

*Monika Kubkowska**, *Paweł Gąsior**, *Aleksander Szalecki***

** Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy*

*** Stratego - Doradztwo Europejskie*

1. EKSPERTYZA W ZAKRESIE AKTUALNEGO STANU PRAWNEGO I POLITYCZNEGO DOTYCZĄCEGO BADANEGO OBSZARU FUZJI TERMOJĄDROWEJ

1.1. Wstęp

Jednym z filarów naszej cywilizacji jest rozwój gospodarczy i społeczny, któremu kształt nadała rozpoczęta na przełomie XVIII i XIX wieku Rewolucja Przemysłowa. To właśnie przejście od rzemieślniczego i manufakturowego wytwarzania dóbr do przemysłowej produkcji na masową skalę zapoczątkowało przemiany społeczne prowadzące do uformowania obecnej sytuacji politycznej i gospodarczej. Od tych decydujących czasów postęp naukowy i idący w ślad za nim rozwój wszelkich gałęzi przemysłu, począwszy od produkcji i usług, przez komunikację i transport do przemysłu rozrywkowego nabrał niespotykanego w historii tempa. W obecnej chwili nie jesteśmy w stanie wyobrazić sobie ludzkości pozbawionej naukowych i technicznych zdobyczy okresu nowożytnego.

Podstawowym motorem, a właściwie można powiedzieć kamieniem węgielnym Rewolucji Przemysłowej był wynalazek polegający na wykorzystaniu bogactw naturalnych takich jak węgiel i ropa naftowa jako źródła energii. Bez tej koncepcji nie powstałaby maszyna parowa, a w dalszej konsekwencji silniki spalinowy i elektryczny, które w efektywny sposób pozwoliły na zastąpienie pracy ludzkich mięśni energią uzyskiwaną ze spalania paliw oferowanych przez naturę.

Powszechność energii dzięki masowej produkcji uzyskiwanej w coraz tańszy sposób położyła podwaliny datowanej na drugą połowę XIX wieku drugiej Rewolucji Przemysłowej, w której ważną rolę odegrał rozwój nauki. To właśnie jej osiągnięcia zmieniły świat nie do poznania i umożliwiły szybki rozkwit rosnących jak „grzyby po deszczu” coraz to nowszych technologii stymulujących wynalazczość i przemysł jak w pętli dodatniego sprzężenia zwrotnego. Doprowadziło to do sytuacji, w której kształt świata zmieniał się w sposób niewyobrażalny już na przestrzeni życia jednego pokolenia. Wraz z tymi zmianami jak w kalejdoskopie zmieniała się polityczna mapa świata, czego gorzkim owocem były wojny światowe, ale również dzięki czemu wielu ludziom w niespotykanym dotąd stopniu poprawiły się warunki bytowe, a wiele narodów odzyskało niepodległość i wolność.

W obecnych czasach zdajemy sobie sprawę, że dobrodziejstwa paliw kopalnych nie są niewyczerpalne. Powszechność i taniość energii, która pozwoliła nam na tak wiele osiągnięć nie została nam dana na zawsze, a widmo jej braku lub ograniczonego dostępu kładzie się cieniem na prognozy dotyczące dalszego bytu cywilizacji. Zasoby węgla, ropy naftowej i gazu ziemnego oraz surowców dla elektrowni atomowych są ograniczone, a ilości energii oferowane przez źródła alternatywne (paliwa odnawialne, energia słoneczna, wiatrowa, wodna) niewystarczające do zaspokojenia wzrastającego światowego zapotrzebowania. O ile na chwilę obecną światowe zużycie energii ocenia się na ok. 10 gigaton ekwiwalentu ropy naftowej rocznie, o tyle przewidywane jest, że w roku 2050 będzie ono wynosić już ponad 20 Gigaton. Powodem tak dramatycznego wzrostu jest dynamiczny rozwój mniej uprzemysłowionych jak dotąd obszarów świata, między innymi Chin i Indii. Na tle tej sytuacji prognozy *US Geological Survey* wyglądają pesymistycznie – węgla ma starczyć na

co najwyżej 200 lat, a ropy naftowej i gazu ziemnego na odpowiednio 60 i 40 lat. W obliczu tych prognoz liczyć należy się również ze wzrostem cen energii i to już prawdopodobnie w relatywnie krótkiej perspektywie czasowej.

Przytoczone fakty wskazują, że chcąc zapewnić energetyczne bezpieczeństwo, nie możemy już opierać się na metodzie zwiększenia eksploatacji dotychczas wykorzystywanych źródeł nieodnawialnych, ponieważ może się to zakończyć katastrofą. Alternatywne źródła, mimo pewnych nadziei z nimi związanych w roku 2006 dostarczały zaledwie 18 % całkowitej użytkowanej energii, z czego znaczną część (ponad 80%) stanowiła energia uzyskana ze spalania biomasy. Przed energetycznym kryzysem uchronić nas może zatem jedynie opracowanie i doskonalenie nowych technologii, co często jest procesem długotrwałym i wymagającym wysokich inwestycji.

Technologią, której rozwój może zapewnić nam w przyszłości powszechność i taniść energii elektrycznej, lecz również niestety, jest trudny, długotrwały i kosztowny jest energetyka termojądrowa oparta na reakcji syntezy lekkich jąder atomowych. W obecnie opracowywanych rozwiązaniach paliwem są izotopy wodoru – deuter i tryt. Termojądrowy zapłon przeprowadzany jest w specjalnym reaktorze termojądrowym i polega na rozgrzaniu cząsteczek paliwa do temperatury rzędu kilkuset milionów stopni Kelwina. W przypadku deuteru i trytu produktem reakcji są neutrony oraz hel, a zatem nie są produkowane gazy cieplarniane. Dodatkowym atutem jest dostępność paliwa – deuter obecny jest w sposób naturalny w wodzie morskiej, a jego ilości szacuje się na wystarczające na wiele tysięcy, a może nawet milionów lat. Drugi z izotopów – tryt ma być wytwarzany już w samym reaktorze na skutek termojądrowych reakcji, będących produktem „spalania” paliwa neutronów i znajdującym się w płaszczu urządzenia litem, który również wydaje się być zasobem niewyczerpalnym.

Badania nad energetyką termojądrową zapoczątkowane zostały w czasie II Wojny Światowej, w 1940. Od początku budziła ona duże nadzieje, lecz napotkane trudności technologiczne wkrótce stały się powodem pierwszych rozczarowań. Pierwotnie spodziewano się, że do przeprowadzenia reakcji wystarczyć będzie uwięzienie plazmy wodorowej (czyli gorącego zjonizowanego gazu) i ogrzewanie jej prądem wzbudzonym na zasadzie analogicznej jak w transformatorze. Niestety, przyczynami trudności okazały się przede wszystkim niestabilności plazmy oraz jej oddziaływanie z materiałami skutkujące ich degradacją.

Niezrażeni niepowodzeniami naukowcy opracowywali jednak coraz to nowsze metody i budowali coraz większe reaktory wykorzystujące coraz to nowocześniejsze technologie. Mimo, że energia, która zostaje dostarczona do urządzenia w celu doprowadzenia do zapłonu reakcji termojądrowej nawet w obecnych eksperymentach jest mniejsza niż energia, którą można uzyskać z reakcji, dzięki temu wysiłkowi dla reaktorów z magnetycznym utrzymaniem plazmy, odkryte zostało tzw. prawo skalowania. Jest ono spełnione dla reaktorów opracowanych do tej pory i pozwala przypuszczać, że jeżeli zbudowany zostanie odpowiednio duży reaktor, synteza izotopów wodoru będzie w stanie dostarczyć nadwyżki energetycznej, czyli umożliwi skonstruowanie elektrowni. Do podobnych wniosków doszli również badacze zajmujący się innym sposobem przeprowadzania reakcji termojądrowej – za pomocą zogniskowanych wiązek laserowych. I w ich przypadku wydaje się, że urządzeniem zdolnym do wytworzenia nadwyżki energetycznej może być jedynie ogromny wielowiązkowy laser wielkiej mocy.

Należy uświadomić sobie, że inwestycja w tego typu duże urządzenia, jakkolwiek wydaje się konieczna, dla wielu inwestorów nie jest zadaniem kuszącym głównie ze względu na olbrzymie koszty, które mogą się zwrócić jedynie w bardzo odległej perspektywie czasowej. W świetle tym, ważne było powołanie odpowiednich organizacji i struktur stawiających sobie za cel pracę nad rozwojem tej dziedziny technologii. Z tego

punktu widzenia wskazanym jest by zaangażowały się w nią podmioty najbardziej odpowiedzialne, których perspektywy planowania uwzględniają nie tylko najbliższe lata czy choćby dziesięciolecia, lecz podtrzymanie zdobyczy cywilizacyjnych również w odległej przyszłości.

Uwzględniając powyższe rozważania staje się jasnym, że nie jest celowe ani wskazane, by ciężar badań i inwestycji na polu energetyki termojądrowej był dźwigany indywidualnie przez pojedyncze państwa lub organizacje, lecz powinien powstawać przy międzynarodowej współpracy gwarantującej zarówno powszechny udział w kosztach jak i w przyszłości w dobrodziejstwach sfinalizowanego projektu.

Międzynarodowa współpraca w jakimkolwiek przedsięwzięciu kształtowana jest przez czynniki polityczne, ekonomiczne, społeczne i technologiczne właściwe dla krajów w niej uczestniczących. Aby do niej przystąpić kraje muszą zdawać sobie sprawę z politycznych korzyści jakie mogą osiągnąć kosztem poświęcenia pewnej ilości środków ekonomicznych. Muszą również liczyć się z opinią społeczną na temat przedsięwzięcia, a ona również bywa kształtowana przez czynniki polityczne. Przystępując zatem do współpracy przeprowadzić należy bilans kosztów i oczekiwanych korzyści, należy również zdać sobie sprawę co można zaoferować w dziedzinach finansowych, kadrowych oraz technologicznych.

W przypadku prac nad energetyką termojądrową szeroko pojęty cel polityczny wydaje się dość oczywisty. Zapewnienie dostaw powszechnie dostępnej i niedrogiej energii elektrycznej jest obecnie jedną z podstaw bytu i porządku społecznego we wszystkich niemal krajach świata i żaden z nich nie chciałby być w tej dziedzinie całkowicie uzależniony od innych. Mniej oczywiste jest jednak rozłożenie nakładów pracy i środków pomiędzy poszczególnymi współpracownikami z uwagi na oczywiste zróżnicowanie gospodarcze na politycznej mapie świata. Niemniej trudnym i również w znacznym stopniu związanym zarówno z polityką, jak i ekonomią zadaniem jest rozplanowanie infrastruktury badawczej, to znaczy lokalizacja reaktorów, rozdzielenie funduszy przeznaczonych na badania pomiędzy poszczególnych uczestniczących w nim członków, organizacja kierownictwa struktury czy też ustalenie (lub nie) proporcji ilości zatrudniania kadry z poszczególnych krajów.

Niebanalny wpływ na współpracę ma również sytuacja prawna na terenie państw uczestników. Legislatura niejako narzuca strukturę organizacji, która musi funkcjonować jako podmiot prawa międzynarodowego oraz reguluje formę i zakres działań podejmowanych przez współpracowników w ramach wspólnego projektu. Przepisy prawa muszą określać sposoby i zakres dofinansowania prowadzonych prac, regulować zasady uczestnictwa w eksperymentach prowadzonych przez naukowców w krajach innych niż macierzyste oraz czuwać nad legalnością wszystkich prowadzonych działań takich jak uzyskiwanie zezwoleń na tworzenie infrastruktury, prowadzenie przetargów czy nabywanie i współużytkowanie aparatury badawczej. Należy również pamiętać, że przestrzeganie norm związanych z przepisami bezpieczeństwa dyktowanych wykorzystywaniem materiałów uważanych za szkodliwe dla zdrowia oraz radioaktywnych leży również w gestii prawnej.

Obecna sytuacja polityczno-gospodarcza świata na skutek ogromnej złożoności i zaawansowania jest bardzo skomplikowana, zatem przedstawione aspekty współpracy w wysokim stopniu wiążą się i wpływają nawzajem. Zakres działań politycznych i prawnych w dużej mierze wiąże się z sytuacją społeczną, która z kolei w sposób istotny uwarunkowana jest względami ekonomicznymi. Na warunki ekonomiczne ma natomiast wpływ stan rozwoju technologicznego powiązane z nakładami na edukację w danym kraju.

Wszystkie wymienione wyżej uwarunkowania dotyczą również Polski, która będąc krajem czterdziestomilionowym i ważnym członkiem Unii Europejskiej, powinna uczestniczyć i uczestniczy w projektach związanych z energetyką termojądrową. Jakkolwiek celowość uczestnictwa nie podlega raczej dyskusji, warto zastanowić się nad zakresem działań i nakładem środków, jakie nasz kraj powinien na te cele przeznaczyć. Obok

niezależności energetycznej, która jest sama w sobie bardzo istotnym celem, nasz kraj dzięki uczestnictwu w programach termojądrowych może uzyskać dofinansowanie do prowadzonych badań oraz dostęp do rynków zbytu dla towarów i usług polskich firm mogących znaleźć swoje nisze w przemyśle związanym z konstrukcją reaktorów termojądrowych. W tym momencie zwrócić należy uwagę na interdyscyplinarność tych badań i duże potrzeby przemysłowe z nimi związane. Projekt prowadzony na tak dużą skalę wymaga zastosowania szerokiego wachlarza technologii i to nie tylko takich, które są niezwykle drogie, kosztowne i dostępne jedynie niewielkiej ilości wyspecjalizowanych firm, lecz również znacznie prostszych i tańszych, ale wymagających bardzo dobrej znajomości np. informatyki, elektroniki czy automatyki. Przy wdrażaniu tych technologii, polskie firmy jeżeli byłyby świadome zapotrzebowania i wspierane odpowiednimi działaniami organizacyjnymi, mogłyby osiągnąć nieocenione korzyści. Podstawą więc do oceny optymalnego zaangażowania Polski w badania i projekty związane z energetyką termojądrową powinna być analiza sytuacji polityczno-ekonomiczno-społeczno-technologicznej i prawnej w dziedzinie badań nad energetyką termojądrową w Polsce na tle podobnej sytuacji w Europie i na świecie. Taka właśnie analiza jest celem niniejszego opracowania.

Jako autorzy mamy nadzieję, że przedstawione przez nas opracowanie przygotowane w ramach programu *Foresight* dla Energetyki Termojądrowej pozwoli na podejmowanie trafnych decyzji dotyczących zaangażowania polskich środków w tę dziedzinę nauki i technologii. Wierzymy, że dostarczy ona odpowiedzi na wiele pytań związanych z rozwojem energetyki w Polsce i pozwoli na wytyczenie kierunków działań mających na celu koordynację nauki i przemysłu w celu osiągnięcia wspólnych korzyści, z których najistotniejszym wydaje się zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego dla naszego państwa.

1.2. Rys historyczny badań nad energetyką termojądrową na tle rozwoju polityczno-ekonomiczno-społeczno-technologicznego na świecie

Głównym zadaniem stojącym przed naukowcami rozwijającej się cywilizacji jest opracowanie technologii zapewniających odpowiednią ilość energii. Wraz z postępem wielu dziedzin życia, którym kształt nadały właśnie osiągnięcia nauki i techniki jasnym stało się, że zapewnienie dostatecznych ilości energii jest kluczowe nie tyle nawet dla dalszego rozwoju naszej cywilizacji jak i dla uchronienia nas przed klęską regresji.

Począwszy od pojawienia się na świecie człowieka, ludzie dążyli do pozyskiwania i kontrolowania różnych źródeł energii. Jednym z pierwszych źródeł energii był ogień, wykorzystywany do ogrzewania, oświetlania czy przygotowywania posiłków. Z czasem ludzie zaczęli wykorzystywać energię wiatru, najpierw do napędu statków, później budując wiatraki do pompowania wody. Z biegiem lat najbardziej powszechnym surowcem z paliw kopalnych okazał się węgiel. Wynalezienie w 1712 r. przez Thomasa Newcomena atmosferycznego silnika parowego, a następnie ulepszenie maszyny przez Jamesa Watta w 1765 r. zdecydowanie wpłynęło na zwiększenie zapotrzebowania na węgiel. Maszyna parowa stała się mobilnym źródłem energii, co znalazło zastosowanie w lokomotywach, dokonując prawdziwej rewolucji w transporcie lądowym. Kolejnym krokiem w rozwoju energetyki była budowa przez Alessandro Volta w 1800 r. ogniwa galwanicznego, które stało się pierwszym źródłem energii elektrycznej. 80-dziesiąt lat później zaczęła działać pierwsza elektrownia, której twórcą był Thomas Edison. Rozpoczęte w 1859 r. w Pensylwanii w Stanach Zjednoczonych wydobywanie ropy naftowej przyczyniło się do skonstruowania przez Lenoira Étienne pierwszego silnika spalinowego. W kolejnych latach Carl Benz zastosował silnik spalinowo-benzynowy do budowy pierwszego samochodu. Na początku XX wieku bracia Orville i Wilbur Wright zastosowali silnik spalinowy w maszynie latającej, dając w ten sposób początek pierwszym samolotom. Ważnym przełomem w rozwoju energetyki było

opublikowanie 1905 r. przez Alberta Einsteina teorii względności, która stała się poniekąd prowodyrem chęci opanowania energetyki jądrowej.

