazu i ropy wystarczy ich na odpowiednio: 220, 60 i 40 lat. Zasoby paliw kopalnianych wyczerpią się całkowicie.

Wzrost stężenia dwutlenku węgla w atmosferze zagraża naszej planecie. Żeby odwrócić ten trend potrzebujemy źródeł energii, które nie emitują CO₂, takich jak biomasa, energia słoneczna, wiatrowa, rozszczepienie i fuzja jądrowa. Innym pomysłem jest przechowywanie nadmiaru dwutlenku węgla pod powierzchnią naszej planety. Naukowcy uważają, że musimy zredukować emisję CO₂ o około 60-70% w najbliższych 50 latach, jeśli chcemy, aby stężenie gazu powróciło do rozsądnego poziomu. Rozwój odnawialnych źródeł energii tj. biomasy, energii słonecznej, geotermalnej i wiatrowej jest kluczowym elementem planu redukcji emisji dwutlenku węgla. Obecnie największym źródłem odnawialnej energii są elektrownie wodne, które produkują około 17% światowego zapotrzebowania energetycznego, pozostałe stanowią niewiele ponad 1%. Większość miejsc dogodnych dla ich instalacji jest już wykorzystana, dlatego dalszy postęp odnawialnych źródeł energii będzie skoncentrowany głównie wokół biomasy, elektrowni słonecznych i farm wiatraków. Musimy rozwijać alternatywne źródła energii.

Fuzja jądrowa jest procesem, który zasila Słońce i inne gwiazdy. Jest to reakcja, w której dwa jądra atomowe łączą się ze sobą, tworząc cięższy atom. W tej reakcji lekkich atomów, takich jak wodór, wydziela się ogromna ilość energii. Fuzja jądrowa jest przeciwieństwem reakcji rozszczepienia, w której ciężkie atomy dzielą się na mniejsze części. Jest bezpiecznym i ekologicznym źródłem energii. Naukowcy i inżynierowie z całego świata starają się zrozumieć meandry fuzji i zastosować ją na Ziemi. Jeżeli tego dokonają, jej energia niewątpliwie pomoże sprostać wyzwaniom energetycznym świata. Paliwa niezbędne do przeprowadzenia reakcji, lit i deuter, są dostępne w wystarczająco dużej liczbie, aby zaspokoić nasze energetyczne potrzeby na miliony lat. Są powszechnie dostępne dla wszystkich narodów. Elektrownie fuzji jądrowej mogłyby generować energię na dużą skalę w sposób ciągły, stanowiąc idealne uzupełnienie pozostałych źródeł odnawialnych, tworząc stabilny i ekologiczny system energetyczny. Międzynarodowa społeczność naukowców i inżynierów pracujących nad przeprowadzeniem fuzji jądrowej jest gotowa podjąć następny krok w walce o naszą przyszłość – Międzynarodowy Eksperymentalny Reaktor Termojądrowy (International Experimental Thermonuclear Reactor).

Cała materia składa się z atomów, które są zbudowane z jąder i krążących wokół nich ujemnie naładowanych elektronów. Jądra atomowe składają się z dodatnio naładowanych protonów i obojętnych elektrycznie neutronów. Jądro atomowe jest utrzymywane dzięki działaniu bardzo silnych sił jądrowych. Elektrony są przyciągane do jąder w wyniku funkcjonowania sił oddziaływania elektrycznego, które są o wiele słabsze od sił utrzymujących jądro w całości. W reakcji fuzji dwa lekkie atomy łączą się ze sobą, tworząc jeden cięższy. Najprostszym przykładem tej reakcji jest fuzja dwóch izotopów wodoru, deuteru i trytu, w wyniku której powstaje hel i neutron. Reakcji towarzyszy wydzielanie energii. To proces, który ogrzewa Słońce i inne gwiazdy, które możemy śmiało nazwać naturalnymi reaktorami fuzyjnymi. W Słońcu 600 milionów ton wodoru reaguje w każdej sekundzie tworząc hel. Energia tego procesu utrzymuje życie na naszej planecie. W innych gwiazdach, także cięższe atomy mogą łączyć się ze sobą tworząc węgiel, azot, tlen i wiele innych. W rzeczywistości cała materia istniejąca obecnie we wszechświecie została stworzona z najbliższego elementu – wodoru.

Rozszczepienie jądrowe jest procesem, który zasila dzisiejsze elektrownie atomowe. Stanowi całkowite przeciwieństwo fuzji. W tym procesie cięższy atom rozpada się na mniejsze części, wydzielając energię. Rozszczepienie ma charakter łańcuchowy, oznacza to, że jedna reakcja generuje średnio 2 neutrony, które powodują kolejne reakcje itd. Z uwagi na jej charakter, musi być pod ścisłą kontrolą. W reaktorze fuzyjnym potrzebne paliwo musi być ciągle dostarczane, dlatego jeżeli go zabraknie, reakcje ulegną zahamowaniu. Z tego powodu fuzja jest naturalnie bezpieczna, nie istnieje prawdopodobieństwo zajścia żadnych równoległych reakcji.

Protony tworzące jądro atomowe mają dodatni ładunek. Oznacza to, że gdy atomy ulegające fuzji przybliżą się do siebie, siły oddziaływania elektrycznego spowodują ich odepchnięcie. Tylko w przypadku, gdy jądra zbliżą się na dostatecznie bliską odległość, z pomocą sił jądrowych, może dojść do ich połączenia. Ta sytuacja wymaga zderzenia jąder poruszających się z ogromną prędkością. W trakcie procesu fuzji zostaje wyemitowana energia. Fuzję możemy porównać do piłeczki golfowej toczącej się po wzgórzu; jeżeli osiągnie szczyt, zacznie spadać i wydzieli porcję energii. Aby jądra mogły zbliżyć się do siebie na wystarczającą odległość i pokonać siły oddziaływania elektrycznego, w reaktorze jądrowym panuje temperatura około 150 milionów stopni Celsjusza. Jądra wodoru poruszają się z prędkością 1000 kilometrów na sekundę. Zastanówmy się, co dzieje się w tak wysokiej temperaturze. W kostce lodu atomy są ułożone w regularny sposób, w określonej pozycji. Kiedy ją podgrzejemy, zacznie się topić, cząsteczki będą mogły się swobodnie poruszać. W większych temperaturach woda zaczyna wrzeć, tworząc parę wodną. Jeżeli będziemy kontynuować dostarczanie ciepła, cząsteczki wody rozdziela się na tlen i wodór. W wyższych temperaturach nastąpi proces jonizacji, czyli oddzielenia elektronów od jąder atomowych. Stan skupienia stworzony przez swobodne

elektrony i dodatnie jony nazywamy plazmą. Słońce, gwiazdy, piorun, a nawet fluorescencyjne świetlówki, w której niektóre elektrony osiągają temperaturę 10 tysięcy stopni Celsjusza, są z niej zbudowane. Plazmy są szeroko wykorzystywane w przemyśle i w celach oświetleniowych. Komputerowe chipy są wytwarzane z jej pomocą. Spawanie, zgrzewanie także wymaga obecności plazmy. Nowoczesne telewizory i ekrany komputerowe, nazywane plazmowymi, wykorzystują jej niewielkie wyładowania.

Wszystkie cząstki zawarte w plazmie poruszają się w dowolnych kierunkach. Kontakt ze ścianami zbiornika mógłby ją ochłodzić i przerwać proces osiągania temperatury wymaganej w reakcji fuzji. Na szczęście, możemy użyć pola magnetycznego, aby ją kontrolować. W obecności pola magnetycznego wszystkie naładowane cząstki plazmy poruszają się po liniach pola, prowadzone identycznie jak pociąg. W ten sposób możemy zapobiec jej ochładzaniu. Jeżeli użylibyśmy prostego cylindra z polem magnetycznym, wciąż mielibyśmy do rozwiązania problem zderzeń cząstek z jego początkiem i końcem. Zamiast tego, możemy użyć cylindra w kształcie pierścienia, podobnego do pączka lub wnętrza opony samochodowej. Ten kształt nazywany torusem nie ma końców. Sposób kontrolowania plazmy został wynaleziony przez Rosjan, którzy nazwali go Tokamak (rosyjski akronim dla „toroidal chamber with magnetic field coils”).

Substratem reakcji fuzji jądrowej w Słońcu jest wodór, ale próba jej kopii na Ziemi byłaby z góry skazana na niepowodzenie. Reakcje umożliwiają ogromne rozmiary Słońca i ogromna presja spowodowana grawitacją. Na Ziemi taka reakcja nie byłaby praktyczna, ponieważ wymagałaby zbyt dużej energii lub temperatury. Zamiast tego, lepiej wykorzystać izotopy wodoru, deuter i tryt, które są do niego bardzo podobne. Reakcja wymaga temperatury od 100 do 150 milionów stopni Celsjusza. Niskie ciśnienie i gęstość plazmy są istotnymi zabezpieczeniami tokamaka. Deuter i tryt są izotopami wodoru. Oznacza to, że różnią się od niego jedynie liczbą neutronów w jądrze. I tak, deuter posiada o jeden neutron więcej, a tryt o dwa. Każdy litr zwyczajnej wody posiada około 33 miligramy deuteru. Jeżeli połączymy go z trytem, otrzymamy porcję energii równoważną 340 litrom benzyny. Na świecie jest wystarczająco dużo deuteru, aby dostarczać ludzkości energię poprzez miliardy lat. Tryt jest radioaktywny i charakteryzuje się okresem połowicznego rozpadu powyżej 12 lat, co oznacza, że rozpada się stosunkowo szybko. Z tego powodu, ciężko odnaleźć go w przyrodzie i musi być produkowany sztucznie. Wewnątrz reaktora fuzyjnego tryt jest produkowany z lekkiego metalu, litu. Neutrony wydzielone podczas reakcji fuzji transformują lit w hel i tryt. Skorupa ziemska i oceany zawierają ilości litu wystarczające do dostarczania energii, na obecnym, światowym poziomie przez tysiące lat. Podczas operacji instalacji reaktora nie jest wymagany transport trytu. Tylko podczas włączania i wyłączania reaktora trzeba przetransportować niewielkie ilości tego pierwiastka.