Wraz z odkrywaniem nowych źródeł energii pojawiały się i nowe problemy. Pierwszy kryzys energetyczny miał miejsce w 1973 r. i objął wszystkie kraje wysoko uprzemysłowione i uzależnione od ropy naftowej, jak również wszystkie dziedziny gospodarki światowej. Po wybuchu wojny izraelsko-arabskiej arabscy członkowie OPEC (główni dostawcy) zdecydowali wstrzymać handel ropą naftową z krajami popierającymi Izrael, a mianowicie Stanami Zjednoczonymi i krajami Europy Zachodniej. Sytuacja ta ukazała słabość wysokorozwiniętych państw związaną z brakami paliwowo-energetycznymi. W późniejszych latach rozpoczęto eksploatację bogatych złóż ropy z dna Morza Północnego i na Alasce, co zmniejszyło zależność krajów zachodu od dostaw ropy z OPEC. Kryzys naftowy zapoczątkował i doprowadził do poszukiwania innych, nowych alternatywnych źródeł energii.

W obecnych czasach za popytem na surowce energetyczne nie nadąża podaż, a świadomość, że po woli kończą się zasoby tych surowców, powoduje ogólny trąd wzrostowy ich cen. Ważnym wyzwaniem dla Europy i całego świata w nadchodzących czasach stanie się zapewnienie energii dla przyszłych pokoleń. Według prognoz Unii Europejskiej udział odnawialnych źródeł energii w 2010 r. wyniesie 12 %, natomiast dla produkcji energii elektrycznej udział ten wyniesie 22 %. Główne źródła energii, takie jak ropa naftowa i gaz stopniowo wyczerpują się, a co za tym idzie stają się coraz droższe, jednocześnie przyczyniając się do nadmiernej emisji gazów, co powoduje efekt cieplarniany, a więc globalne ocieplenie Ziemi. Wszystkie te czynniki wpływają na fakt, że niezbędna jest redukcja ilości otrzymywanej energii pochodzącej ze spalania. W celu zaspokojenia potrzeb energetycznych społeczeństwa w przyszłości, niezbędne jest wykorzystywanie wielu różnych źródeł energii, w tym i odnawialnej. Przede wszystkim konieczne jest opanowanie nowych źródeł energii, które będą w stanie zapewnić ciągłe dostawy energii przez długi okres czasu i jednocześnie byłyby przyjazne dla człowieka i nie zanieczyszczałyby środowiska naturalnego. Bezdyskusyjnie warunek ten spełniają odnawialne źródła energii, jednak te są w stanie pokryć tylko ok. 30 % wszystkich potrzeb energetycznych świata.

W zaistniałej sytuacji wielkim dobrodziejstwem rozwoju nauki stała się możliwość zbudowania reaktora jądrowego, w którym energia produkowana jest dzięki zjawisku rozszczepienia atomu. Nowoczesne elektrownie tego typu wymagają paliwa i to dużo rzadziej spotykanego w przyrodzie niż węgiel, ropa czy gaz. Jeżeli złoża uranu, a w przyszłości toru będą eksploatowane wystarczająco intensywnie również i ich nie starczy nam na długo. Poza tym, w opinii publicznej zbyt mocno pokutuje zbudowane na bombach atomowych i katastrofie w Czarnobylu przeświadczenie o zagrożeniach związanych z energetyką jądrową, by tego typu elektrownie mogły uzyskać powszechną akceptację.

Wydaje się, że obecnie tylko jedna technologia jest w stanie spełnić te wymogi, co i tak możemy uznać za niezwykle pomyślne zrządzenie losu. Technologia ta opiera się na wykorzystaniu termojądrowej syntezy do produkowania olbrzymich ilości energii z bardzo małych ilości paliwa. Obecnie najbardziej odpowiednią reakcją termojądrową wydaje się reakcja deuteru i trytu, do której przeprowadzenia wymagana jest temperatura znacznie przekraczająca temperaturę panującą wewnątrz gwiazdowego jądra, jednak dzięki temu reakcja przebiega szybko i jest w stanie dostarczyć odpowiednią ilość mocy.

W 1920 r. Arthur Stanley Eddington jako pierwszy wysunął hipotezę, że reakcją odpowiedzialną za wytwarzanie ogromnej ilości energii na Słońcu jest reakcja termojądrowa, czyli produkcja cięższych pierwiastków poprzez fuzję lżejszych. Na Ziemi trudno jest stworzyć stabilne warunki, takie jakie panują na Słońcu, niemniej jednak docelową temperaturę zjonizowanego gazu, zwanego plazmą, można osiągnąć m.in. zamykając gaz w pułapce magnetycznej w urządzeniu typu tokamak (koncepcja Igora Tamma i Andrieja

Sacharowa) lub stellarator (konceptcja Lymana Spitzera). Ważną rolę odegrały tu również badania nad fuzją laserową. W latach 60-tych ubiegłego wieku, jako pierwsi na zastosowanie laserów do nagrzewania plazmy w bardzo krótkim czasie, zwrócili uwagę Nikołaj Basow i John Dawson. Początkowo badania nad urządzeniami do kontrolowanej syntezy termojądrowej prowadzone były w wielkiej tajemnicy, gdyż wojsko miało nadzieję, że będą one mogły posłużyć do celów militarnych, np. do produkcji ładunków jądrowych. Podstawowy problem jaki się wówczas pojawił, wynikający głównie z braku dobrych modeli teoretycznych, to utrzymanie plazmy przez dłuższy czas termojądrowej. Ponadto, brak spektakularnych osiągnięć w drugiej połowie XX wieku w dziedzinie badań nad syntezą termojądrową, wpłynął na ograniczenie finansowania tych badań. Pomimo tego, eksperymenty przeprowadzone w latach osiemdziesiątych dowiodły, że mimo użyteczności badań podjętych na małych tokamakach, w celu uzyskania dodatniego bilansu mocy, konieczne jest zbudowanie znacznie większego reaktora. W 1988 roku na spotkaniu w Genewie Michaił Gorbaczow zaproponował prezydentom Stanów Zjednoczonych i Francji ideę wykorzystania technologii termojądrowej w celach pokojowych we wspólnym przedsięwzięciu wybudowania reaktora ITER. W obecnej chwili śmiało można powiedzieć, że ludzkość jest bardzo blisko ujarznienia niewyczerpalnego źródła energii, niemniej jednak trudno jest określić termin uruchomienia pierwszego reaktora termojądrowego. Z ekonomicznego punktu widzenia efektywność elektrowni tego typu jest lepsza wraz z wielkością jej mocy. Szacuje się, że budowa elektrowni o mocy 1GW będzie już opłacalna, natomiast energia pochodząca z elektrowni o mocy dwa razy większej (2GW) będzie o 25 % tańsza.

Odpowiednikiem programu ITER w dziedzinie fuzji laserowej jest obecnie projekt HIPER, którego celem jest również uzyskanie dodatniego bilansu energetycznego przy użyciu układu laserów wielkiej mocy. Ten nowoczesny system laserowy obok wykorzystania go do sprawdzenia wydajności syntezy inercyjnej, będzie miał także zastosowanie do badań oddziaływań intensywnego promieniowania laserowego z materią w ważnych dziedzinach nauki i techniki, takich jak: fizyka relatywistyczna, fizyka materii w stanach ekstremalnych, astrofizyka, terapia nowotworowa i inne.

1.3. Rozwój badań nad praktycznym wykorzystaniem zjawiska syntezy termojądrowej

Odkrycie istoty reakcji fuzji nastąpiło na początku XX wieku i związane było ściśle z rozwojem fizyki atomowej. Początkowo wiedza o reakcji termojądrowej sprowadzała się do stwierdzenia, że procesy syntezy są źródłem energii Słońca, czy innych gwiazd, przy czym szczegóły były wciąż nieznane. Rolę reakcji syntezy dla Słońca jako pierwszy opisał Hans Bethe w publikacji w *Physical Review* w 1939 r., za co w 1967 r. otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki. Zaprezentował on 6 reakcji termojądrowych wykorzystujących wodór, węgiel, azot i tlen. Dodatkowo przedstawił on swój pogląd, jakoby reakcje te miały być źródłem energii Słońca.

Początkowo naukowcy podchodzili do zjawiska syntezy termojądrowej bardzo sceptycznie, gdyż w owych czasach przeprowadzenie takiej reakcji na Ziemi wydawało się nie możliwe. Rozwój badań nad pokojowym wykorzystaniem energii jądrowej wiąże się z powstaniem 29 lipca 1957 r. Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (MAEA), której jednym z zadań było zapobieganie sytuacjom, w których państwa uzyskują dostęp do materiałów rozczepianych, wykorzystując je następnie do celów militarnych.

Tak jak nieoczekiwanie szybko udało się naukowcom opanować technologie rozszczepienia jądra atomowego, tak znalezienie praktycznego zastosowania reakcji syntezy w procesie produkcji niewyczerpalnego źródła energii okazało się bardzo czasochłonne. Badania nad energetyką w Unii Europejskiej prowadzone są od lat 60-tych XX w.,

początkowo na mocy traktatów ustanawiających Europejską Wspólnotę Węgla i Stali oraz EURATOM, a następnie poprzez kolejne badawcze programy ramowe. Działania te wspólnie z programami krajowymi doprowadziły na przestrzeni lat do znacznego postępu w dziedzinie wydajnych technologii energetycznych.

W Europie w Wielkiej Brytanii większość wcześniejszych prac nad fuzją było podejmowane na uniwersytetach, głównie w *Imperial College* w Londynie pod kierunkiem Sir George'a Thomson'a oraz w Oxfordzie w grupie Peter'a Thonemann'a. W 1952 r. dwaj angielscy naukowcy Cousins i Ware zbudowali małe urządzenie toroidalne typu *pinch*. Dużo większe urządzenie do przeprowadzania eksperymentów w dziedzinie fuzji termojądrowej powstało w 1954 r. w Harwel i nosiło nazwę *Zero Energy Toroidal Assembly* (ZETA). Urządzenie to pracowało przez 4 kolejne lata dając dosyć ciekawe rezultaty.

Na początku tzw. okresu zimnej wojny badania plazmy skupiały się głównie na modelowaniu zjawisk zachodzących w przestrzeni kosmicznej, m.in. loty pocisków balistycznych były symulowane przez elektromagnetyczne generatory fal uderzeniowych w plazmie. Koncepcje urządzeń do kontrolowanej reakcji termojądrowej pojawiły się na początku lat 50-tych XX w. Pomysł Igora Tamma i Andrieja Sacharowa polegał na zamknięciu sznura plazmy w zamkniętej pułapce magnetycznej w kształcie torusa, w którym płynący prąd miałby ogrzewać plazmę. Koncepcja tego urządzenia zwanego tokamakiem (od *Toroidalnaja Kamiera s Magnitnymi Katuszkami*) była alternatywą dla stellaratora (z łac. *Stella* - gwiazda), który też był (jest) swojego rodzaju pułapką magnetyczną jednak o nieco innym kształcie. Budowa tego urządzenia została wymyślona przez Lymana Spitzera, a następnie w 1951 r. w *Princeton Plasma Physics Laboratory* wybudowano pierwsze tego typu urządzenie. Początkowo w obliczu zimnej wojny prace w poszczególnych krajach objęte były ścisłą tajemnicą. Zmiana nastąpiła w 1956 r. w momencie wizyty Nikity Chruszczowa i Nikołaja Bulganina w Wielkiej Brytanii w celu rozpoczęcia współpracy międzynarodowej. Wówczas Igor Kurczatow wygłosił wykład „*The Possibility of Producing Thermonuclear Reactions in a Gas Discharge*”, co zapoczątkowało wspólną wymianę doświadczeń w dziedzinie kontrolowanej syntezy termojądrowej.

Badania w tej dziedzinie rozpoczęły się w laboratoriach na całym świecie, jednak początek wyścigu do opanowania kontrolowanej reakcji termojądrowej nastąpił oficjalnie na konferencji „Atom dla pokoju”, która miała miejsce 1958 r. w Genewie. Pierwszy tokamak powstał jeszcze w 1956 r. w Instytucie Energii Atomowej w Moskwie. W 1968 r. świat obiegła informacja, że Rosjanom na tokamaku T3 udało się uzyskać temperaturę plazmy wysokości ponad 10 mln stopni Celsjusza. Wraz z czasem pojawiały się nowe problemy, m.in. zanieczyszczenia w plazmie. W latach 80-tych na świecie powstały cztery ogromne układy doświadczalne: w 1982 r. TFTR (*Tokamak Fusion Test Reactor*) w Princeton w Stanach Zjednoczonych, w 1983 r. JET (*Joint European Torus*) w Culham w Wielkiej Brytanii, w 1985 r. JT-60 w Naka w Japonii (w 1991r. przebudowany na JT-60U) oraz T15 w Moskwie. Ostatnie urządzenie, które planowo miało być pierwszym, do dzisiejszych czasów stoi nieużywane. Celem wybudowanych układów miało być uzyskanie tyle samo energii ile zostało do niego włożone, ale bez uwzględniania niskiej sprawności procesów grzania plazmy (tzw. *breakeven*). Warunki takie udało się uzyskać po raz pierwszy w 1991 r. na tokamaku JET (później jeszcze dwukrotnie w 1997 r.), natomiast w 1996 r. na JT-60U. Wcześniej w 1994 r. na TFTR pod presją zbliżającego się zamknięcia instalacji i na tym układzie udało się uzyskać znaczące wyniki.

Największym układem do przeprowadzania badań nad kontrolowaną reakcją termojądrową jest układ JET. Wyniki naukowe uzyskiwane na tym tokamaku oraz wsparcie polityczne Brukseli i wspólnoty EURATOM sprawiły, że stał się on światowym liderem wśród innych urządzeń.

Badania przeprowadzone na przestrzeni lat pokazały, że uzyskanie samopodtrzymującej się reakcji jest możliwe, niemniej jednak należy stworzyć urządzenie dużo większe i bardziej złożone technologicznie niż JET. Głównie za względów finansowych realna wydawała się budowa na świecie jednego wspólnego układu międzynarodowego. Tak narodził się projekt ITER (*International Thermonuclear Experimental Reaktor*). 28 czerwca 2006 r. zapadła decyzja o lokalizacji tego Międzynarodowego Eksperymentalnego Reaktora Termojądrowego w miejscowości Cadarache, w pobliżu Marsylii na południu Francji. W całym przedsięwzięciu poza krajami Unii Europejskiej, biorą także udział Stany Zjednoczone, Japonia, Korea Południowa, Rosja i Chiny.

Inny sposób osiągnięcia syntezy termojądrowej zasugerowali w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku naukowcy Nikołaj Basow i John Dawson., którzy zwrócili uwagę, na wykorzystanie laserów do podgrzewania plazmy w bardzo krótkim czasie. Pierwszy raz tzw. mikrosyntezy dokonano w 1970 r. w Związku Radzieckim. Energia z tego typu reakcji laserowej (z ang. ICF – *Inertial Confinement Fusion*) wyzwalana jest poprzez zogniskowanie na celu (targecie) zawierającym paliwo termojądrowe wiązek laserów impulsowych o bardzo dużej mocy. W Stanach Zjednoczonych, we Francji i w ZSRR badania nad tego typu syntezą termojądrową początkowo prowadzone były w utajnieniu ze względu na możliwość wykorzystania ich do celów militarnych. Istotnym wydarzeniem w rozwoju badań nad pokojowym wykorzystaniem tego typu energii było zaproponowanie zastosowania tzw. szybkiego zapłonu paliwa deuterowo-trytowego sferycznie skompresowanego impulsem laserowym. Metoda ta polega na nielokalnym zapłonie wstępnie skompresowanej plazmy deuterowo-trytowej, jeszcze przed rozwinięciem się niestabilności hydrodynamicznych, przez dodatkowe dostarczenie energii za pomocą impulsu innego lasera wielkiej mocy bądź też impulsu szybkich elektronów lub jonów przyspieszanych takim laserem. Idea laserowej syntezy termojądrowej przez wiele lat była intensywnie rozwijana i obecnie stała się podstawą projektów wielkich instalacji laserowych w Unii Europejskiej - projekt HiPER, w Japonii - projekt FIREX 2 (*Fast Ignition Realization Experiment*) i w Stanach Zjednoczonych - projekty Omega EP (*extended performance*) i NIF (*National Ignitron Facility*).

Programy mające na celu poznanie i zbadanie nowego źródła energii bezpiecznej dla świata wykorzystującego energię syntezy termojądrowej w układach z magnetycznym utrzymaniem plazmy, bądź też wykorzystującego lasery dla efektywnej produkcji energii termojądrowej, powinny być jednym ze strategicznych obszarów działań w najbliższej przyszłości. Nie należy zapominać również o uczestnictwie polskich ośrodków badawczych w tych programach, które powinny być traktowane priorytetowo.

W Polsce badania nad pokojowym wykorzystaniem energii termojądrowej nabrały tempa od 2004 r., kiedy to nasz kraj przystąpił do Europejskiej Wspólnoty Energii Atomowej – EURATOM. Powstanie polskiej Asocjacji EURATOM dało nam wiele możliwości, m.in. dzięki wielu przedsięwzięciom takim jak porozumienie o wspólnej eksploatacji tokamaka JET, porozumienie o wymianie kadry naukowej (*Mobility Agreement*) czy Europejskie Porozumienie Rozwoju Syntezy Termojądrowej. Dzięki zaangażowaniu polskich naukowców w międzynarodowe projekty fuzyjne, nasz kraj uczestniczy również w dość młodym projekcie HIPER, mającym na celu zademonstrowanie efektywności syntezy laserowej w skali czasowej podobnej do uruchomienia wielkiego międzynarodowego tokamaka ITER. Oficjalnie faza przygotowawcza (*Preparatory Phase*) projektu HIPER rozpoczęła się 28 kwietnia 2008 r. i ma potrwać 3 lata. Celem tej fazy jest rozwiązanie spraw finansowych, prawnych i strategicznych równoległe ze zminimalizowaniem ryzyka technicznego programu, w taki sposób, aby umożliwić w przyszłości przejście do fazy konstrukcyjnej całego układu laserowego.

1.4. Narodziny projektu ITER jako początek międzynarodowej współpracy. Geneza i skutki uruchomienia projektu

W drugiej połowie XX wieku wielu naukowców po doświadczeniach z projektem Manhattan stało się zwolennikami zaprzestania prób jądrowych. Część z nich była za wykorzystaniem energii nuklearnej do produkcji energii elektrycznej. W latach 70-tych minionego wieku największe mocarstwa światowej nauki rozpoczęły budowę układów nowej generacji - tokamaków. I tak w Stanach Zjednoczonych w 1982 r. w Princeton powstał TFTR (*Toroidal Fusion Thermonuclear Reaktor*), w 1983 r. w Anglii w Culham niedaleko Oxfordu powstał JET (*Join European Torus*), a w 1985 r. w Naka w Japonii zostaje uruchomiony JT-60 (przebudowany w 1991 r. na JT-60U). W 1988 r. ukończono również budowę urządzenia T15 w Moskwie, jednak nigdy nie zostało ono uruchomione.

Doświadczenia zdobyte na przestrzeni lat przez naukowców pracujących nad fuzją termojądrową, doprowadziły do wniosku, że uzyskanie samopodtrzymującej się reakcji syntezy, byłoby możliwe tylko przy wykorzystaniu bardzo złożonego technicznie układu. Wkład finansowy potrzebny na budowę takiego układu, nie wystarczyłby ze środków jednego państwa. W ten sposób narodził się projekt, który stał się największym od czasów Projektu Manhattan przedsięwzięciem naukowym atomistyki – projekt ITER (z łac. droga) (*International Thermonuclear Experimental Reactor*).

W listopadzie 1985 r. na szczycie „supermocarstw” w Genewie przedstawiciele Francji – Francois Mitterand, Wielkiej Brytanii – Margaret Thatcher, Związku Radzieckiego – Michaił Gorbaczow oraz ówczesny prezydent Stanów Zjednoczonych Ronald Reagan podjęli decyzje o podjęciu wspólnego międzynarodowego projektu dotyczącego budowy eksperymentalnego reaktora termojądrowego. Założenia projektu ITER powstały już w 1987 r. W kolejnych latach do porozumienia dołączały następne państwa, w 1988 Japonia i Unia Europejska, w 2003 Chiny i Korea Południowa, a w 2005 Indie. Wcześniej stroną porozumienia stała się także Kanada. W 1998 r. Kongres Stanów Zjednoczonych uznał projekt ITER za zbyt kosztowny i administracja, wtedy Billa Clintona postanowiła wycofać się z porozumienia. Jednak już w 2003 r. za prezydentury Geорга W. Busha USA ponownie przystąpiły do programu, tłumacząc, że synteza termojądrowa jest istotnym elementem długofalowego planu podwyższania bezpieczeństwa energetycznego kraju.

Kolejnym etapem projektu ITER było ustalenie lokalizacji eksperymentalnego reaktora termojądrowego. Został ogłoszony konkurs na miejsce budowy ITERa, do którego zgłoszono cztery oferty:

- Cadarache, w prowincji Aix-en-Provence niedaleko Marsylii, Francja,
- Clarington pod Toronto, Kanada,
- Rokkasho-mura, Japonia,
- Vandellos koło Barcelony, Katalonia, Hiszpania.

Oferta hiszpańska ostatecznie została wycofana, gdyż Komisja Europejska podjęła decyzje o przedstawieniu jednej lokalizacji jako propozycji Unii. Propozycja kanadyjska natomiast od początku nie miała możliwości przebiccia, gdyż Kanada nie miała doświadczenia w badaniach nad tokamakami i ostatecznie przed rozstrzygnięciem konkursu wycofała swoją ofertę, a w połowie 2004 r. zrezygnowała w ogóle z udziału w projekcie.

16 grudnia 2003 r. w Waszyngtonie odbyło się spotkanie, które miało doprowadzić do wyboru lokalizacji układu ITER. Początkowo Stany Zjednoczone popierały ofertę Hiszpanii, jako sojusznika z Iraku, jednak po deklaracji Unii Europejskiej co do wyboru Cadarache jako miejsca lokalizacji reaktora, swoje poparcie skierowały w stronę Japonii. Rokkasho-mura wraz za Amerykanami poparła również Korea Południowa. Ponieważ ofertę Francji popierały poza Unią – Rosja i Chiny, ostatecznie spotkanie w Waszyngtonie nie doprowadziło do

wyboru lokalizacji ITERa, a strony uzgodniły, że decyzję należy podjąć najpóźniej do połowy lutego 2004 r. na drodze konsensusu.

I tak do wyboru pozostały dwa miejsca: Cadarache i Rokkasho-mura. Wybór Japończyków nie był prosty. Początkowo rozważali oni trzy miejsca: Tomakomai położone na wyspie Hokkaido, Nakamachi w prefekturze Ibaraki oraz Rokkasho-murę w prefekturze Aomori. Ze względu na najniższą aktywność sejsmiczną, ostatecznie zdecydowano się na tą ostatnią propozycję. Rokkasho-mur położone jest 600 km na północ od Tokio, w tamtejszych czasach zlokalizowane było w sąsiedztwie nowo budowanego zakładu przeróbki paliwa jądrowego. Z kolei za wyborem Francuzów przemawiała okolica Cadarache, w której ulokowane były już rządowe ośrodki nuklearne, co pociągało za sobą spore zaplecze naukowe. Poza tym sama lokalizacja geograficzna (niedaleko port w Marsylii), jak i klimat działał tu na korzyść Francji.

Wybór wydawał się prosty, jednak został on poniekąd przekształcony w walkę Amerykanów z Francuzami za to, że Ci ostatni byli przeciwni wojnie w Iraku. Stąd wynikało poparcie Stanów Zjednoczonych dla Japonii, pomimo że prywatnie wielu amerykańskich naukowców było za lokalizacją urządzenia w Europie. Zaplanowany zarówno przez Japonię jak i Stany Zjednoczone budżet na 2004 r. przewidywał już finansowanie projektu ITER. USA w zamian za swój wkład finansowy zażądała proporcjonalnego udziału amerykańskiej technologii w projekt. Chciały również, aby zdjąć z nich odpowiedzialność w razie wzrostu kosztów produkcji w przypadku pozostałych stron porozumienia, jednocześnie chcąc mieć dostęp do wszelkich danych powstałych w ramach projektu. Zrozumiałe było żądanie zapewnienia amerykańskim naukowcom prowadzenia badań proporcjonalnych do udziału USA w projekcie. O wysokości środków finansowych przeznaczanych przez Stany Zjednoczone na ITER decydował Kongres. Równie istotnym dla USA przedsięwzięciem był wówczas krajowy projekt FIRE (*Fusion Ignition Research Experiment*).

Początek 2004 r. to ciągle przekonywanie i przeciąganie członków porozumienia, co do wyboru lokalizacji budowy ITERa. Japonia starała się przekonać do swojej lokalizacji Rosję, wysyłając tam na początku roku swojego ówczesnego ministra nauki i techniki Takeo Kawamurę. Ten jednak wyjechał z Moskwy bez rezultatów, udając się tym razem do Chin. Chiny z kolei były zachęcane przez prezydenta Francji Jacquesa Chiraca, zniesieniem embarga nałożonego w 1989 r. po masakrze na Placu Tiananmen. Z kolei sekretarz stanu USA Colin Powell dawał do zrozumienia Chinom, aby nie wierzyły Francuzom w każde ich słowa. Przełomem w „sporze” była wypowiedź francuskiego premiera Jeana-Pierrea Raffarina, który stwierdził, że Unia Europejska powinna zainicjować projekt nawet i bez poparcia Stanów Zjednoczonych, ogłaszając jednocześnie, że jest w posiadaniu zarówno odpowiedniej ilości środków finansowych, jak i odpowiedniego zaplecza naukowego, aby podjąć projekt niezależnie. Zgodnie z ustaleniami około połowy kosztów budowy mieliby ponieść gospodarze, także pozostanie USA poza porozumieniem nie wiele by zmieniło, gdyż i tak kraj ten wniósłby zaledwie kilkanaście procent wartości całego przedsięwzięcia.

W lutym 2004 r. w Wiedniu w celu podjęcia ostatecznej decyzji co do lokalizacji urządzenia zebrała się Rada ITERa, jednak i wtedy nie doszło do porozumienia. Trzeba było czekać ponad rok, aby 28 czerwca 2005 r. dowiedzieć się, że ITER wybudowany zostanie we Francji w Cadarache. Nieoficjalnie mówi się, że do porozumienia, co do wyboru lokalizacji doszło po tym, jak Europa zmieniła swoje stanowisko w sprawie Iraku i USA wycofało się z popierania Rokkasho-mura. Z drugiej strony warunki komunikacyjne, rozbudowana infrastruktura istniejącego w okolicy Cadarache ośrodka, w którym działał już reaktor Tore-Supra oraz (jeśli nie przede wszystkim) bezpieczeństwo sejsmiczne zdecydowanie od samego początku przemawiały za tą lokalizacją. W ramach „rekompensaty” Japończykom obiecano, że 20% personelu ośrodka pochodzić będzie z Kraju Kwitnącej Wiśni i że to oni będą mieli prawo do zgłaszania Głównego Dyrektora projektu.

21 listopada 2006 r. na zaproszenia prezydenta Francji Jacquesa Chiraca do Paryża przyjechali przedstawiciele wszystkich rządów chcących finansować budowę i eksploatację reaktora ITER. Na spotkaniu obecni byli także szef Komisji Europejskiej José Manuel Barroso oraz unijny komisarz do spraw nauki Janez Pomočnik, gdyż to właśnie państwa Unii zobowiązały się do pokrycia znacznych kosztów budowy tego urządzenia. W 2008 r. ruszyła budowa ITERa. Obecnie w projekcie obok Unii Europejskiej, Stanów Zjednoczonych, Rosji i Japonii w projekt zaangażowane są Chiny, Korea oraz Indie. Budżet projektu szacowany jest na 15 mld Euro (10 mld na budowę, a następne 5 mld na eksploatację), co czyni go drugim na świecie pod względem finansowania projektem zaraz po programie Apollo. Pomimo że ITER będzie stanowił bardzo zaawansowane stadium badań na syntezę termojądrową, nie będzie jeszcze w pełni tego słowa znaczeniu elektrownią (nie będzie posiadał osprzętu pozwalającego zamieniać energię cieplną w energię elektryczną). Rolą samego projektu ITER jest wykonanie eksperymentów nad termojądrowym „paleniskiem”, które zostanie użyte w być może już niewiele zmienionej postaci w urządzeniach, które będą wykorzystywane w prawdziwych elektrowniach. Przeprowadzone na tym urządzeniu eksperymenty mają dostarczyć informacji, czy obecnie uważany za optymalny dobór materiałów do wykonania poszczególnych elementów tokamaka jest rzeczywiście właściwy, czy sprawdzi się w warunkach właściwych dla tak dużego urządzenia obciążen termicznych, jaki może mieć wpływ na zachowanie się plazmy i czy materiały oddziałujące z plazmą i konstrukcyjne nie będą ulegać aktywacji radioaktywnej. O tym jak ważne są to badania świadczy fakt, że postanowiono dodatkowo wesprzeć je projektując eksperymentalne urządzenie IFMIF (*International Fusion Materials Irradiation Facility*), w którym materiały poddawane są napromieniowaniu dużymi dawkami neutronów o parametrach odpowiadających strumieniom neutronów, które wytwarzane będą w czasie reakcji fuzji. Wyniki badań przeprowadzonych na tokamaku ITER i zdobyte tu doświadczenia, posłużą w przyszłości do zbudowania kolejnego urządzenia nowej generacji – DEMO, który w planach ma być pierwszą elektrownią termojądrową.

Należy pamiętać, że projekt ITER narodził się z myślą o wydajnych źródłach energii dużej mocy. Jeśli mamy zapewnić dostawy energii dla Europy i całego świata na drodze przyjaznej środowisku naturalnemu, musimy wykorzystać wszelkie technologie wytwarzające energię, dlatego też badania w obszarze syntezy termojądrowej powinny zajmować wysoką pozycję w polityce energetycznej każdego państwa.

1.5. Sytuacja polityczno-ekonomiczno-społeczno-technologiczna i prawna badań nad energetyką termojądrową

1.5.1. Ewolucja uwarunkowań politycznych od rozpoczęcia projektu do chwili obecnej. Organizacje międzynarodowe zaangażowane w badania nad fuzją

Zaspokojenie potrzeb energetycznych i zapewnienie bezpieczeństwa w tej dziedzinie należy do priorytetowych zadań rządów każdego kraju. Nie budzi więc zdziwienia fakt, że perspektywa zbudowania wydajnego urządzenia mogącego dostarczać energię w oparciu o użytkowanie ogólnie dostępnych i relatywnie tanich surowców, a oprócz tego nie emitująca CO₂ ani znaczących ilości zanieczyszczeń, przyciągnęła nadzieje również i polityków. Prawdą jest, że możliwość uzyskiwania dużych ilości energii z syntezy bądź rozszczepienia na poziomie jąder atomowych, będąca jedną z konsekwencji słynnego równania Einsteina $E=mc^2$, w pierwszym rzędzie przyciągnęła uwagę przemysłu zbrojeniowego, jednak w przypadku gałęzi „fuzyjnej” eksperymenty związane z pokojowym wykorzystaniem energii, wprowadzie na bardzo krótko, jednak wyprzedziły zastosowania wojenne.

Pierwszy patent związany z możliwością uzyskiwania energii termojądrowej zgłoszony został w Wielkiej Brytanii przez *United Kingdom Atomic Energy Authority* i dotyczył prac Sir George'a Pageta Thomsona i Mosesa Blackmana. W międzynarodowych kartotekach patentowych oznaczony jest numerami H05H1/18 i H05H1/02 oraz zatytułowany „*Improvements in or relating to gas discharge apparatus for producing thermonuclear reactions*”. Praca wyżej wymienionych naukowców zawierała pierwszy opis fuzji z utrzymaniem magnetycznym w toroidalnej komorze próżniowej i ogrzewania plazmy falami elektromagnetycznymi, które to rozwiązania wykorzystywane są współcześnie w wielu urządzeniach, a także uwzględnione są w projekcie tokamaka ITER. Opisane w patencie badania stały się podwalinami prac nad kontrolowaną syntezą termojądrową z utrzymaniem magnetycznym.

Mimo że w ówczesnych czasach widmo kryzysu energetycznego nie było jeszcze postrzegane jako bezpośrednie zagrożenie, badania nad pokojowym wykorzystaniem fuzji termojądrowej szybko przyciągnęły wzrok największych wtedy potęg – Stanów Zjednoczonych oraz Związku Radzieckiego. Jakkolwiek celami priorytetowymi wielkich mocarstw były wyścig zbrojeń i podbój kosmosu, jednak rozwój tak spektakularnej technologii jak zastosowanie fuzji termojądrowej na potrzeby energetyki, było również prestiżowym programem.

W USA pierwsze prace zostały podjęte jeszcze za czasów prezydentury Harry'ego Trumana w 1951 roku, a więc na rok przed detonacją pierwszej amerykańskiej bomby wodorowej. Badaniami zajął się zespół kierowany przez wybitnego naukowca Lymana Spitzera, którego wcześniejsze prace doprowadziły między innymi do wynalezienia sonaru. Owocem tych badań w ramach Projektu Matterhorn było powstanie koncepcji stellaratora, czyli urządzenia o skomplikowanym kształcie, w którym plazma utrzymywana jest za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego. W celu rozwijania koncepcji z utrzymaniem magnetycznym powołany został *Princeton Plasma Physics Laboratory*, w którym badania prowadzone są po dzień dzisiejszy. Początkowe badania mimo rozczarowań związanych ze stwierdzeniem, że przy wyższych energiach plazmy ówczesne stellaratory nie są w stanie zapewnić odpowiednio dobrego utrzymania plazmy, były dobrym punktem wyjścia do pracy nad innymi rodzajami pułapek magnetycznych oraz przyczyniły się do opracowania bardzo istotnych koncepcji elementów reaktorów termojądrowych takich jak chociażby koncepcja *divertora*.

Inną koncepcją, również rozwijaną w Stanach Zjednoczonych, była tzw. *Inertial Confinement Fusion*, czyli fuzja laserowa. Nadzieje na szybkie jej opracowanie rozpoczęły się w zasadzie bezpośrednio po wynalezieniu lasera w 1960, a badaniami nad nią w 1962 roku w USA zajął się inny duży ośrodek *Lawrence Livermore National Laboratory*. Mimo początkowego optymizmu i szybkiego rozwoju technologii laserowej wywołanie fuzji tą metodą okazało się bardzo trudne, a moc promieniowania wciąż niewystarczająca. Pojawiły się również problemy z odpowiednim skupianiem wiązek na zmrożonych deuterowo-trytowych kuleczkach, których postacią miało paliwo. W związku z tym, badania w ośrodkach laserowych z uwagi na możliwość osiągnięcia bardzo dużych gęstości mocy, skupiły się raczej na symulowaniu oddziaływań nuklearnych zachodzących podczas wybuchów bomb wodorowych, a więc znalazły się pod egidą badań na rzecz przemysłu zbrojeniowego.