Paliwo niezbędne do przeprowadzenia reakcji fuzji jest powszechnie dostępne. Fuzja wykorzystuje deuter obecny w wodzie i tryt wytwarzany z litu, pospolitego metalu. Warto zauważyć, że żadne z paliw potrzebnych fuzji nie jest radioaktywne. Każde z nich jest obficie i łatwo osiągalne na całym świecie. Ilość paliwa potrzebnego do uruchomienia reaktora jest niezwykle mała, tylko 10 gram deuteru i 15 gram trytu spełni wymogi miejskiego życia w rozwiniętym państwie. Aktualne zasoby deuteru i litu są wystarczające na miliony lat zasilania. Okres połowicznego rozpadu trytu wynosi około 12,3 lat, co oznacza, że po tym czasie jego połowa zanika. Kiedy dochodzi do rozpadu, tryt emituje elektron (promieniowanie beta) o bardzo małej energii. Z powodu tak małej energii nie może przejść przez skórę. W powietrzu, wyemitowane elektrony przebywają drogę zaledwie kilku milimetrów i nie są w stanie przeniknąć nawet przez kartkę papieru. Warto zauważyć, że pomimo tego, że tryt jest radioaktywny, nie zagraża zewnętrznym promieniowaniem. Izotop zostaje wytworzony w malutkich porcjach w górnych warstwach atmosfery i przeniesiony przez deszcze. W świeżej wodzie znajduje się zawsze niewielka ilość trytu. Globalne zasoby natury tego pierwiastka oscylują w zakresie 3,7 kg. Jedynie wdychany lub spożywany izotop wodoru stanowi zagrożenie i może powodować szkody. Może przedostawać się do naszego organizmu jako woda, w której jeden

z atomów wodoru zostaje zastąpiony trytem. Nie niesie to za sobą żadnych konsekwencji zdrowotnych. Ułamek organicznego trytu może pozostać w naszym organizmie do 40 dni. Z powodu relatywnie krótkiego okresu połowicznego rozpadu znajduje zastosowanie w wielu gałęziach współczesnego życia, m.in. medycynie i badaniach naukowych. Ponieważ obecny w wodzie zanika stosunkowo wolno, może być wykorzystywany do pomiaru jej wieku. Z jego pomocą można wyznaczyć wiek wód podziemnych lub wina. Tryt jest szeroko wykorzystywany w badaniach biologii molekularnej.

Fuzja nie jest reakcją łańcuchową, nie ma więc możliwości przeprowadzenia żadnych równoległych, niechcianych przemian. Podobnie jak palnik gazowy w kuchni, nieustannie potrzebuje paliwa. Możemy bez problemu kontrolować przebieg reakcji, po prostu odłączając źródło paliwa – nie ma ryzyka eksplozji. Innym naturalnym zabezpieczeniem są materiały użyte do budowy tokamaka, badania pokazują, że nawet w sytuacji kompletnej utraty aktywnego chłodzenia nie istnieje ryzyko niebezpiecznego wzrostu temperatury. Elektrownia fuzyjna ma specyficzną konstrukcję, dzięki której radioaktywne substancje są przechowywane wewnątrz reaktora. W przypadkach nieprzewidzianego wypadku ilość trytu wydzielonego do otoczenia będzie tak znikoma, że nawet ewakuacja ludzi nie będzie konieczna.

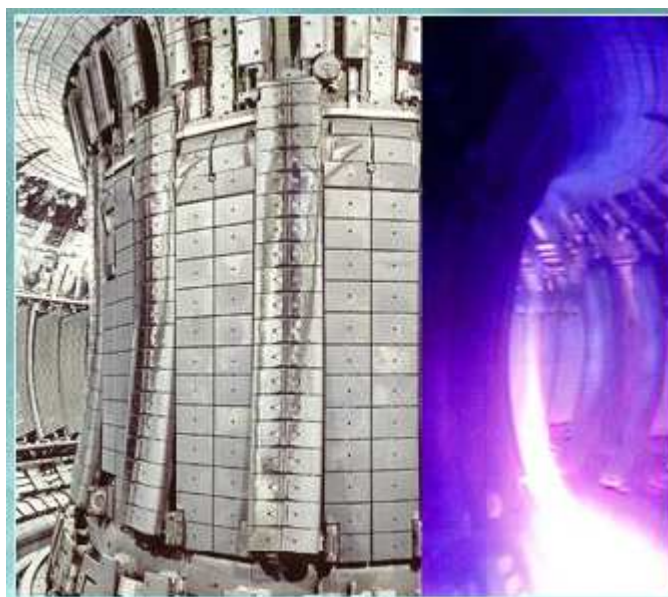
Fuzja jądrowa nie produkuje płynów, które przyczyniają się do występowania efektu cieplarnianego. Jedynym gazem wytworzonym w reakcji jest nieszkodliwy hel, który powszechnie występuje w atmosferze ziemskiej. Elektrownia fuzyjna o mocy około 1000 megawatów produkowałaby tylko 250 kilogramów helu na rok – dla porównania, tradycyjna elektrownia węglowa wytwarza rocznie około 7 milionów ton dwutlenku węgla. W czasie działania reaktora zbiornik zawierający plazmę jest bombardowany przez neutrony będące produktami reakcji fuzji jądrowej. To powoduje, że materiały, z których jest on zbudowany stają się radioaktywne. Przy odpowiednim doborze materiałów, toksyczność odpadów reakcji fuzji jądrowej będzie porównywalna z pyłem generowanym przez tradycyjną elektrownię węglową. Produkty fuzji nie będą ciężarem dla przyszłych pokoleń. Europa wspólnie z innymi międzynarodowymi partnerami pracuje nad nowymi materiałami, które będą wykorzystane w przyszłych reaktorach fuzyjnych. Celem jest wynalezienie materiału o krótkim okresie połowicznego rozpadu, tak aby mógł być poddany recyklingowi lub składowany według dobrze znanych procedur.