W tym samym czasie, po drugiej stronie żelaznej kurtyny badania nad fuzją termojądrową prowadzone były przez radzieckiego architekta bomby wodorowej Andrieja Sacharowa, który wraz z Igorem Tammem w 1951 roku opracowali koncepcję tokamaka, czyli urządzenia, w którym plazma była ogrzewana za pomocą indukowanego w niej prądu i utrzymywana przy pomocy pola wytworzonego przez ten prąd oraz zewnętrzne uzwojenia. Koncepcja ta gwarantowała uzyskanie parametrów zapłonu najlepszych spośród proponowanych do tamtej pory rozwiązań. Napędzane euforią, po wystrzeleniu pierwszego

sputnika i detonacji bomby wodorowej, badania eksperymentalne ruszyły w Instytucie Kurczatowa w 1956 roku pod kierownictwem Lwa Arcimowicza. Optymizm był tak duży, że naukowcy ogłosili, iż skonstruują pierwszy wydajny reaktor termojądrowy już w kolejną rocznicę wybuchu Rewolucji Październikowej. Niestety, podobnie jak w Stanach Zjednoczonych mimo niewątpliwych osiągnięć w postaci wybudowania tokamaków T-3 i T-4, w którym po raz pierwszy zademonstrowano kwasi-stacjonarną kontrolowaną reakcję termojądrową, wysiłki nie doprowadziły do oczekiwanego sukcesu.

Mimo, że kraje Europy Zachodniej w latach 50-70 XX wieku nie prowadziły zaawansowanych badań nad fuzją termojądrową, to niezwykle istotną dla jej rozwoju decyzją było powołanie w roku 1957 na mocy Traktatów Rzymskich wspólnoty EURATOM, której głównym celem była pokojowa współpraca w dziedzinie rozwoju technologii jądrowych. Pierwotnie wysiłki organizacji skupiały się na opanowaniu reakcji rozszczepienia, która została wykorzystywana przy budowie reaktorów jądrowych, jednak późniejszy rozwój sytuacji politycznej przyczynił się do wzrostu zainteresowania wspólnoty fuzją termojądrową.

W okresie tym na rynku fuzyjnym nieobecni jeszcze byli inni dzisiejsi silni uczestnicy tacy jak Japonia, Chiny, Indie czy Korea Południowa. Pierwszym znakiem zainteresowania tą tematyką na wschodzie był jednak tokamak DIVA wybudowany w 1974 roku.

Przytoczony rys historyczny sugeruje, że do połowy lat siedemdziesiątych, fuzja termojądrowa, po początkowym okresie entuzjazmu, traktowana była raczej jako ciekawostka, a nie jako strategiczny kierunek badań, zwłaszcza w porównaniu do innych technologii kwitnących w tamtym okresie. Mocarstwa prowadziły wprawdzie badania, lecz nigdy nie należały one do obszaru priorytetowego, głównie z uwagi na to, że możliwe osiągnięcia nie były tak spektakularne jak pierwotnie przypuszczano, że mogą być. Rozwój technologii energetycznych w największym stopniu wiązał się z metodami opartymi na rozszczepieniu jądrowym, ponieważ mimo wykorzystania surowców nieodnawialnych i często odpornej opinii społecznej pozwalały one na efektowne sukcesy w postaci kolejnych udanych inwestycji. W istocie, rozwój energetyki opartej na zjawisku rozszczepienia był isticie imponujący i już kilka miesięcy po wybudowaniu pierwszego 5 MW reaktora w ZSRR, przewodniczący amerykańskiej komisji ds. energii atomowej przekonywał, że w przyszłości cena energii elektrycznej będzie „niemierzalnie niska”. Poparciem jego słów były kolejne elektrownie atomowe, między innymi pierwsza 50 MW komercyjna elektrownia wybudowana w UK w Sellafield i powstające w latach 60 w USA i innych częściach świata elektrownie o mocy 1 GW i większych.

Sukcesy energetyki jądrowej oraz wyścig zbrojeń zepchnęły niejako badania nad pokojowym wykorzystaniem energii fuzji na nieco dalszy plan. Powodem takiej sytuacji był również brak perspektyw spektakularnych osiągnięć w tej dziedzinie, które nie mogły się równać z sukcesami osiąganymi w eksploracji kosmosu, czy rozwijania technik zbrojeniowych oraz broni masowego rażenia. Siłą rzeczy nakłady finansowe były znacznie mniejsze niż w tych dziedzinach. Do rozwoju nie przekonywała więc ani sytuacja polityczna, ani ekonomiczna, gdyż dzięki stosunkowo dużym rezerwom paliw kopalnych oraz sukcesom energetyki opartej na zjawisku rozszczepienia, mocarstwa odczuwały w dalszym ciągu wyższy niż umiarkowany komfort energetyczny.

Sygnałem zwiastującym konieczność poszukiwania nowych źródeł energii stał się jednak w 1973 roku kryzys naftowy. W latach poprzedzających, produkcja ropy naftowej z trudem pokrywała zapotrzebowania, do czego przyczyniła się między innymi niezwykle surowa zima 1969/1970, która spowodowała znaczne uszczuplenie rezerw ropy naftowej i gazu ziemnego w wielu krajach. Po wybuchu wojny izraelsko-arabskiej i nałożeniu na Stany Zjednoczone i kraje Europy Zachodniej embarga przez państwa OPEC, cena baryłki ropy naftowej w bardzo krótkim czasie wzrosła o 600% i osiągnęła rekordowy poziom 35 USD. Dla porównania cena baryłki przed rokiem 1970 wynosiła jeszcze ok. 2 USD. Kryzys mocno

dał się we znaki wszystkim uprzemysłowionym krajom, a ponadto dał do zrozumienia, że era beztróskiego korzystania z paliw kopalnych ma się ku końcowi. Pierwszy kryzys doprowadził do znacznego wzbogacenia się państw OPEC względem Europy Zachodniej i Stanów Zjednoczonych, lecz również uświadomił tym krajom potrzebę poszukiwania alternatywnych źródeł w celu uniezależnienia się od OPEC. Dzięki temu rozpoczęła się eksploatacja bogatych źródeł na Morzu Północnym i na Alasce, na skutek czego OPEC nie był już w stanie narzucać swoich cen. Nie zapobiegło to jednak dalszym problemom. Mimo częściowej stabilizacji sytuacji w latach następnych, na kolejny kryzys nie trzeba było długo czekać. Nastąpił on w roku 1980 i doprowadził ponownie do wzrostu cen ropy do 30 USD za baryłkę. I tym razem powodem były zawirowania polityczne, a w szczególności rewolucja irańska. Bezpośrednim skutkiem tych wydarzeń był kryzys światowego systemu walutowego oraz kryzys gospodarczy połączony z recesją oraz inflacją.

Istotną dla przewidywań rozwoju sytuacji na rynku paliw stała się stworzona w 1956 roku przez Hubberta hipoteza „*Oil Peak*” zwiastująca osiągnięcie maksymalnego światowego wydobycia ropy naftowej w okolicach 2000 roku, po którym wydobycie będzie spadać, na skutek czego ceny będą rosnać. Prognozy te, mimo nieuwzględnienia kryzysów naftowych sprawdziły się z dokładnością do ok. 5 lat i szczytowe wydobycie osiągnięto w roku 2005.

Niestabilna i w wysokim stopniu uzależniona od warunków na arenie międzynarodowej sytuacja na rynku naftowym uświadomiła, a ponadto rosnące przeświadczenie o możliwości całkowitego wyczerpania się tego surowca przekonała do poszukiwania alternatywnych źródeł energii. Przełożyło się to na rozwój technologii wykorzystujących źródła niewyczerpalne (wiatr, woda, energia słoneczna i geotermalna) oraz odnawialne. Badania były dodatkowo stymulowane przez rozwijającą się w społeczeństwach świadomość ekologiczną związaną z coraz wyraźniejszym dostrzeganiem negatywnego wpływu agresywnej gospodarki przemysłowej na środowisko naturalne. Wyraźnym bodźcem do rozwoju ruchu ekologicznego było zaobserwowanie w 1985 roku „dziury ozonowej”. Coraz częściej zaczęto też mówić o ocieplaniu się klimatu na skutek zwiększonego efektu cieplarnianego na skutek emisji dwutlenku węgla pochodzącego ze spalania paliw kopalnych, czego efektem było powołanie w 1988 roku przez Organizację Narodów Zjednoczonych - Światową Organizację Meteorologiczną (WMO) i Program Środowiskowy Organizacji Narodów Zjednoczonych (UNEP) Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu, w skrócie IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), który miał za zadanie ocenę ryzyka związanego z wpływem człowieka na zmianę klimatu.

W międzyczasie apogeum osiągały zimna wojna i wyścig zbrojeń. Mocarstwa dysponując arsenałem broni masowej zagłady wystarczającym nawet do wielokrotnego zniszczenia całego świata, zaczęły dostrzegać bezsensowność zaistniałej sytuacji. Narastające problemy gospodarcze w Związku Radzieckim oraz pewne złagodzenie reżimu po dojściu do władzy Gorbaczowa i rozpoczęciu „Pierestrojki” sprzyjały klimatowi porozumienia.

Środkiem do budowania porozumienia stała się możliwość uczestnictwa we wspólnym i zakrojonym na dużą skalę międzynarodowym projekcie mającym cel pokojowy. Dobrym kandydatem na taki projekt okazała się koncepcja budowy eksperymentalnego reaktora termojądrowego budzącego nadzieję na uzyskanie bezpiecznej energii w przyszłości. Idea ta została poddana dyskusji podczas spotkania supermocarstw w Genewie, w którym uczestniczyli prezydent Francji Francois Mitterand, premier Wielkiej Brytanii Margaret Thatcher, Pierwszy Sekretarz partii komunistycznej ZSRR Michaił Gorbaczow oraz prezydent Stanów Zjednoczonych Ronald Reagan. Rozmowy zaowocowały decyzją o budowie tokamaka ITER, którego akronim oznacza po łacinie „droga”, który miał być zbudowany wspólnym wysiłkiem Unii Europejskiej, Stanów Zjednoczonych, Związku Radzieckiego i Japonii.

Tragicznym wydarzeniem, które również miało odegrać ważną rolę dla rozwoju badań i przemysłu związanego z energetyką jądrową i termojądrową okazała się katastrofa w Czarnobylu. 26 kwietnia 1986 roku na skutek przegrzania i stopienia się części reaktora oraz wybuchu chemicznego wodoru powstałego w wyniku awarii systemu chłodzenia w położonej na terenie dzisiejszej Ukrainy reaktora doszło do emisji substancji radioaktywnych do atmosfery. Bezpośrednio na skutek awarii zginęło ok. 30 osób, a około 200 zmarło na chorobę popromienną. Mimo, że rzeczywiste dalekosiężne skutki nieszczęścia i rozmiary skażenia na terenie Europy są trudne do jednoznacznego sprecyzowania i po dzień dzisiejszy są przedmiotem sporów i kontrowersji, katastrofa wzbudziła w społeczeństwach oraz przywódcach państw przeświadczenie, że energetyka oparta na zjawisku rozszczepienia oprócz nieocenionych dobrodziejstw przedstawia również w sobie poważne ryzyko. Mimo racjonalnych argumentów ludzi związanych z przemysłem, niejednokrotnie historyczne podejście ekologów zjednujących sobie opinię publiczną doprowadziło to niestety do znacznego wyhamowania rozwoju tej dziedziny energetyki.

Pozytywnym efektem odwrócenia się od energetyki jądrowej oraz coraz silniejszych nacisków lobby ekologicznego był dynamiczny rozwój badań nad alternatywnymi źródłami energii. Ważnym celem rządów państw było wytworzenie w społeczeństwie przeświadczenia, że są w stanie zapewnić swoim krajom efektywne źródła energii bez ryzyka katastrofalnych wydarzeń oraz bez zanieczyszczania środowiska. Wysiłki te przyniosły wiele ciekawych rozwiązań, które bez wątpienia podniosły standard naszego życia, jednak nie były w stanie rozwiązać problemu energetycznego w sposób całkowity. Energetyka termojądrowa stawała się więc alternatywą braną pod uwagę coraz poważniej.

Jednym z najdonioślejszych wydarzeń XX wieku był upadek „imperium zła”, czyli Związku Radzieckiego zwiastujący zmierzch zbrodniczej ideologii komunizmu. Rozprężenie spowodowane tym wydarzeniem, umożliwiło zmniejszenie nakładów na zbrojenia, usprawnienie przepływu wiedzy i informacji, co przelożyło się na wkroczenie na drogę szybkiego rozwoju technologicznego, naukowego i gospodarczego całego cywilizowanego świata. Tak jak dla wszystkich innych naukowych projektów, wydarzenie to okazało się również dużą szansą dla projektu ITER. Integracja i rozszerzanie się Unii Europejskiej miało pozytywny wpływ na współpracę naukową. Do wspólnoty EURATOM przyłączały się nowe asocjacje wnosząc swój wkład naukowy i stwarzając możliwości działania w wielu nowych dziedzinach związanych z potrzebami energetyki termojądrowej.

Doniosłość projektu została również doceniona przez inne kraje. Z biegiem lat dołączyły do niego Chiny, Korea Południowa oraz Indie. Ważną decyzją, której podjęcie odwlekano przez wiele lat była sama lokalizacja budowy. Na spotkaniu w dniu 28 czerwca 2005 roku w Moskwie zdecydowano jednak, że budowa zostanie podjęta w południowej Francji, w Cadarache, gdzie częściowo zostanie wykorzystana infrastruktura obecnie pracującego tokamaka Tore Supra. Krajem, który najdłużej wytrwał w boju o ustalenie lokalizacji była oprócz Unii Europejskiej Japonia. Aby zrekompensować Japończykom pozbawienie ich wykonania inwestycji, podjęte zostały decyzje o zagwarantowaniu im 2/11 stanowisk w kadrze naukowej oraz 2/11 kontraktów przemysłowych, mimo ponoszenia przez ten kraj 1/11 kosztów programu.

Pierwsza plazma w tokamaku ITER ma zapłonąć w 2018 roku. Na początku planowana jest praca tylko na deuterze, w następnej kolejności mają zostać przeprowadzone eksperymenty już z mieszanką deuteru i trytu, dzięki której naukowcy mają nadzieję na uzyskanie pięciokrotnego zysku energetycznego. ITER, mimo że będzie krokiem milowym na drodze opanowania fuzji termojądrowej, nie jest jej celem ostatecznym. Obecne projekty uwzględniają już budowę urządzenia DEMO, które będzie pierwszą prototypową elektrownią termojądrową.

W Europie badania nad magnetyczną syntezą termojądrową prowadzone są pod auspicjami organizacji :

- EFDA (*European Fusion Development Agreement*), która korzysta z osobowości prawnej Komisji Europejskiej
- F4E (*Fusion for Energy*), która zajmuje się europejską częścią programu ITER i której poczynania są zintegrowane w ramach organizacji ITER IO (*ITER International Organization*)

Organizacje te działają w ramach wspólnoty EURATOM.

Nadzór nad realizacją programu europejskiego sprawują komitety i rady zarządzające, odpowiadające instytucjom wykonawczym:

- CCE-FU (*Consultative Committee for the EURATOM Specific Research and Training Programme in the Field of Nuclear Energy - Fusion*)
- F4E *Governing Board*
- EFDA *Steering Committee*

Działania wymienionych organizacji mają na celu koordynację i przydział prac pomiędzy poszczególnymi asocjacjami realizującymi projekty zlecane im na podstawie zgłaszania odpowiedzi na zaproszenia do składania wniosków tzw. *Call for Proposals*. Wykonywanie projektów monitorowane jest przez tzw. *Steering Committies*, czyli Komitety Kierujące, w których obradach biorą udział przedstawiciele zainteresowanych asocjacji oraz przedstawiciele Komisji Europejskiej.

Program badań skupionych na fuzji wewnętrznej (*Inertial Confinement Fusion*) prowadzonych w ramach przedsięwzięcia HIPER zarządzany i finansowany jest w całkowicie odrębny sposób. W projekcie uczestniczą ośrodki z wielu krajów Unii Europejskiej, Ameryki Północnej oraz Azji. Głównym środkiem finansowania są fundusze ministerialne poszczególnych uczestników projektu.

Europejski program badań nad laserową syntezą termojądrową HIPER posiada następującą strukturę organizacyjną:

- Międzynarodowa Rada Sterująca (*International Steering Council*)
- Międzynarodowy Komitet Doradczy (*International Advisory Committee*)
- Komitet Wykonawczy (*Executive Board*)
- Forum Uczestników (*Participants' Forum*)
- Komitet Kierujący Projektem (*Project Management Committee*)

Przygotowania merytoryczne i organizacyjne projektu HiPER rozpoczęły się już w 2004 r. pod kierownictwem prof. Mike'a Dunne, dyrektora centrum badawczego *Central Laser Facility* w Rutherford. Oficjalnie projekt został podzielony na dwie fazy: przygotowawczą i konstrukcyjną. Pierwsza z nich w 2006 została zaakceptowana i ulokowana na mapie drogowej Europejskiego Forum Strategicznego dla Infrastruktury Badawczej (*European Strategy Forum on Research Infrastructures, ESFRI*). Po pozytywnym zaopiniowaniu projekt ten został skierowany do Programu Infrastruktury Badawczej w 7. Programie Roboczym. Faza przygotowawcza projektu HIPER rozpoczęła się 28 kwietnia 2008 r. i ma potrwać 3 lata. Budżet projektu HIPER przewidziany na te trzy lata wynosi 13 mln Euro.