Wiedza o budowie i kontrolowaniu reaktora fuzyjnego nie może być wykorzystana do żadnych celów militarnych. Najlepszym tego dowodem jest fakt, że od 1958 roku naukowcy z Europy, Rosji i Stanów Zjednoczonych pracowali razem w otwartym programie naukowym, którego celem było utrzymanie plazmy przez pole magnetyczne. Nawet w czasie zimnej wojny bezproblemowo wymieniali się pomysłami opracowania powszechnego reaktora fuzyjnego.

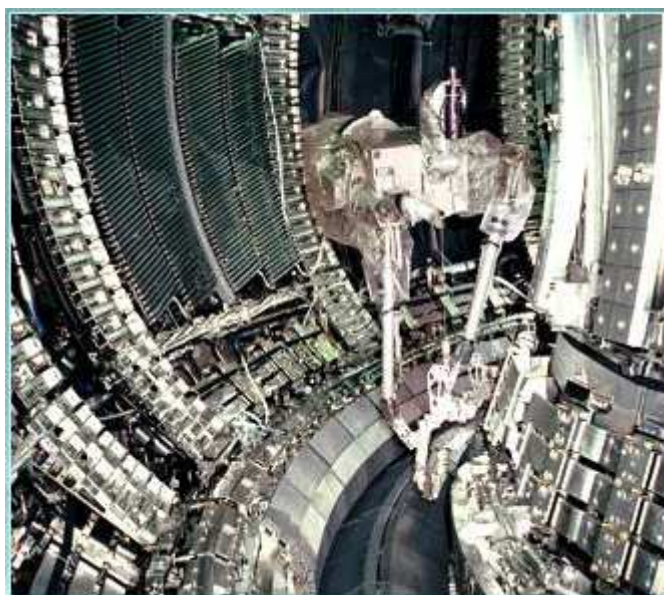
Zgodnie z danymi przedstawionymi przez Międzynarodową Agencję Energetyczną (International Energy Agency) około 8% rocznych wydatków państw członkowskich (notabene większość z dobrze rozwiniętych krajów zachodnich) jest przeznaczona na badania i rozwój fuzji jądrowej. Statystycznie każdy obywatel Unii Europejskiej przeznaczą rocznie na ten cel około 1 euro. Niezmiernie ciężko jest przewidzieć ceny energii pochodzącej z reaktorów termojądrowych w perspektywie najbliższych 50 lat, ale badania mówią, że jej cena powinna kształtować się na poziomie innych przyjaznych środowisku źródeł np. wiatru i biomasy.

W 1920 roku, Sir Artur Eddington angielski astronom był pierwszym, który zaproponował koncepcję fuzji jądrowej jako źródła zasilania Słońca. Eddington założył, że fuzja polega na połączeniu najpowszechniej występującego pierwiastka – wodoru i wytworzeniu helu. W 1938 roku, Hans Bethe, profesor fizyki, dokładnie przedstawił sposób, w jaki atomy wodoru łączą się, tworząc hel. W pierwszych dniach 1950 roku przeprowadzono pierwsze eksperymenty kontrolowania plazmy przez pole magnetyczne. Szybko stało się oczywiste, że będzie to wyjątkowo trudne zadanie. W następnym

dziesięcioleciu skala eksperymentów powoli rosła, przedstawiono pierwsze koncepcje badań fuzji. Rosyjscy naukowcy otrzymali bardzo pozytywne wyniki z urządzeniem w kształcie pączka, nazwanym Tokamakiem. Krótco po tym wydarzeniu delegacja brytyjskich naukowców przybyła do Rosji, aby zweryfikować badania. Świat ogarnął optymizm, narodziła się era znanego dziś tokamaka. W latach siedemdziesiątych przeprowadzono kilka eksperymentów, które nieco ochłodziły początkowy entuzjazm. Okazało się, że trudno jest zniwelować straty ciepła spowodowane wcześniej omówionymi zagadnieniami. Naukowcy uświadomili sobie, jak wielką drogę muszą pokonać, aby energia fuzji jądrowej stała się komercyjnie dostępna. Wraz z początkiem kolejnej dekady uruchomiono nowe, większe tokamaki – TFTR w Stanach Zjednoczonych, JET w Europie i JT60 w Japonii. Każdy z nich był podobnych rozmiarów i charakteryzował się podobną wydajnością.



JET, źródło: EFDA-JET



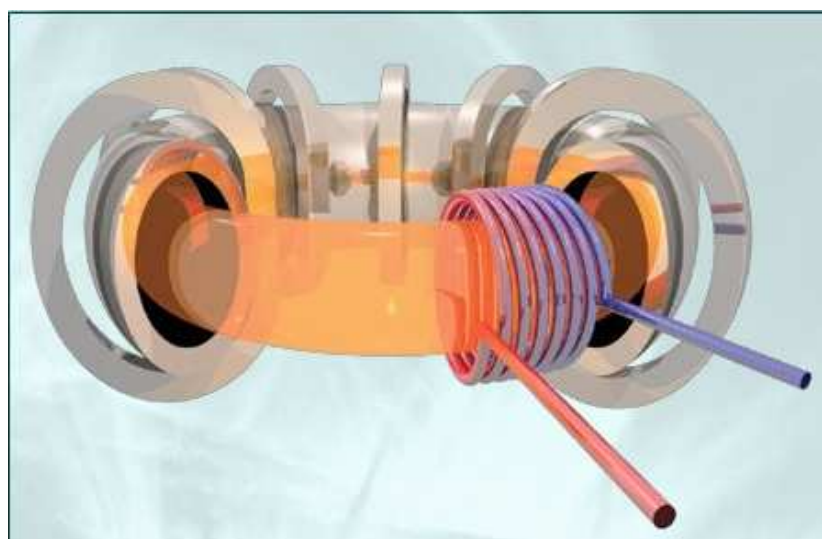
Bezprzewodowe sterowanie JET, źródło: EFDA-JET

W 1988 roku pomiędzy Stanami Zjednoczonymi, Japonią, Rosją i Europą zawarto porozumienie o budowie reaktora termojądrowego następnej generacji. Projekt nazywał się ITER. W ostatniej dekadzie dwudziestego wieku wcześniej uruchomione reaktory pobijały rekord za

rekordem. W 1997 roku JET wyprodukował 16 megawatów przy dostarczonych 25 megawatach, TFTR i JT60 osiągnęły podobne rezultaty. Rok później przedstawiono pierwszą wspólną koncepcję wyglądu nowego reaktora ITER, niestety, przedstawiony pomysł spotkał się z dezaprobatą z powodu zbyt wysokich kosztów budowy. W tym samym czasie Stany Zjednoczone zawiesiły swój udział w projekcie. Pozostali partnerzy: Kanada, Japonia, Rosja i Europa kontynuowali negocjacje bez udziału USA. W 2001 roku zatwierdzono propozycję mniejszej i mniej kosztownej wersji projektu ITER. Założenia naukowe pozostały niezmienione. Dwa lata później do coraz prężniej rozwijającego się projektu dołączyły Chiny, USA, Korea Południowa i Indie. Pod koniec roku 2003 z udziału w projekcie zrezygnowała Kanada. Dziś ITER jest prawdziwie ogólnościatową próbą ujarznienia energii Słońca. Warto przy tej okazji krótko wspomnieć o innych wyzwaniach i technologiach użytych do budowy elektrowni termojądrowej.

Aby osiągnąć ekstremalnie wysoką temperaturę 100 milionów stopni Celsjusza stosuje się różne metody ogrzewania. Jedną z nich jest prąd płynący wewnątrz torusa. Plazma zawiera naładowane cząstki, dlatego może podtrzymywać przepływ prądu. Prąd jest wytwarzany przez transformator, dla którego drugą cewką jest plazma. Prąd ogrzewa ją dzięki jej oporowi, inaczej mówiąc wymuszony ruch naładowanych cząstek powoduje wiele dodatkowych zderzeń. Dzięki tej metodzie plazma może być ogrzana do temperatury około 10 milionów stopni Celsjusza. Inna metoda polega na wykorzystaniu akceleratorów generujących wiązki bardzo szybkich, neutralnych cząstek. Koniecznie muszą być pozbawione ładunku, ponieważ pole magnetyczne torusa zakłóciłoby ruch cząstek naładowanych. Wiązka produkowana przez akcelerator szybko zderza się z cząstkami plazmy, powodując ich naładowanie i transfer energii do plazmy. Do jej ogrzewania stosuje się fale elektromagnetyczne z zakresu trzech częstotliwości: cyklotron jonów (25-55 megahertzów); cyklotron elektronów (100-200 gigahertzów) i mikrofałe (1-8 gigahertzów). Naładowane cząstki tworzące plazmę są w stanie absorbować energię fal elektromagnetycznych, co przejawia się wzrostem jej temperatury. Emisja fal odbywa się dzięki antenie, tak jak to ma miejsce w typowej kuchence mikrofalowej.