W Europie poza projektem HIPER prowadzone są również inne programy zajmujące się badaniami nad laserową syntezą termojądrową. Są to LASERLAB (*Europe Integrated Initiative of European Laser Infrastructures*) i ELI (*Extreme Light Infrastructure*). Programy te są pośrednio związane z projektem HIPER i mają na celu m.in. wspieranie projektów badawczych zajmujących się oddziaływaniem lasera z plazmą. Program ELI jest poza tym związany z budową i zastosowaniem lasera wielkiej mocy do badań fizycznych w warunkach ekstremalnych.

1.5.2. Czynniki ekonomiczne oraz główne źródła i metody finansowania

Inwestycja w energetykę termojądrową, mimo że budzi duże nadzieje na osiągnięcie komfortu energetycznego jest równocześnie długotrwała i kosztowna. Inwestorzy nie mają gwarancji, że włożony przez nich wkład zwróci się w rozsądnym terminie, a zatem finansowanie całokształtu badań nie jest szczególnie dla inwestorów prywatnych ponętą lokatą kapitału. Z uwagi na tę właściwość programem badań nad tą dziedziną powinny zająć się rządy oraz organizacje międzynarodowe, jednak niestety i dla nich, przez wiele lat, brak spektakularnych sukcesów nie był okolicznością zachęcającą do zwiększania budżetu.

Przez długi czas sytuacja polityczno-społeczna w szczególności sposób nie sprzyjała zorganizowanemu wysiłkowi nad rozwojem technologii ani nie zachęcała do jego finansowania. Po okresie początkowego, powojennego entuzjazmu, kiedy wydawało się, że fuzja zostanie przeprowadzona łatwo i szybko albo przy pomocy urządzeń z utrzymaniem magnetycznym, albo dzięki wysokiej mocy laserom nadszedł okres rozczarowania nauce wytyczano inne, jak się zdawało szczytniejsze lub rozsądniejsze cele, co było szczególnie widoczne w rywalizacji naukowo – technologicznej obozów amerykańsko-europejskiego i komunistycznego. Badania nad fuzją termojądrową zdecydowanie przegrywały zwłaszcza z opracowaniem broni masowej zagłady i planów podboju kosmosu w sektorze państwowym i międzynarodowym, a także z elektroniką, informatyką, biologią i wieloma innymi dziedzinami w sektorze prywatnym.

Badania fuzyjne przetrwały jednak jako towarzyszące badaniom nad reakcją rozszczepienia. Gałąź fuzyji magnetycznej rozwijała się w ośrodkach zajmujących się reaktorami jądrowymi, natomiast gałąź laserowa towarzyszyła badaniom związanych z uzyskiwaniem ekstremalnych gęstości mocy i energii, a w szczególności symulowaniu wybuchów jądrowych. Z uwagi na to również jeszcze dzisiaj pokutuje opinia o fuzyji laserowej jako koncepcji związanej z techniką zbrojeniową. Obok badań prowadzonych w ramach inicjatyw rządowych poszczególnych państw, na uwagę zasługują działania wspólnoty EURATOM, które przyczyniły się do budowy największego obecnie pracującego urządzenia fuzyjnego – JET.

Impulsem, który wpłynął na ożywienie ekonomiczne w dziedzinie fuzyji termojądrowej były kryzysy naftowe. Rozwój ten szczególnie widoczny był w budżecie Stanów Zjednoczonych. O ile w roku 1973 nakłady na fuzyję wynosiły (w przeliczeniu na dzisiejszy ekwiwalent) ok. 240 mln dolarów, to w roku 1975 ponad 480 mln. a w 1977 przekroczyły 1 mld. Od tego czasu na skutek pewnego uspokojenia sytuacji wydatki przestały rosnać, a począwszy od 1984 roku, czyli mniej więcej rok po zażegnaniu drugiego kryzysu naftowego zanotowały wyraźny spadek. Kolejne pojawienie się tendencji zwyżkowej, lecz głównie w zakresie fuzyji laserowej można skorelować z wojną w Zatoce Perskiej. Od tego czasu nakłady na fuzyję termojądrową są w budżecie Stanów Zjednoczonych dość stabilne.

Również i w Europie badania nad fuzyją wydają się być w pewien sposób skorelowane z sytuacją na rynku paliwowym. Plany JETa – największego obecnie tokamaka na świecie. Budowa ruszyła w roku 1978, zakończono ją w styczniu 1982, a pierwsze eksperymenty zostały przeprowadzone w 1983 roku. Prace były finansowane i organizowane przez EURATOM, który dbał również o umiędzynarodowienie personelu ośrodka przez preferencyjne stawki dla pracowników z poza Wielkiej Brytanii. Zabiegi te przyczyniły się w 1999 do wypłacenia odszkodowań pracownikom z UK i stały się jednym z powodów przejścia JET spod kurateli EURATOM do UKAEA.

W roku 1999 powołano również organizację EFDA, która od tego czasu zajmowała się koordynacją europejskiego programu badań nad energetyką termojądrową. Działania EFDA skupiały się głównie na trzech obszarach:

- Koordynacja wspólnych przedsięwzięć i badań ze szczególnym uwzględnieniem tych podejmowanych na JET.

- Koordynacja oraz wspieranie/finansowanie badań związanych z fuzją podejmowanych przez instytucje naukowe oraz przemysłowe na terenie Unii Europejskiej.
- Koordynacja współpracy europejskich uczestników w programach międzynarodowych takich jak ITER.

Po podpisaniu porozumienia ITER w roku 2006 potrzebna stała się reorganizacja europejskiego programu koordynacji badań nad energetyką termojądrową. W celu organizacji prac ukierunkowanych na europejskim wkładzie w program ITER powołana została F4E (*Fusion for Energy*), która oprócz koordynacji prac związanych z ITERem zajmuje się rozwijaniem aspektów związanych z przyszłą budową pierwszej elektrowni fuzyjnej DEMO. Od tego roku „punkt ciężkości” zainteresowań EFDA przesunął się na koordynację prac na tokamaku JET, organizację współpracy między ośrodkami europejskimi, kształcenie nowych kadr naukowych oraz rozwijanie współpracy z poza obszaru zainteresowań F4E.

Obie te organizacje działają obecnie, a rozdział funduszy wyznaczony jest przez 7. Program Ramowy Wspólnoty EURATOM, który przewiduje na badania w zakresie rozwoju kontrolowanej fuzji termojądrowej ok. 2 mld Euro na lata 2007-2013¹ (w porównaniu z ok. 0.7 mld Euro na badania związane z rozwojem energetyki opartej na rozszczepieniu jądrowym).

Środki te będą wykorzystane zarówno na samą budowę i rozwój infrastruktury ITERa (90% tej części ma być ulokowane w przemyśle), jak również na badania naukowe kluczowe i konieczne dla możliwości wybudowania i obsługi reaktora. Warto zauważyć, że taki podział całkowitej kwoty przeznaczonej na wszystkie badania jądrowe (2.7 mld Euro), świadczy o powadze zaangażowania Unii Europejskiej w badania nad fuzją termojądrową.

Problem jest z finansowaniem w Polsce projektów związanych z budowanym obecnie w Niemczech w Graifswaldzie stellaratorem Wendelstein 7-X. Projekt tego urządzenia nie jest bezpośrednio związany z budową ITERa i dlatego też nie jest on ulokowany w priorytetowych badaniach EFDA i Komisji Europejskiej. Niemniej jednak W7-X ma znaczenie w przypadku fuzji komercyjnej, dla przyszłej elektrowni DEMO, dlatego też należy dokonać wszelkich starań, aby polskie władze wzięły pod uwagę znaczenie tego projektu w przyszłości i wspierały zaangażowanie polskiej nauki w ten program. Należy podkreślić, że projekt W7-X daje ogromne możliwości dla inżynierów i techników, którzy angażując się w niego zdobywają wiedzę i doświadczenie, które w przyszłości może być wykorzystane do budowy reaktorów ITER i DEMO. Projekt ten jest w większości finansowany przez stronę niemiecką. W tym miejscu należy również wspomnieć, że projekt W7-X powstał dzięki decyzjom politycznym.

W przypadku fuzji laserowej, przewidywany budżet największego projektu europejskiego HIPER ma wynieść 13 mln Euro. Głównym źródłem funduszy mają być krajowe agencje finansujące badania naukowe w państwach uczestniczących w projekcie oraz dotacje Unii Europejskiej. Największy wkład, bo aż 7 mln Euro, ma pochodzić z Wielkiej Brytanii.

1.5.3. Nastawienie społeczne do energetyki termojądrowej i prace nad jego kształtowaniem

Energetyka oparta na zjawisku kontrolowanej reakcji termojądrowej, mimo że wydaje się być idealnym kandydatem na technologię, która w przyszłości dostarczy obfitości taniej i bezpiecznej energii, nie jest ideą powszechnie znaną i akceptowaną społecznie. Przyczyn takiej sytuacji jest wiele.

Najważniejszą z nich wydaje się pewne zaniedbywanie w programie nauczania zarówno szkół średnich, jak i wyższych problemów związanych z nowoczesną fizyką

¹ Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L54/21, Decyzja Rady z dn. 18 grudnia 2006 r. dotycząca 7. Programu Ramowego Europejskiej Wspólnoty Energii Atomowej (EURATOM) w zakresie działań badawczych i szkoleniowych w dziedzinie jądrowej (2007–2011), 2006/970/EURATOM

termojądrową oraz energetyką, a nawet jeżeli zagadnienia te są poruszane, nie jest kładziony na nie odpowiedni nacisk. W społeczeństwie pokutuje również przekonanie o rzekomej skomplikowalności nauk ścisłych, które czynią je niemożliwymi do zrozumienia dla przeciętnego śmiertelnika. Przesąd ten zniechęca uczniów i studentów do zapoznania się nawet z najprostszymi podstawami zjawisk i technologii, których nazwy kojarzą się z zaawansowaną fizyką. Prowadzi to niestety do sytuacji, w której tematy związane ze współczesną fizyką, a nawet w ogólności z nauką nie są popularne na szerszym forum, a jeżeli już, to wiążą się przeważnie z negatywnymi zjawiskami, takimi jak emisja zanieczyszczeń oraz zagrożenia.

Innym niekorzystnym zjawiskiem dla powszechnej akceptacji jest ambiwalentny stosunek opinii publicznej do energetyki jądrowej. Mimo ogromnych osiągnięć w tej dziedzinie, niestety w dalszym ciągu nie zyskała ona pełnego zaufania. Przekłada się to na nieufność wobec propagowania badań nad energetyką termojądrową, która dodatkowo na skutek braku odpowiedniego systemu edukacji, nie jest odróżniana od technologii opartej na zjawisku rozszczepienia. Niestety, energia jądrowa jest niejednokrotnie w dalszym ciągu postrzegana przez wydarzenia związane z opracowaniem broni masowego rażenia oraz tragediami w Hiroszynie i Nagasaki. Przeciętnemu człowiekowi pojęcie „atomu” wciąż bardziej kojarzy się z bombą atomową niż dobrodziejstwami energetycznymi, czy chociażby fizyką.

Sukcesy w badaniach nad tą gałęzią energetyki oraz jej potencjalne sukcesy w krótkiej perspektywie nie są również na tyle spektakularne, by wzmianki o nich mogły się znaleźć w programach wyborczych partii politycznej. Mimo chwiejnej sytuacji na rynkach paliw kopalnych, obietnica zrealizowania kosztownego i zaawansowanego technologicznie eksperymentu, który nie zapewnia w 100 procentach sukcesu nie jest wystarczająco atrakcyjna ani dla polityków, ani dla wyborców. Znacznie bardziej skuteczne jest skupienie uwagi na krótkoterminowych strategiach, które zapewnią zaspokojenie zapotrzebowania energetycznego oraz będą zorientowane na pozyskanie „ekologicznych” wyborców. Do tych strategii zaliczyć można plany zwiększenia wykorzystania zasobów odnawialnych takich jak biopaliwa, energia słoneczna, wiatrowa czy wodna. Nastroje te najlepiej wyraziły słowa europosłanki, współprzewodniczącej Grupy Zielonych, Rebeki Harms, która stwierdziła, że *„w następnych 50 latach fuzja termojądrowa nie rozwiąże problemów związanych ze zmianami klimatycznymi, ani nie zapewni bezpieczeństwa energetycznego (...) Partia Zielonych żąda (sic!), aby fundusze przeznaczone zostały na badania, które są bardziej istotne w perspektywie przyszłości. Szczególny nacisk powinien zostać przyłożony do odnawialnych źródeł energii”*. Znamienne jest, że Pani Europosłanka, jak można przeczytać na oficjalnej stronie Parlamentu Europejskiego jest z wykształcenia hodowcą drzew i architektem krajobrazu. Biorąc pod uwagę, że jej opinia jest reprezentatywna dla jej partii, której poglądy są z kolei odzwierciedleniem poglądów wyborców, przykrym zjawiskiem jest, że są one kształtowane przez osoby, które trudno uznać za kompetentne w dziedzinie fizyki termojądrowej, czy choćby nawet fizyki. Niestety, brak zahamowań w wypowiedzaniu się na tematy, w których mówcy są laikami stał się na tyle powszechny, że problem ten dotyka rozległych dziedzin, a nie tylko energetyki termojądrowej.

Jeszcze bardziej negatywny wpływ niż partie polityczne, na opinię społeczną, wywierają organizacje ekologiczne. I w ich przypadku głównym motorem działań jest ignorancja. Przedstawiciel jednej ze sztandarowych organizacji tego typu – *Greenpeace* – Jan Van de Putte, nazywa budowę reaktora we Francji *„drogą i bezsensowną głupotą”* i przekonuje, że pieniądze zamiast być marnowane na tego typu *„drogą i niebezpieczną zabawę”*, powinny być przeznaczone na źródła odnawialne oraz ochronę przyrody. Jako alternatywną inwestycję o podobnym koszcie pan Van de Putte proponuje budowę elektrowni wiatrowych o mocy 10 GW (sic!), która według niego mogłaby zapewnić dostawy prądu

elektrycznego dla 7.5 miliona europejskich gospodarstw domowych. Jak zwykle bywa w takich sytuacjach, nie są przedstawione racjonalne argumenty, a jedynie zostaje stwierdzone, że badania „doprowadzą do ślepego zaułka, w którym napotkają ogromne bariery techniczne”. Jakie kompetencje pozwalają panu ekologowi na wyciągnięcie takich wniosków nie jest napisane. Nie trzeba chyba również dodawać, że pan Jan Van de Putte, jak i cały Greenpeace jest przeciwny rozwojowi jakichkolwiek formom energetyki opartych na zjawiskach fuzji i rozszczepienia i z tego to powodu powinni zostać napiętnowani jako organizacja szkodliwa społecznie.

Niestety znaczny wpływ na tę sytuację mają nie tylko powojenne stereotypy, lecz również awarie w elektrowniach jądrowych, spośród których najgorsze następstwa miał wypadek w elektrowni Czarnobylu w 1986 roku. Mimo niezaprzeczalnie tragicznych skutków tego wydarzenia, jest ono jednak nadużywane jako argument demonizujący zagadnienia związane z energetyką (termo)jądrową w dyskusjach dotyczących energetycznej przyszłości naszego globu. W samej tylko Francji istnieje około ośmiuset organizacji anty-nuklearnych, które spektakularny popis dały w roku 2007 kiedy to protesty przeciwko nowej generacji reaktorów załwały Rennes (gdzie według nieoficjalnych źródeł protestowało 30 do 40 tys. demonstrantów), Lyon, Lille, Tuluzę i Strasburg.

W Polsce ruchy antynuklearne również odegrały niechlubną rolę we wstrzymaniu budowy elektrowni atomowej w Żarnowcu, na skutek czego obok Albanii jesteśmy jedynym krajem europejskim, który takowej elektrowni nie posiada. Do organizacji tych w pierwszym rzędzie zaliczały się Franciszkański Ruch Ekologiczny, Gdańskie Forum Ekologiczne, Ruch Wolność i Pokój oraz organizacja "Wolę być". Dwie wymienione na końcu były organizacjami ogólnopolskimi i stosowały najostrzejsze formy protestu w postaci licznych akcji blokowania dróg razem z miejscową ludnością oraz 63-dniowej głódówki. Wprawdzie organizacje już nie istnieją, lecz poglądy, które krzewiły w dalszym ciągu w pewnym stopniu pokutują w społeczeństwie.

Mimo wszystkich opisanych powyżej negatywnych zjawisk, obecna sytuacja pozwala jednak mieć nadzieję na systematyczną poprawę. Obecne pokolenie jest przyzwyczajone do nieograniczonych w zasadzie dostaw energii, więc w przypadku serwowania racjonalnych argumentów przemawiających na rzecz energetyki termojądrowej jest gotowa je przyjąć, zwłaszcza że wspomnienie wydarzeń z Czarnobyla staje się coraz bardziej odległe. Wraz z postępem prac nad reaktorami termojądrowymi i podniesieniem ich finansowania, organizacje zajmujące się rozwojem fuzji dysponują coraz lepszymi środkami upowszechniania swojej dziedziny badań.