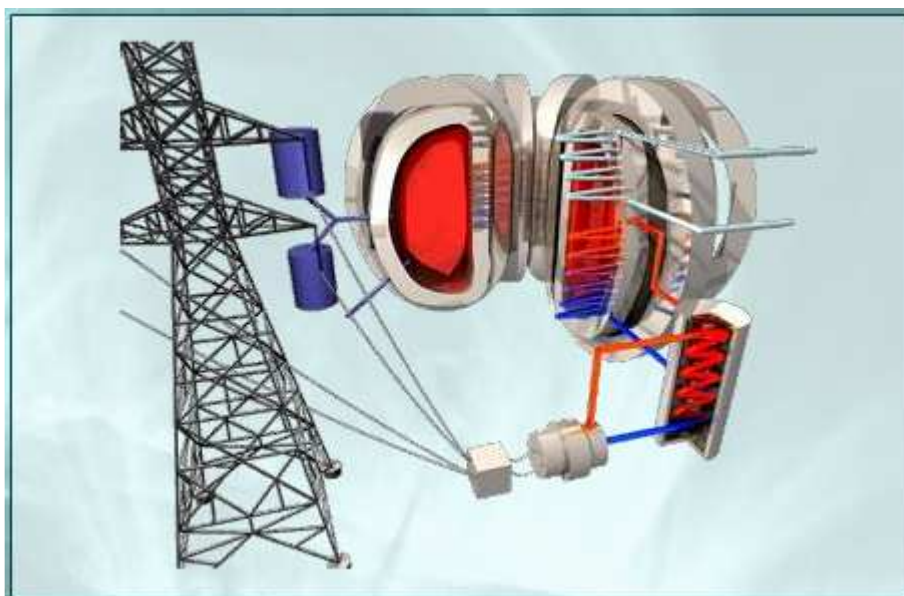
Oczywiście istnieją inne koncepcje budowy reaktora termojądrowego. Jedną z nich jest tzw. stellarator. Podstawową różnicą w stosunku do tokamaka jest brak przepływu prądu w plazmie. Fakt ten, powoduje, że teoretycznie znacznie łatwiej jest przeprowadzić całą operację. Grupa cewek o dość dziwnych kształtach jest odpowiedzialna za wytworzenie potrzebnego pola magnetycznego. Pomimo iż koncepcja stellaratora jest niezmiernie obiecująca, badania w tym zakresie są daleko za tradycyjnym tokamakami.



Schemat Tokamaka, źródło: FOM-Rijnhuizen

Obecny projekt fuzji jądrowej nie jest rzecz jasna jedynym. Równolegle koegzystuje wiele innych, chociażby tzw. fuzja wewnętrzna. Niewielka paleta zamrożonego deuteru i trytu jest oświetlona ze wszystkich stron bardzo mocnymi laserami lub pulsującymi jonami. Zewnętrzna część palety staje się bardzo gorąca i odpada. Wewnętrzna część zostaje wtedy bardzo szybko ściśnięta pod działaniem ogromnego ciśnienia. Sprężenie powoduje wzrost temperatury i gęstości, umożliwiając fuzję deuteru i trytu. W 1989 roku dwaj amerykańscy chemicy stwierdzili, że udało się im przeprowadzić fuzję jądrową w temperaturze pokojowej, dzięki elektrolizie ciężkiej wody z wykorzystaniem palladowych elektrod. Artykuł, w którym opublikowali wyniki swoich badań, spowodował ogromne poruszenie w świecie fizyków. Jednakże wielu z nich próbowało powtórzyć doświadczenie amerykańskich chemików i jak dotąd nikomu nie udało się osiągnąć podobnych rezultatów.

Fuzja jądrowa zawsze była międzynarodowym przedsięwzięciem, począwszy od konferencji Atoms for Peace przeprowadzonej w 1955 roku w Genewie w Szwajcarii. W 1957 roku sześciu założycieli European Community powołało do życia Europejską Wspólnotę Energii Atomowej (EURATOM). Podstawowym celem tej organizacji była koordynacja badań nad wykorzystaniem energii atomowej do celów pokojowych. Dzisiaj wszyscy członkowie Unii Europejskiej są jednocześnie zaangażowani w EURATOM. Ponad 25 instytutów i uniwersytetów europejskich pracuje w badaniach nad fuzją jądrową. W Polsce jednym z niewielu ośrodków zaangażowanych w tworzenie źródeł energii przyszłości jest Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie. W celu koordynacji działań skupionych wokół fuzji jądrowej powołano specjalną organizację o nazwie European Fusion Development Agreement (EFDA). Obecnie największym światowym eksperymentem jest Joint European Torus (JET), zlokalizowany w Culham w Wielkiej Brytanii. Został wybudowany rękami wielu fizyków i inżynierów z całej Europy. Obecny rekord mocy reaktora termojądrowego wynoszący 16 megawatów należy właśnie do JET'a.