Pierwszym i najbardziej bezpośrednim sposobem wpływania na opinię publiczną jest tworzenie miejsc pracy w ośrodkach zajmujących się badaniami. Działania takiego rodzaju wzbudzają zainteresowanie absolwentów oraz studentów, którzy poznają nową dziedzinę wiedzy, a następnie rozpowszechniają ją w społeczeństwie budując jego świadomość. Rozpoczęcie projektu ITER w oczywisty sposób stymuluje tego typu zjawiska.

Zadaniem organizacji takich jak EFDA jest również popularyzacja zagadnień związanych z energetyką termojądrową za pomocą innych środków. W tym celu organizowane są wystawy, szkolenia, rozpowszechniane artykuły prasowe i publikacje oraz prowadzone badania socjologiczne. Działania tego typu doskonale uwidaczniają się w strategii polskiej asocjacji EURATOM-IFPiLM, które skupiły się głównie na oddziaływaniu na środowiska uczniowskie, nauczycielskie i młodzieżowe. Od kilku lat prowadzona jest akcja popularyzacyjna dla nauczycieli związana ze szkoleniami, wystawami oraz wyjazdami do ośrodków zagranicznych (JET, Culham). Akcja przyniosła spektakularne sukcesy, takie jak zorganizowanie wystawy prac dzieci i młodzieży. Na skutek tych działań fuzja termojądrowa wzbudziła szersze zainteresowanie w prasie. O poszczególnych wydarzeniach związanych z fuzją pisano w Gazecie Wyborczej i Dzienniku, a szersze opracowania autorów

związanych i niezwiązanych z IFPILM ukazywały się w czasopismach takich jak Focus, Fizyka w Szkole czy Wiedza i Życie. Wiadomości pojawiały się również na portalach internetowych.

Podsumowując można się pokusić o wniosek, że jakkolwiek sytuacja społeczna, z którą związane są prace nad energetyką termojądrową nie jest jeszcze najlepsza, jednak rokuje duże nadzieje na zdecydowaną poprawę w nadchodzących latach, zwłaszcza jeżeli dzięki programom takim jak *Foresight* badaczom uda się zwrócić uwagę przemysłowców i obie strony zaczną odnosić korzyści ze współpracy.

1.5.4. Rozwój technologii na potrzeby energetyki termojądrowej. Powiązania z innymi gałęziami nauki i przemysłu

Nie ulega wątpliwości, że na przestrzeni poprzedniego wieku postęp technologiczny zmienił świat właściwie nie do poznania. Ponadto ostatnie dziesięciolecia w sposób dobitnie pokazują, że rozwój nowoczesnych technik nie wyhamowuje, a wręcz przeciwnie – jeszcze bardziej nabiera tempa. Zjawisko to jest odczuwalne dla wszystkich dziedzin życia, a w specyficzny sposób objawia się w nauce i badaniach, ponieważ pozwala na wykorzystanie coraz bardziej zaawansowanych technik eksperymentalnych, pomiarowych i obliczeniowych. Badania nad energetyką kielkowały w latach czterdziestych ubiegłego wieku, kiedy arsenał środków technologicznych był nieporównywalnie ubogi do tego, którym naukowcy dysponują obecnie. Eksperymentatorzy dysponowali z dzisiejszego punktu widzenia bardzo prymitywnym oprzyrządowaniem badawczym, aparaturą pomiarowo-kontrolną, nie mówiąc już o urządzeniach i technikach obliczeniowych. Warto nadmienić, że w latach czterdziestych ubiegłego wieku całkowicie nieznanymi były takie urządzenia jak laser, układ scalony (konceptcja tranzystora wprawdzie powstała i została opatentowana już w 1928 roku w Niemczech, jednak jej realizacja musiała czekać jeszcze wiele lat, aż wreszcie w 1956 roku doczekała się Nagrody Nobla dla Shockley’ a, Hausera i Bardeena z Bell Laboratories), światłowodów, komputer czy Internet, a technologia nadprzewodników znajdowała się w jeszcze bardzo wstępnej fazie. Nie znane były jeszcze również ani zaawansowane technologie materiałowe, ani techniki badań materiałowych wykorzystujące zaawansowane techniki pomiarowe i przyrządy półprzewodnikowe.

Należy zdawać sobie sprawę, że przy opracowywaniu jakościowo nowej technologii, jaką jest wykorzystanie fuzji termojądrowej dla celów pokojowych, korzystne, a nawet konieczne jest wykorzystanie wszystkich nowości technologicznych jakie pojawiają się na rynku w dziedzinie szeroko pojętej techniki materiałowej, diagnostycznej, półprzewodnikowej, próżniowej, obliczeniowej i właściwie wszystkich innych związanych z naukami opartymi na szeroko rozumianej fizyce.

Reaktor termojądrowy to urządzenie, w którym zamknięta jest rozgrzana do temperatury kilkuset milionów stopni plazma, która, mimo że jest utrzymywana za pomocą pól magnetycznych w niektórych obszarach urządzenia oddziałuje z jego powierzchnią. Z tego względu niezwykle istotny jest dobór materiałów o nie tylko wysokiej wytrzymałości termicznej lecz również o doskonałym przewodnictwie cieplnym. Początkowe rozwiązania polegały na stosowaniu do budowy ściany urządzenia stali, grafitu lub kombinacji tych materiałów. Mimo oczywistych zalet, materiały te posiadały również znaczące wady, takie jak aktywacja niektórych elementów stopu pod wpływem działania wysokoenergetycznych neutronów dla stali oraz akumulacja paliwa oraz powstawanie kodepozytów i pyłów w przypadku grafitu. Przewodność cieplna tych materiałów mimo, że była dość dobra, nie była jeszcze doskonała jeżeli chodzi o zastosowanie w urządzeniach fuzyjnych. Istotne znaczenie dla badań materiałowych poświęconych energetyce jądrowej miało więc opracowanie technologii wytwarzania tzw. włókien węglowych (CFC – *Carbon Fiber Composite*) w 1958 roku w Stanach Zjednoczonych przez dr. Rogera Bacona z *Union Carbide Parma Technical*

Center w Cleveland. Materiały te poza doskonałymi parametrami wytrzymałości termicznej cechowały się anizotropią umożliwiającą transport energii wzdłuż włókien nieporównywalnie lepszy niż miało to miejsce w przypadku grafitu.

Opracowanie coraz nowszych i doskonalszych włókien miało duży pozytywny wpływ na rozwój techniki związanej z budową tokamaków, nie rozwiązało jednak problemu erozji chemicznej i akumulacji izotopów wodoru będącego w sposób ścisły związany z materiałami opartymi na węglu. Dlatego też wiele wysiłku inżynierów materiałowych skupiało się na materiałach metalowych, spośród których wolfram, molibden i beryl wyróżniały się jako kandydaci na wykonanie elementów pierwszej ściany, natomiast niskoaktywacyjne stale miały posłużyć do produkcji elementów konstrukcyjnych. W tym przypadku problemem było nie tylko wykonanie materiałów o odpowiedniej czystości i składzie izotopowym, lecz również nakładanie warstw na podłoża głównie miedziane, w których zlokalizowane są układy rurek prowadzących wodę służących do chłodzenia i odprowadzania ciepła, które ma być wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej. Mimo pozornej dla laika prostoty, techniki te są niezwykle trudne z uwagi na niedopasowanie sieci krystalicznych poszczególnych materiałów oraz różnice ich współczynników rozszerzalności cieplnej. Również i w tym elemencie techniki w drugiej połowie XX wieku poczynione zostały niebywale postępy związane z opracowaniem różnych wariantów technologii nanoszenia plazmowego, osadzania z fazy gazowej, napyłania i innych. Warstwy metaliczne mogą być obecnie wytwarzane zarówno na powierzchni innych metali jak i na podłożu opartym na węglu. Warstwy berylowe zastosowane będą na największych powierzchniach pierwszej ściany, w których jednak obciążenie termiczne nie będzie zbyt duże. Beryl został wybrany głównie za względu na niską masę atomową, która jest szczególnie istotna dla uniknięcia strat związanych z energią wypromieniowaną przez cząstki zanieczyszczeń. Straty te gwałtownie rosną ze wzrostem masy atomowej pierwiastków zanieczyszczeń. W obszarze *divertora*, który poddany jest największym obciążeniom termicznym w ITERZE przewiduje się użycie wolframu oraz w niektórych najbardziej narażonych obszarach CFC, który jednak ma zostać wyeliminowany po przejściu przez ITER na cykl pracy deuterowo-trytowy.

Zasada działania tokamaka w dużym przybliżeniu jest podobna do zasady działania transformatora, jednak w celu wytworzenia odpowiednich temperatur, w jego uzwojeniu pierwotnym musi płynąć duży prąd. Na tym polu nieocenione zasługi mogą oddać nadprzewodniki, które posłużą do konstrukcji ogromnych elektromagnesów. Również i nauka zgłębiająca tajniki nadprzewodników osiągnęła w dwudziestym wieku wiele sukcesów. Szczególnie doniosły w skutkach może mieć rozwój tzw. nadprzewodników wysokotemperaturowych zapoczątkowany w 1986 roku. Obecnie za rekordowo wysoką temperaturę, w której możliwy jest efekt nadprzewodnictwa uznaje się 138 K dla związku $(\text{Hg}_{0.8}\text{Tl}_{0.2})\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8.33}$.

Zbudowanie ogromnego urządzenia jakim będzie ITER wymagać będzie również zastosowania bardzo zaawansowanej technologii próżniowej. Należy pamiętać, że wewnętrzna średnica komory próżniowej wynosić będzie 6 m, co przy średnicy torusa 19 m i 9 metrach wysokości uczyni ją 16 razy cięższą od komory próżniowej największego obecnie tokamaka. Komora próżniowa będzie więc ważyć trochę więcej niż Wieża Eiffla i trzeba zdawać sobie sprawę, że utrzymanie próżni w takim urządzeniu wymagać będzie stosowania ogromnych pomp i zaawansowanych technik próżniowych. Odpowiednie zastosowanie pomp będzie również bardzo istotne w obszarze *divertora*, w którym odbierane będzie ciepło i odpompowany hel będący produktem reakcji.

Rozwój technologii laserowej odegrał dużą rolę zwłaszcza w przypadku metody fuzji wewnętrznej (ICF – *Inertial Confinement Fusion*), która polega w uproszczeniu na doprowadzeniu do zapłonu reakcji termojądrowej w kilkumilimetrowej „kulce” zawierającej deuter i tryt za pomocą skupionego promieniowania laserowego o wysokiej mocy.

Początkowo, jeszcze pod wpływem entuzjazmu po opracowaniu pierwszych laserów, przypuszczano, że do zapłonu wystarczy energia 1 kJ. Przewidywania te okazały się zdecydowanie zbyt optymistyczne, jednak również rozwój laserów wielkiej mocy i energii umożliwił uzyskanie znacznie większych wartości. W systemie laserowym NIF (*National Ignition Facility*), w którym uzyskanie zapłonu ma nastąpić już w 2010 roku przewiduje się uzyskanie energii aż 4 do 20 MJ przy mocy lasera wynoszącej 500 TW.

Inne podejście, nawet bardziej zaawansowane technicznie proponuje projekt HIPER, w którym fuzja będzie miała nastąpić przy wykorzystaniu mechanizmu tzw. szybkiego zapłonu, który, w skrócie, polega na wykorzystaniu dwóch następujących po sobie impulsów laserowych o różnym czasie trwania, z których jeden jest rzędu ns, a drugi ps. Zastosowanie tej metody pozwoli na zredukowanie dawki energii potrzebnej do zapłonu dzięki zastosowaniu krótkiego impulsu o bardzo dużej mocy, która ma osiągnąć aż 4 PW. Plany takie są możliwe tylko dzięki opracowaniu zaawansowanych laserów wielkiej mocy, których technologia, kilkadziesiąt lat temu była jeszcze niewyobrażalna.

Oczywistym faktem jest, że motorem rozwoju techniki i nauki w wieku XX i obecnym była przede wszystkim elektronika. To jej zawdzięczamy przede wszystkim maszyny obliczeniowe, które niezwykle usprawniają wszelkie prace badawcze jak również aparaturę pomiarową, sterującą, zasilającą czy układy automatyki. Dziedzina ta wywarła nieodwracalny wpływ na całe nasze życie, więc nie może dziwić stopień w jakim wpłynęła na wszystkie metody badawcze mające na celu realizację idei energetyki termojądrowej. Niezwykły rozwój elektroniki pozwolił na opracowanie ogromnej ilości zróżnicowanych czujników półprzewodnikowych, kamer, detektorów promieniowania i całego arsenału innych urządzeń diagnostycznych. Zastosowanie mikroprocesorów i sterowania komputerowego niezmiernie ułatwiło kontrolę i automatyzację pracy, nie mówiąc już o pojemnych, szybkich i niezawodnych systemach akwizycji danych.

Osiągi obliczeniowe komputerów również okazały się bardzo istotne. Obecnie zwyczajne komputery są zdolne wykonywać obliczenia o złożoności niewyobrażalnej kilkanaście lub nawet kilka lat temu, a zaawansowane superkomputery mogą być wykorzystywane do modelowania reaktorów jądrowych oraz meteorologii. W Polsce jako centra superkomputerowe wymienić można: Cyfronet w Krakowie, ICM w Warszawie, PCSS w Poznaniu, TASK w Gdańsku i WCSS we Wrocławiu.

Bardzo szeroki wachlarz technologii, które mogą (a nawet muszą) zostać zaadaptowane na potrzeby energetyki termojądrowej stwarza ogromne szanse zarówno dla jednostek badawczych jak i dla przemysłu krajów uczestniczących w projektach z nią związanych. Również i w Polsce istnieje wiele Instytutów, Wydziałów oraz i firm, które z powodzeniem zajmują się lub mogłyby się zająć opracowaniem technologii oraz urządzeń na potrzeby energetyki termojądrowej. Oprócz zagadnień jednoznacznie związanych z fizyką plazmy, czy badaniami materiałowymi, którymi w Polsce zajmują się między innymi Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, Politechnika Warszawska, czy Akademia Górniczo-Hutnicza, w obszarze naukowo-przemysłowym związanym z energetyką termojądrową może sobie znaleźć niszę wiele polskich Wydziałów i firm zajmujących się informatyką, automatyką i elektroniką.

1.5.5. Sytuacja prawna badań nad energetyką termojądrową (normy związane z atomistyką (tryt), pracą z laserami, przemysłem chemicznym (beryl), prawo budowlane, prawo pracy)

Prowadzenie badań z zakresu energetyki termojądrowej wymaga, ze względu na koszty z tym związane, współpracy na arenie międzynarodowej. Dlatego też cały szereg uregulowań prawnych dotyczących omawianej tematyki zawartych jest w umowach międzynarodowych regulujących różne kwestie (m. in. problemy związane z finansowaniem

badan, przewozem materialow itd.). Ponadto, dziedzina jaką jest energetyka termojądrowa regulowana jest przez różne przepisy krajowe, które jednak w ten czy inny sposób znajdują się pod wpływem prawa międzynarodowego (choćby ze względu na członkostwo poszczególnych państw w organizacjach takich jak np. Unia Europejska, Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej, itp.).

Wspomniane wyżej przepisy dotyczą różnych dziedzin, a ponadto obowiązują na różnych szczeblach, dlatego też należy dokonać ich podziału bądź to ze względu na źródło pochodzenia, bądź to ze względu na dziedzinę, którą regulują. Z punktu widzenia niniejszego opracowania właściwy będzie ten drugi podział, ponieważ dokonanie takiej klasyfikacji pozwala odnaleźć przepisy regulujące konkretny aspekt prowadzenia działalności bez względu na to, skąd owe przepisy pochodzą. Trzeba pamiętać, że liczne normy określone w umowach międzynarodowych bądź w prawie wspólnotowym bezpośrednio bądź pośrednio obowiązują także w Polsce.

1.5.5.1. Aktualna sytuacja prawna w zakresie badań nad energetyką termojądrową w Polsce i na świecie

Podstawowym aktem prawnym regulującym kwestie związane z atomistyką w Polsce jest ustawa *Prawo atomowe*². Ustawa ta określa:

- działalność w zakresie pokojowego wykorzystywania energii atomowej związaną z rzeczywistym i potencjalnym narażeniem na promieniowanie jonizujące od sztucznych źródeł promieniotwórczych, materiałów jądrowych, urządzeń wytwarzających promieniowanie jonizujące, odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego,
- obowiązki kierownika jednostki organizacyjnej wykonującej tę działalność,
- organy właściwe w sprawach bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej,
- zasady odpowiedzialności cywilnej za szkody jądrowe,
- zasady wypełniania zobowiązań międzynarodowych, w tym w ramach Unii Europejskiej, dotyczących bezpieczeństwa jądrowego, ochrony przed promieniowaniem jonizującym oraz zabezpieczeń materiałów jądrowych i kontroli technologii jądrowych.

Ustawa określa także kary pieniężne za naruszenie przepisów dotyczących bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej oraz tryb ich nakładania, stosuje się ją również do działalności wykonywanej w warunkach zwiększonego, w wyniku działania człowieka, narażenia na naturalne promieniowanie jonizujące. Poza tym ustawa określa zasady monitorowania skażeń promieniotwórczych i reguluje działania podejmowane w przypadku zdarzeń radiacyjnych, jak również w przypadku długotrwałego narażenia w następstwie zdarzenia radiacyjnego lub działalności wykonywanej w przeszłości. Ponadto, ustawa ta określa również szczególne zasady ochrony osób przed zagrożeniami wynikającymi ze stosowania promieniowania jonizującego w celach medycznych.