Elementy elektrowni termojądrowej, źródło: FOM-Rijnhuizen

Następnym krokiem w rozwoju koncepcji fuzji jądrowej jako źródła mocy dla przyszłych pokoleń jest program ITER (z łac. droga, podróż). Aktualnie w projekt zaangażowane są wszystkie państwa Unii Europejskiej, Szwajcaria, Japonia, Rosja, Chiny, Indie, Stany Zjednoczone i Korea Południowa. Głównym celem planu jest przedstawienie fuzji jądrowej jako wykonalnego zarówno pod względem naukowym i technicznym źródła energii. Konstrukcja elektrowni wymaga inwestycji rządu

5 miliardów euro. Objętość plazmy w porównaniu do największego w tej chwili reaktora termojądrowego JET'a, jest blisko dziesięciokrotnie większa. Paradoksalnie dzięki takiemu zabiegowi łatwiej będzie utrzymać ją w zamknięciu. Pomimo tak dużej różnicy objętości plazmy ITER jest tylko dwa razy większy od swojego poprzednika. Według prognoz najnowszy reaktor termojądrowy będzie w stanie wyprodukować dziesięć razy więcej energii niż potrzeba jej do ogrzania plazmy. Podstawowym celem badań naukowych nie będzie sama elektrownia, ale plazma. Być może uda się wykorzystać reakcje fuzji jądrowej do samoczynnego ogrzewania plazmy, rezygnując z zewnętrznych źródeł ciepła. Do budowy reaktora wykorzystano najnowsze osiągnięcia naukowe, które w przyszłości bez wątpienia zostaną zastosowane w tradycyjnych elektrowniach. Użyto najnowszych nadprzewodzących magnesów, materiałów o dużej tolerancji temperaturowej, zdalnych systemów sterowania i specjalnych narzędzi obsługujących tryt. Prototypy tych urządzeń zostały już wyprodukowane i przetestowane. Trzeba otwarcie przyznać, że dzięki badaniom nad fuzją jądrową będą rozwijane w jeszcze bardziej dynamicznym tempie, być może znajdą zastosowania w innych dziedzinach życia. ITER zostanie wybudowany w Cadarache na południu Francji. Początek procesu zaplanowano na rok 2008, ale wstępne czynności rozpoczęto już w pierwszych dniach ubiegłego roku. Prawdopodobnie minie 8 lat, zanim reaktor wytworzy pierwszą plazmę. Dwudziestoletni program badawczy rozpocznie się od czteroletniego okresu testów, w czasie trwania którego, zamiast trytu zastosowany będzie wodór i deuter. Jeżeli pierwsze eksperymenty zostaną przeprowadzone bez zakłóceń, prawdziwe paliwo fuzji będzie zasilac elektrownię.

Neutrony będące produktami reakcji fuzji uderzają w ściany torusa, powodując destrukcję monomerów. Do budowy elektrowni użyto specjalnych materiałów zdolnych do wytrzymania tak ekstremalnych temperatur, zderzeń strumieni neutronów i erozji. Promieniotwórcze cząstki mogą aktywować materiały budujące reaktor. Dlatego tak istotny jest ich odpowiedni dobór, aby maksymalnie ograniczyć okres ich rozkładu. Najbardziej optymistyczna wersja mówi, że po czasie 100 lat staną się całkowicie bezpieczne i będzie można poddać je recyklingowi. Planuje się powołanie do życia specjalnej organizacji International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF), której zadaniem będzie prowadzenie badań nad nowymi materiałami i testowanie ich pod kątem przydatności w budowie reaktorów termojądrowych. Dąży się do równoczesnego uruchomienia obu projektów, aby równolegle rozwijać koncepcję fuzji jądrowej i niezbędnych materiałów, które w przyszłości zostaną wykorzystane do budowy następnej maszyny. Trwają wstępne prace nad kształtem IFMIF.

W perspektywie najbliższych 30-35 lat zaprojektowany zostanie sukcesor projektu ITER, DEMO. Głównym celem będzie zademonstrowanie elektrowni jądrowej opartej wyłącznie na trycie i wprowadzenie jej w świat przemysłu. Droga do wydajnej, przyjaznej środowisku i człowiekowi energii zawiera więc trzy główne przystanki. Pierwszym z nich jest ITER i IFMIF, następnym DEMO. Ostatnim krokiem ku niewyczerpanej mocy będzie budowa reaktora termojądrowego PROTO, będącego prototypem nowoczesnych elektrowni jądrowych. Pod koniec 2001 roku, grupa naukowców przeprowadziła badania nad możliwością skrócenia czasu oczekiwania na nowe źródło energii. Prawdopodobnym wariantem jest połączenie reaktorów DEMO i PROTO w jeden, będący demonstracją finalnej wersji elektrowni termojądrowych. W taki sposób ludzkość mogłaby cieszyć się z niewątpliwie milowego kroku w jej historii w perspektywie najbliższych 30-35 lat. Żeby zaspokoić nieustannie rosnące potrzeby energetyczne świata, musi powstać setki takich reaktorów, co prawdopodobnie zajmie o wiele więcej czasu. Przeciętna szacunkowa moc elektrowni termojądrowej wynosi około 100 megawatów, dlatego będzie bezwątpnie idealnym źródłem zasilania podstawowego obciążenia. Z czasem uzupełniona o inne źródła odnawialnej energii, takie jak wiatr, woda, zbuduje trwały system energetyczny potrafiący sprostać nawet największym wyzwaniom, przy tym będący w żaden sposób nieszkodliwym dla naszej planety. Nadszedł czas zmian, potrzeba nowych odnawialnych źródeł czystej i bezpiecznej energii. Rozpoczyna się nowa era energetyki.