Niektóre normy związane z prowadzeniem badań nad uzyskiwaniem energii z reakcji termojądrowej zostały zawarte w innych aktach prawnych – ustawach i rozporządzeniach.

Z badaniami nad energetyką termojądrową ustawa dotycząca prawa atomowego związana jest o tyle, o ile w badaniach tych wykorzystuje się materiały jądrowe, substancje promieniotwórcze, o ile powstają odpady promieniotwórcze itd. Ustawa nie zawiera żadnych uregulowań, które w sposób szczegółowy odnosiłyby się do badań nad energetyką termojądrową. Należy pamiętać, że badania nad energetyką termojądrową wiążą się niekiedy z pracą z substancjami szkodliwymi dla zdrowia takimi jak np. beryl czy tryt lub też z pracą z laserami wielkiej mocy.

² Dz.U. 2001.3.18

Liczne akty prawa wprowadzają regulacje związane z istnieniem substancji niebezpiecznych w środowisku pracy. Dotyczy to także berylu i niektórych jego związków oraz trytu. Obowiązujące w Polsce przepisy przede wszystkim stanowią implementację przepisów prawa wspólnotowego.

Podstawowym aktem prawnym regulującym kwestie związane z wykonywaniem pracy w Polsce jest ustawa *Kodeks pracy*³. Kodeks ten określa podstawowe zasady, jakim odpowiadać ma wykonywanie pracy, w tym również zasady dotyczące bezpieczeństwa i higieny pracy. Stanowi on również podstawę do wydawania rozporządzeń, które w sposób szczegółowy regulują podstawowe aspekty związane z bezpieczeństwem wykonywania pracy m. in. dotyczące dopuszczalnych stężeń substancji, na których działanie może być wystawiony pracownik czy np. przeprowadzania okresowych badań profilaktycznych.

Drugim aktem, który ma istotne znaczenie z punktu widzenia tematyki prowadzenia badań nad energetyką termojądrową jest wspomniana wcześniej ustawa *Prawo atomowe*, która oprócz tego, że określa „działalność w zakresie pokojowego wykorzystywania energii atomowej związanej z rzeczywistym i potencjalnym narażeniem na promieniowanie jonizujące od sztucznych źródeł promieniotwórczych, materiałów jądrowych, urządzeń wytwarzających promieniowanie jonizujące, odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego” to również znajduje zastosowanie w kwestiach działalności wykonywanej w warunkach zwiększonego, w wyniku działania człowieka, narażenia na naturalne promieniowanie jonizujące.

Ustawa określa między innymi warunki zatrudniania pracowników, którzy mają być narażeni na działanie promieniowania jonizującego, wprowadza obowiązek badania takich pracowników, przeprowadzania szkoleń dla pracowników, zatrudniania osób odpowiedzialnych za bezpieczeństwo obrony radiologicznej itd. Przepisy ustawy uzupełniane są przez rozporządzenia wydawane na jej podstawie.

Z punktu widzenia badań nad energetyką termojądrową znaczenie ma *Rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego*⁴. Rozporządzenie to określa dawki graniczne promieniowania jonizującego, jak również wskaźniki, które pozwalają na wyznaczenie dawek. Ponadto, rozporządzenie reguluje również sposób i częstotliwość dokonania oceny narażenia na działanie promieniowania jonizującego u pracowników oraz osób z ogółu ludności. Postanowienia omawianego rozporządzenia odnoszą się m. in. także do wody trytowej, trytu związanego organicznie oraz dwóch izotopów berylu – Be-7 i Be-10.

Kolejnym istotnym aktem prawa jest *Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie substancji, preparatów, czynników lub procesów technologicznych o działaniu rakotwórczym lub mutagennym w środowisku pracy*⁵. Rozporządzenie to określa jako substancję rakotwórczą m. in. beryl i niektóre jego związki. Wprowadza ono obowiązek stosowania systemów ostrzegania o narażeniu na działanie substancji o działaniu rakotwórczym bądź mutagennym, obowiązek informowania pracowników o tym, że mają do czynienia z tego rodzaju substancją, stosowania odpowiednich środków ochronnych, prowadzenia rejestru pracowników wykonujących prace związane z wykorzystywaniem takich substancji itd. Ponadto, rozporządzenie określa również warunki sprawowania profilaktycznej opieki zdrowotnej nad pracownikami w tym przeprowadzania okresowych badań zdrowia pracowników.

Z omówionym wyżej aktem prawnym wiąże się również *Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy w sprawie ograniczeń, zakazów i warunków produkcji, obrotu lub stosowania substancji niebezpiecznych i preparatów niebezpiecznych oraz zawierających je*

³ Tekst jednolity Dz.U.1998.21.94 ze zm.

⁴ Dz. U. 2005.20.168

⁵ Dz.U. 2004.280.2771 ze zm.

produktów⁶. Rozporządzenie to m. in. zakazuje wprowadzania do obrotu detalicznego oraz nieodpłatnego przekazywania konsumentom substancji, które zostały określone jako rakotwórcze (a więc również berylu i niektórych jego związków). Zakaz ten dotyczy także substancji i preparatów, które wspomniane substancje o rakotwórczym działaniu zawierałyby jako składniki bądź zanieczyszczenia. Obrót wymienionymi w rozporządzeniu substancjami rakotwórczymi jest dopuszczalny (oczywiście poza sprzedażą detaliczną i bezpłatnym oferowaniem ich konsumentom) pod warunkiem odpowiedniego oznakowania opakowania.

Kolejnym z aktów związanych z zapewnieniem bezpieczeństwa pracownikom jest *Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy*⁷. Rozporządzenie to określa najwyższe dopuszczalne stężenia substancji na jakie mogą zostać narażeni pracownicy. Wśród substancji, które zostały wymienione w rozporządzeniu jako szkodliwe dla zdrowia znajduje się również beryl i jego związki nieorganiczne.

Z wymienionymi wyżej rozporządzeniami mającymi na celu ochronę zdrowia pracowników powiązane jest także *Rozporządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 30 maja 1996 r. w sprawie przeprowadzania badań lekarskich pracowników, zakresu profilaktycznej opieki zdrowotnej nad pracownikami oraz orzeczeń lekarskich wydawanych do celów przewidzianych w Kodeksie pracy*⁸. Wspomniany akt prawny określa m. in. zakres, częstotliwość i sposób przeprowadzania badań profilaktycznych u pracowników wystawionych na działanie berylu i jego związków, jak również u pracowników wystawionych na działanie promieniowania jonizującego.

Zarówno w prawie międzynarodowym, jak i w prawie UE i prawie polskim funkcjonuje szereg uregulowań mających na celu ochronę środowiska naturalnego. Z punktu widzenia tematyki niniejszego opracowania najistotniejsze są regulacje odnoszące się do gospodarki odpadami oraz wprowadzania ścieków do wód. Również w tym przypadku przepisy polskie są w dużym stopniu oparte na przepisach wspólnotowych, jednak omawianą tematykę regulują również akty o charakterze ponadnarodowym.

Jednym z aktów prawa międzynarodowego, regulujących omawiane kwestie jest zawarta w 1989r. *Konwencja Bazylejska o kontroli transgranicznego przemieszczania i usuwania odpadów niebezpiecznych*. Konwencją tą związanych jest wiele państw, jak również Wspólnota Europejska. Jednym z celów zawarcia tej konwencji było zapewnienie spójności w gospodarce odpadami niebezpiecznymi na szczeblu międzynarodowym m. in. poprzez uregulowania kwestii ich przemieszczania. Przepisy konwencji pozwalają na ograniczanie możliwości przewozu odpadów niebezpiecznych przez granice i zakładają koordynację działań państw w tym zakresie. Z punktu widzenia badań nad energetyką termojądrową ma ona o tyle znaczenie, że zgodnie z treścią Konwencji, beryl i jego związki traktowane są jako odpady niebezpieczne co oznacza, że państwa mają prawo ograniczać możliwość wwozu odpadów go zawierających na swoje terytorium.

Ponadto, kwestie zarządzania odpadami regulują również przepisy pewnych aktów prawa wspólnotowego. Istniejące dyrektywy regulują m. in. kwestie dotyczące postępowania z odpadami niebezpiecznymi, do których zaliczany jest również beryl i jego związki. Przepisy te zostały implementowane do polskiego porządku prawnego za pomocą kilku ustaw oraz rozporządzeń do nich. Jednym z podstawowych aktów obowiązujących w Polsce we wspomnianym zakresie jest ustawa *Prawo ochrony środowiska*⁹, na podstawie której wydane zostały rozporządzenia wymienione poniżej. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że

⁶ Dz. U. 2004.168.1762 ze zm.

⁷ Dz.U. 2002.217.1833 ze zm.

⁸ Dz.U.1996.69.332 ze zm.

⁹ Tekst jednolity Dz.U. 2008.25.150

zgodnie z art. 2 ust. 1 ustawy nie stosuje się jej do spraw uregulowanych w przepisach *Prawa atomowego*. Kwestii związanych z badaniami nad energetyką termojądrową będzie ona więc dotyczyć, o ile nie będą one związane np. z zarządzaniem odpadami promieniotwórczymi czy postępowaniem z substancjami promieniotwórczymi.

Działalność powodująca wytwarzanie odpadów wiąże się czasem z koniecznością odprowadzenia ścieków. Dlatego też pewne znaczenie będzie tu miała również ustawa *Prawo wodne*¹⁰ oraz wydane na jej podstawie rozporządzenia regulujące wprowadzanie ścieków do wód czy też ochronę wód gruntowych bądź powierzchniowych.

Jednym z takich rozporządzeń jest *Rozporządzenie Ministra Środowiska, w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego, których wprowadzenie w ściekach przemysłowych do urządzeń kanalizacyjnych wymaga uzyskania pozwolenia wodnoprawnego*¹¹. Wśród substancji, których wprowadzanie do urządzeń kanalizacyjnych wymaga pozwolenia wodno prawnego (a więc pozwolenia wymaganego przy okazji pewnych rodzajów korzystania z wód, w przy okazji wprowadzania ścieków do kanalizacji) wymieniony jest beryl. Zasad zarządzania ściekami zawierającymi beryl dotyczą również inne rozporządzenia: *Rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie wysokości jednostkowych stawek kar za przekroczenia warunków wprowadzenia ścieków do wód lub do ziemi*¹², *Rozporządzenie Ministra Budownictwa w sprawie sposobu realizacji obowiązków dostawców ścieków przemysłowych oraz warunków wprowadzania ścieków do urządzeń kanalizacyjnych*¹³, *Rozporządzenie Ministra w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego*¹⁴.

W przepisach prawnych związanych z badaniami nad fuzją pojawia się termin "produkty podwójnego zastosowania". Są to produkty, włącznie z oprogramowaniem i technologią, które mogą być stosowane zarówno w celach cywilnych, jak i wojskowych, oraz obejmują wszystkie towary, które mogą być użyte zarówno w zastosowaniach niewybuchowych, jak i w jakikolwiek sposób do wspomagania wytwarzania broni jądrowej lub innych urządzeń do wybuchu jądrowego. Kwestie związane z transferem, przewozem czy tranzytem tego rodzaju produktów w Unii Europejskiej zostały uregulowane w rozporządzeniu *Rady nr 428/2009 ustanawiającym wspólnotowy system kontroli wywozu, transferu, pośrednictwa i tranzytu w odniesieniu do produktów podwójnego zastosowania*¹⁵. Rozporządzenie to wprowadza system kontroli i nadzoru nad przemieszczaniem technologii czy rozwiązań, które mogłyby mieć zastosowanie militarne. Co do zasady wywóz takich technologii czy przewóz ich poza terytorium wspólnoty wymaga zezwolenia odpowiednich organów państw członkowskich. Badań nad energetyką termojądrową rozporządzenie to dotyczy z dwóch względów. Po pierwsze, przedsięwzięcia prowadzone w ramach tych badań mają często charakter międzynarodowy. Oznacza to, że stosunkowo często może się zdarzyć sytuacja, w której będzie dochodzić do transferu technologii bądź wywozu jakichś urządzeń poza teren wspólnoty. Po drugie, rozporządzenie to wymienia jako produkty czy technologie o podwójnym zastosowaniu liczne urządzenia, które mogą znaleźć zastosowanie w badaniach nad energetyką termojądrową. Przykładowo można tu wymienić: katalizatory platynowe specjalnie opracowane lub przygotowane do wspomagania reakcji wymiany izotopów wodoru pomiędzy wodorem a wodą w celu separacji trytu z ciężkiej wody lub w celu produkcji ciężkiej wody, urządzenia lub instalacje do produkcji, odzyskiwania, ekstrakcji, stężania lub manipulowania trytem, urządzenia instalacji lub fabryk trytu, urządzenia i instalacje do

¹⁰ Tekst jednolity Dz.U. 2005.239.2019 ze zm.

¹¹ Dz. U. 2005.233.1988 ze zm.

¹² Dz. U. 2005.260.2177 ze zm.

¹³ Dz. U. 2006.136.964

¹⁴ Dz. U. 2006.137.984

¹⁵ Dz. U. UE. L 2009.134 s. 1

separacji izotopów litu, niektóre lasery itd. Rozporządzenie to ma bezpośrednie zastosowanie na terytorium wszystkich państw członkowskich i nie musi być dodatkowo implementowane.

W przypadku pracy z laserami wielkiej mocy w Polsce od 8 marca 2005 r. obowiązuje norma PN-EN 60825¹⁶, której przedmiotem jest ochrona osób przed promieniowaniem laserowym w zakresie długości fal od 180 nm do 1 mm przez wskazanie bezpiecznych poziomów roboczych oraz wprowadzenie systemu klasyfikacji laserów, określenie wymagań zarówno dla użytkownika jak i dla producenta, zapewnienie odpowiedniego systemu ostrzegania ludzi przez zastosowanie oznakowania, etykiet i instrukcji i itp.. Norma ta składa się z dwóch części opisujących wymagania produkcyjne oraz wytyczne dla użytkownika. Każde urządzenie laserowe powinno być zakwalifikowane do jednej z 5 klas na podstawie tzw. wskaźnika GED, opisującego maksymalny poziom dostępnej emisji promieniowania dozwolony w obrębie danej klasy. W wyżej wymienionej normie opisane są środki bezpieczeństwa, zagrożenia, procedury kontroli zagrożeń i maksymalne dopuszczalne ekspozycje (wskaźnik MDE).

Podstawowe wymagania dotyczące bezpieczeństwa pracy z laserami określa dyrektywa 2006/25/WE¹⁷, w której m.in. opisany jest najwyższy poziom promieniowania laserowego, niepowodujący urazów oczu i skóry. W Polsce przepisem prawnym ustalającym ten poziom jest *Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, jako maksymalną dopuszczalną ekspozycję MDE*¹⁸. Ponadto w pracy z urządzeniami laserowymi ważne są pomiary odpowiednich parametrów promieniowania laserowego na stanowiskach pracy, które powinny być wykonywane zgodnie z obowiązującymi przepisami dotyczącymi badań czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Parametry te opisuje *Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dn. 20 kwietnia 2005 r.*¹⁹.

Zagrożenia wynikające z pracy z laserami nie sprowadzają się tylko do promieniowania emitowanego z tych urządzeń, ale niosą ze sobą również inne zagrożenia, takie jak elektryczne, pożarowe czy wybuchowe, jak również zagrożenie związane z promieniowaniem towarzyszącym (np. wysokiej częstotliwości czy rentgenowskim).

1.5.5.2. Propozycja rozwiązań prawnych w obliczu podpisania ratyfikacji traktatu lizbońskiego a badania nad energetyką termojądrową

Na wstępie należy zwrócić uwagę na fakt, że badania nad energetyką termojądrową co do zasady prowadzone są w ramach przedsięwzięć o charakterze międzynarodowym, skupiających jednostki badawcze także z tych państw, które nie należą do Wspólnoty EURATOM. Jednocześnie przedsięwzięcia planowane czy realizowane w ramach współpracy wspólnoty EURATOM z innymi partnerami (np. projekt ITER czy planowany projekt DEMO) zaplanowane są na wiele lat w związku z czym muszą charakteryzować się dużą stabilnością i odpornością na zmiany w rodzaju reformy instytucji Unii Europejskiej.

Traktat z Lizbony zmieniający Traktat o Unii Europejskiej i Traktat ustanawiający Wspólnotę Europejską podpisany w Lizbonie dnia 13 grudnia 2007 r. (dalej Traktat z Lizbony) wprowadza szereg istotnych zmian w funkcjonowaniu Unii Europejskiej. Wśród najważniejszych można wymienić nadanie całej Unii osobowości prawnej, rezygnację ze

¹⁶ Norma PN-EN 60825-1(2): Bezpieczeństwo urządzeń laserowych: Część 1: Klasyfikacja, wymagania i przewodnik użytkownika, Część 2: Bezpieczeństwo światłowodowych systemów telekomunikacyjnych, 2007

¹⁷ Dyrektywa 2006/25/EU w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (sztucznym promieniowaniem optycznym)

¹⁸ Dz. U. nr 217 poz. 1833; zm. Dz. U. 2005 nr 221, poz. 1769

¹⁹ Dz. U. nr 73, poz. 645

stosowanej dotychczas struktury „trójfilarowej” na rzecz ujednoczenia Unii, zmiany w źródłach prawa UE itd. Zmiany, które mają zostać wprowadzone po wejściu w życie Traktatu z Lizbony w najmniejszym stopniu dotknęły jednak właśnie traktatu o Europejskiej Wspólnocie Energii Atomowej (EWEA) i samej wspólnoty. Kluczową zmianą jest kwestia osobowości prawnej. Do tej pory podmiotowość prawną międzynarodową posiadały tylko Wspólnoty (w tym EWEA) natomiast po wejściu w życie Traktatu Lizbońskiego osobowość będzie posiadała Unia Europejska.