Powróćmy jeszcze na chwilę do polskiego wkładu w tworzenie nowej rzeczywistości. W ostatnim czasie coraz częściej w prasie ukazują się artykuły traktujące na ten temat, dlatego warto nieco bliżej poznać polskie osiągnięcia w tej dziedzinie. Naukowcy z Politechniki Wrocławskiej, którym przewodzi szef uczelnianego parku technologicznego prof. Maciej Chorowski, są współodpowiedzialni za budowę nowoczesnych magnesów nadprzewodzących, które będą tworzyć pole magnetyczne wokół torusa, nie wpływając na jego temperaturę. Wrocławscy uczeni wspólnie z naukowcami z Indii tworzą sieci kriogeniczne – systemy chłodzenia cewek ciekłym helem. Naukowcom z Politechniki Warszawskiej powierzono zadanie w dziedzinie, w której są uważani za wybitnych specjalistów. Będą konstruować nanometale, wykorzystane do budowy projektu ITER. Powstają z dobrze znanych metali i ich stopów, takich jak stal, aluminium, żelazo i miedź. Gdyby przyjrzeć im się pod mikroskopem elektronowym, w którym ziarenko piasku o średnicy jednej setnej milimetra zwiększa swoją średnicę do dziesięciu metrów – wyglądają zupełnie inaczej. Uczeni z zespołu prof. Krzysztofa Kurzydłowskiego kierownika Zakładu Projektowania Materiałów Politechniki Warszawskiej pokazali już światu co potrafią i ich sukces został zauważony. Otrzymali nanotytan, metal bardzo odporny na uszkodzenia mechaniczne. Jednakże nie zostanie on wykorzystany w budowie reaktora ITER, z uwagi na wysokie koszty produkcji. Znajdzie zastosowanie w medycynie. Do wykonania elementów reaktora zostanie zastosowany stop nanoaluminium, innego materiału uzyskanego w Zakładzie Projektowania Materiałów Politechniki Warszawskiej. Na potrzeby budowy projektu ITER badają także inne materiały, które zamieniają na ich wersje nano. Wśród nich znajduje się tzw. stal ferryczna, która zostanie wykorzystana w konstrukcji jednej z głównych części komory reaktora. Stopy miedzi i cyrkonu stworzą systemy odprowadzające ciepło. Trzeba przyznać, że polscy naukowcy mają nie tylko szczęście, ale przede wszystkim wiedzę i technikę, aby uczestniczyć w procesie spełnienia marzeń o niewyczerpalnym źródle energii imitującym naturę gwiazd. Wielki fizyk rosyjski, Lew Arcymowicz, powiedział kiedyś: „Fuzja jądrowa zostanie opanowana dokładnie wtedy, kiedy będzie potrzebna ludzkości. W miarę tego, jak będą się wyczerpywać zasoby surowców energetycznych i będzie rosła presja na ochronę środowiska, fuzja stanie się coraz bardziej pożądana, a rządy skłonne do finansowania badań i rozwoju technologii.” Projekt ITER dowodzi, że miał rację.

„Nowoczesność budujemy na stuletniej tradycji energetyki Jaworzna.” Te słowa autorstwa wtedy jeszcze Dyrektora Jana Kurpa, pochodzą ze wstępu do folderu poświęconego Elektrowni „Jaworzno III”, wydanego w roku 1995. Dziś z powodzeniem wypełnia funkcję Prezesa Południowego Koncernu Energetycznego SA, jednego z największych w Polsce producentów energii elektrycznej i ciepłej. Trzeba podkreślić, że zaledwie 16 lat od światowej premiery swoją pierwszą elektrownię miało również Jaworzno. Także tutaj, w moim rodzinnym mieście, sto lat temu, skromnie i z niewielkim rozmachem przystąpiono do czynienia znaczących zmian w jakości ludzkiego życia. W 1898 roku, przy szybie „Rudolf” Jaworznickiego Gwarectwa zainstalowano dwa agregaty prądu stałego o łącznej mocy 320 kilowatów, co umożliwiło oświetlenie kopalni i pobliskich domów. W miarę upływu czasu wielkość i znaczenie jaworznickiej elektrowni były coraz większe. Zwiększało się też systematycznie zapotrzebowanie na energię elektryczną i ciepłą. Wierzę, że tak jak w przypadku Rudolfa, tak w niedalekiej przyszłości w Jaworznie stanie pierwsza elektrownia termojądrowa, przyczyniając się do jeszcze większego wzrostu znaczenia tego miasta na mapie Polski i Europy. Wierzę, że po raz kolejny energetyka pozwoli nam zjednoczyć siły dla naszej wspólnej sprawy.

Na koniec pragnę przytoczyć słowa Hymnu Energetyków:

*„Niech w dal popłynie świetlista moc
co daje siłę, rozjaśnia noc
W swej pracy twardej nie żałuj sił
Zapalmy słońca, by człowiek żył.”*