Do traktatu z Lizbony dołączony został protokół nr 2, który wprowadza zmiany w traktacie o EWEA. Zgodnie z jego przepisami, w traktacie tym mają zostać uchylone art. 3, 107–132, 136–143, 146–156, 158–163, 165–170, 173, 173a, 175, 177–179a oraz 180b, 181, 183, 183a, 190 i 204. Artykuły te są obecnie odpowiednikami pewnych przepisów Traktatu Ustanawiającego Wspólnotę Europejską.

Jednocześnie, do Traktatu o EWEA dodano art. 106a, zgodnie z którym, „Artykuły 7, 9–9f, artykuł 48 ustępy 2–5 i artykuły 49 i 49a Traktatu o Unii Europejskiej, artykuł 16a, artykuły 190–201b, 204–211a, 213, 215–236, 238, 239, 240, 241–245, 246–262, 268–277, 279–280 oraz 283, 290 i 292 Traktatu o funkcjonowaniu Unii Europejskiej, a także Protokół w sprawie postanowień przejściowych, stosuje się do” traktatu o EWEA. Postanowienia te stanowią w dużej części odpowiedniki przepisów traktatu o EWEA, które zostały uchylone. Zmieniono również numerację niektórych rozdziałów traktatu. Wspomniany protokół wprowadza również przepis, zgodnie z którym postanowienia Traktatu o Unii Europejskiej i Traktatu o funkcjonowaniu Unii Europejskiej nie wprowadzają odstępstw od postanowień traktatu o EWEA. W związku z tym, poza usunięciem pewnych wtórnych postanowień traktatu oraz odesłaniem do przepisów odpowiadających im w pozostałych traktatach jak również wprowadzeniem pewnych nielicznych zmian (np. wprowadzono możliwość wystąpienia z EWEA wraz z wystąpieniem z całej Unii), intencją autorów Traktatu z Lizbony było pozostawienie traktatu o EWEA w dotychczasowym stanie.

Ponadto, należy pamiętać, że wejście w życie Traktatu z Lizbony nie oznacza odejścia od dotychczasowego dorobku wspólnoty. Moc zachowują zarówno przyjęte wcześniej źródła prawa wtórnego. Nie ulegnie również dezaktualizacji orzecznictwo Trybunału Sprawiedliwości. Można się więc spodziewać, że Europejska Wspólnota Energii Atomowej funkcjonować będzie podobnie, jak dotychczas, jednakże w zmienionej formie prawnej. Nie powinno to jednak zakłócić prac na poziomie Asocjacji oraz programów finansowanych z EURATOM, gdyż te kwestie regulują przepisy przejściowe i umowy grantowe które pozostaną bez zmian (zmieni się jedynie Strona).

Traktat z Lizbony nie pozostanie zupełnie bez wpływu na traktat o EWEA. Zmiany wynikać będą z nowych uregulowań zakresie funkcjonowania i struktury Unii Europejskiej czy nowego systemu źródeł prawa. Co do zasady jednak po wejściu w życie Traktatu z Lizbony pozycja EWEA jak również jej zdania oraz sposób funkcjonowania nie ulegną takim zmianom, jak ma to miejsce w przypadku innych aspektów funkcjonowania Unii.

Należy podkreślić jedną znaczącą kwestię. Zgodnie z protokołem o zmianie EURATOM uchylony został szereg przepisów, które powielały przepisy z TWE. Dotyczy to między innymi art. 161 ustalającego katalog źródeł prawa (odpowiednik 249 TWE). Jednocześnie do traktatu o EURATOM (który będzie się nazywał Traktatem o EWEA) dodano

art. 106a, zgodnie z którym pewne przepisy TUE i TFUE mają zastosowanie do traktatu o EWEA. Co ciekawe, wśród wymienionych tam artykułów nie ma art. 288, który określa nowy katalog źródeł prawa. Jeżeli traktować by zapisy *expressis verbis* zabraknie podstawy do stanowienia prawa w ramach EWEA.

Trudno powiedzieć, czy jest to niedopatrzenie czy celowe działanie. W pesymistycznie (mało prawdopodobnej) wersji brak takiego zapisu mógłby sparaliżować

działanie EWEA i doprowadzić nawet do konieczności ponownej ratyfikacji traktatu z Lizbony, uzupełnionego o brakujące zapisy. Bardziej prawdopodobnym wydaje się fakt, że prawo będzie stanowione w oparciu o przepisy odpowiednie do stanowienia prawa w ramach kompetencji dzielonych (badania naukowe, energetyka) niemniej jednak nie wynika to bezpośrednio z zapisów Traktatu.

Służby prawne Komisji Europejskiej do dnia 13 października 2009 nie udzieliły odpowiedzi na to pytanie.

1.6. Wnioski z analizy polityczno-ekonomiczno-społeczno-technologicznej i analizy prawnej

Badania nad energetyką termojądrową, mimo dużych dotychczasowych osiągnięć czeka w dalszym ciągu wiele wyzwań. Wyniki uzyskane olbrzymim nakładem pracy rzeszy naukowców są optymistyczne, lecz ich ostateczną weryfikacją będzie dopiero uruchomienie wielkich urządzeń, takich jak w niezbyt odległej przyszłości ITER i HIPER oraz w odleglejszej DEMO. Wszystko wskazuje na to, że badacze skupiający się nad rozwojem tej gałęzi energetyki nie powinni osiadać na laurach, lecz wręcz przeciwnie, jeszcze bardziej zintensyfikować swoje zaangażowanie.

Analiza sytuacji politycznej badań nad energetyką termojądrową wskazuje, że okoliczności ku temu są najlepsze właściwie od początku badań. Nacisk na opracowanie nowych źródeł energii staje się coraz mocniejszy głównie z uwagi na to, że zapewnienie komfortu energetycznego jest jednym ze strategicznych celów każdego rządu. Sytuacja jest potęgowana przez wzmacniające się obostrzenia ekologiczne ograniczające emisję dwutlenku węgla, składowanie materiałów radioaktywnych oraz ogólnie ingerencję człowieka w środowisko naturalne. W tym wypadku „czystość” reakcji termojądrowej oraz niewyczerpalność jej paliwa są niewątpliwie wielkim atutem. Kolejnym ważnym argumentem przemawiającym na korzyść obecnej sytuacji jest dynamiczny rozwój gospodarczy nowych uczestników w projektach fuzyjnych, takich jak Chiny czy Indie, dlatego też szczególnie istotne jest, aby światowa sytuacja polityczna sprzyjała międzynarodowej współpracy. Istotne jest, aby swobodnej wymiany informacji i uczestnictwa we wspólnych przedsięwzięciach nie zakłócały podziały ideologiczne i konflikty interesów poszczególnych krajów lub organizacji międzynarodowych, jak to miało miejsce w czasach Zimnej Wojny. Kraj i organizacje powinny pamiętać, że inicjatywa ITER została zapoczątkowana również w celu pojednania nieprzyjaznych sobie obozów i powinny kontynuować tę ideę. Na szczęście, obecnie wydaje się, że przełomowe decyzje mogące podzielić uczestników projektów (takie jak lokalizacja reaktora, uczestnictwo w kosztach i w personelu ośrodków, kontrakty na wykonywanie zleceń itp.) zostały już podjęte i osiągnięto satysfakcjonujący wszystkich kompromis. Osiągnięcia te wydają się być solidnym fundamentem przyszłych sukcesów projektów.

Wraz z poprawiającą się sytuacją polityczną powinna iść w parze poprawa, lub przynajmniej stabilność sytuacji ekonomicznej. Należy zwrócić uwagę, że ta jest jednak w dużej mierze uzależniona od mniej lub bardziej przewidywalnych kryzysów, w szczególności na rynku paliw kopalnych, które mogą zarówno motywować jak i demotywować badania. Wahania te mogą być jednak stabilizowane poprzez dobrą organizację jednostek koordynujących współpracę i zajmujących się rozdzielaniem funduszy. Wydaje się, że strategia podjęta w Europie w ramach 7. Programu Ramowego może zapewnić zrównoważony i efektywny przebieg badań zarówno nad magnetycznym, jak i laserowym wariantem fuzyji. Uformowanie organizacji koordynujących międzynarodową współpracę i przejrzyste określenie ich kompetencji pozwala mieć nadzieję, że badania będą przebiegać możliwie optymalnym torem. Utrata płynności finansowania byłaby jedną z gorszych rzeczy, jakie badaniom mogłyby się przydarzyć, dlatego też agencje nimi się zajmujące powinny

dokładać wszelkich starań by podtrzymywać przekonanie o celowości i efektywności swoich wysiłków.

Sprawą istotną zarówno dla politycznych jak i ekonomicznych aspektów rozwoju badań jest odpowiednie kształtowanie świadomości opinii publicznej. W tym przypadku wydaje się, że jakiegokolwiek problemy mogą wynikać jedynie z niedostatecznego do tej pory rozpowszechniania informacji dotyczących zarówno koniecznych środków jakie należy ponieść, jak i potencjalnych ogromnych korzyści jakie można osiągnąć dzięki rozwojowi energetyki termojądrowej. Negatywna opinia, powstała na skutek awarii w Czarnobylu i demonizowanych przez ekologów zagrożeń, nie powinna dłużej pokutować w społeczeństwie. Nie należy przeceniać wagi wystąpień społecznych, które np. w Polsce udaremniły budowę elektrowni jądrowej. Byłoby czarnym scenariuszem, gdyby protesty zakłóciły również budowanie ośrodków termojądrowych. Warto też zwrócić uwagę, że pozytywne nastawienie opinii publicznej do danej dziedziny może skutkować w uwzględnieniu jej w programach wyborczych partii politycznych. Poza czysto użytecznymi aspektami kształcenie i naukowe uświadamianie społeczeństwa powinno być również celem samym w sobie. Dlatego właśnie tak istotne jest opracowywanie materiałów informacyjnych i promocyjnych, organizowanie wykładów, prezentacji i praktycznych eksperymentów dla uczniów i studentów oraz kształcenie wykwalifikowanej kadry naukowej i technicznej, która w przyszłości przejmie pałeczkę od obecnych badaczy. Na sprostanie tym wymaganiom nadzieje budzi rozpoczęta w październiku 2009 roku realizacja projektu edukacyjnego FUSENET.

Nad nadziejami związanymi z możliwością budowy elektrowni termojądrowych nie można byłoby myśleć poważnie, gdyby nie olbrzymi postęp technologiczny, który dokonał się w drugiej połowie XX wieku i który nie przejawia tendencji do wyhamowania. Organizacje zajmujące się rozwojem badań plazmowych oraz sami badacze powinni dokładać wszelkich starań, by w pracy swej korzystać z najnowszych osiągnięć oferowanych przez wszystkie gałęzie przemysłu, nauki i techniki. Zadanie to jest znacznie utrudnione na skutek długoterminowości realizowanego zadania, dlatego też wszystkie prace i plany powinny być możliwie elastyczne, by móc zaadoptować rozwiązania nieznanne jeszcze podczas fazy tworzenia projektu. Otwartość na nowe technologie, urządzenia i materiały w badaniach nad fuzją termojądrową jest również szansą dla przemysłu oraz nauki zajmującej się innymi gałęziami wiedzy na zdobycie nowych rynków zbytu dla swoich produktów oraz określenie nowych obszarów współpracy naukowej. Ta druga zaleta jest szczególnie ważna w przypadku badań zogniskowanych nad fuzją laserową, ponieważ infrastruktura badawcza może tu być wykorzystana również do badań nad akceleracją cząstek, nad zjawiskami astrofizycznymi oraz innymi fundamentalnymi zagadnieniami fizyki związanej z uzyskiwaniem wielkich mocy. Rozwój naukowy i technologiczny jest najważniejszym z czynników pozwalających z optymizmem patrzeć na możliwość osiągnięcia sukcesu w budowie elektrowni termojądrowej.

Przepisy prawa międzynarodowego i europejskiego odnoszące się bezpośrednio do badań nad energetyką termojądrową dotyczą przede wszystkim współpracy na szczeblu międzynarodowym i mają na celu wspieranie tych badań, kwestii finansowania badań, transferu technologii itd. Normy, które takie badania powinny spełniać to nie tylko normy związane z metodyką, odnoszące się do rzetelności naukowej czy etyki ich prowadzenia. Badania nad energetyką termojądrową wiążą się z pewnym niepomijalnym ryzykiem dla zdrowia ludzi czy dla środowiska naturalnego, dlatego też istotne znaczenie powinny mieć w tym przypadku przepisy mające na celu zapewnienie bezpieczeństwa związanego z prowadzeniem takich badań.

Próżno jednak szukać aktu prawnego, który w sposób systematyczny uregulowałby podstawowe kwestie związane z prowadzeniem badań w omawianym zakresie. Regulacje,

które zapewnić mają odpowiedni poziom ochrony ogółu ludności, pracowników, środowiska naturalnego itd. są rozproszone w różnych aktach prawnych uchwalanych na różnych szczeblach (międzynarodowym – np. konwencje, europejskim – dyrektywy i rozporządzenia i krajowym – ustawy i rozporządzenia). Taka sytuacja ma miejsce nie tylko w Polsce, ale również w innych krajach (np. w Niemczech).

Badania nad energią uzyskiwaną dzięki zjawisku syntezy termojądrowej posiadają liczne cechy świadczące o ich osobliwości. Ich prowadzenie wymaga często wykorzystywania dużych ilości energii, zaś same eksperymenty prowadzone są w bardzo wysokich bądź bardzo niskich temperaturach. W badaniach tych wykorzystuje się substancje o działaniu promieniotwórczym bądź toksycznym. Jednocześnie są to badania o bardzo dużym potencjale. Brak kompleksowej regulacji tego rodzaju badań może spowodować utrudnienia w ich prowadzeniu a jednocześnie przyczynić się do wzrostu ryzyka z nimi związanego. Dlatego też należałoby rozważyć potrzebę wprowadzenia kompleksowej regulacji dotyczącej prowadzenia badań nad uzyskaniem energii dzięki wykorzystaniu fuzji. Byłaby to jedna z pierwszych, jeśli nie pierwsza z tego rodzaju regulacji w Europie.

Analiza sytuacji polityczno-ekonomiczno-społeczno-technologicznej i prawnej pozwala na optymistyczne spojrzenie na przyszłość energetyki termojądrowej, jak również wskazuje na fakt, że wysiłki mające na celu jej rozwój powinny być utrzymywane, a nawet wzmacniane. Tylko w ten sposób możliwe jest zapewnienie odpowiedniego finansowania będącego koniecznym dla utrzymania dotychczasowego tempa rozwoju tej gałęzi wiedzy i technologii.

1.7. Podsumowanie

Uczestnictwo w programach badawczych, mających na celu opanowanie fuzji termojądrowej dla celów energetycznych, jest zarówno dużym dobrodziejstwem jak i szansą dla polskiej nauki i polskiego przemysłu. Praca nad projektami zlecanymi przez EFDA i F4E, to nie tylko dofinansowanie do pracy naukowców oraz sprzętu naukowo-badawczego, lecz również kształcenie i zdobywanie wiedzy w dziedzinie, która w przyszłości może zaowocować dużym popytem na profesjonalną kadrę naukową i techniczną.

W odległej przyszłości, jeżeli cele projektu zostaną zrealizowane, nasz kraj nie musiałby się martwić o dostęp do technologii, zapewniającej tak ważne dla politycznej niezależności państwa, zaspokojenie zapotrzebowania energetycznego. Plany kręgów naukowych oraz rządowych w Polsce powinny zatem uwzględniać zapotrzebowania badań nad energetyką termojądrową, a nawet uczynić je jedną ze spraw priorytetowych, między innymi dlatego, że na jej polu wciąż jeszcze znajduje się wiele nisz, w których polskie ośrodki naukowe oraz firmy przemysłowe i usługowe mogą znaleźć swoje miejsce.

Polskie doświadczenie w tej dziedzinie powinno być budowane przez realizację projektów zleczanych przez międzynarodowe agencje, prowadzenie wspólnych prac z ośrodkami krajowymi i zagranicznymi oraz uczestnictwo polskich naukowców w eksperymentach wykonywanych w laboratoriach zagranicznych. Czynności te są obecnie realizowane głównie dzięki Asocjacji EURATOM-IFPiLM oraz związanemu z nią Krajowemu Punktowi Kontaktowemu i należy dbać o to, by w przyszłości były podtrzymywane i usprawniane.

Niestety, między innymi ze względu na złe nastawienie społeczne, Polska stała się zaściankiem Europy w technologii energetyki jądrowej. Należy dołożyć wszelkich starań, by sytuacja ta nie powtórzyła się i w przypadku energetyki opartej na zjawisku fuzji. W tym celu akcja popularyzacji tego zjawiska wśród uczniów i studentów prowadzona pod kierownictwem Asocjacji EURATOM-IFPiLM nabiera szczególnie istotnego znaczenia.

Analiza ekonomiczna jasno wskazuje, że najlepsze finansowanie, a co za tym idzie najbardziej harmonijny rozwój przypada dużym ośrodkom obsługującym wielkie urzędnia

fuzyjne. Niestety, Polska nie dysponuje tego typu urządzeniem i być może należałoby się zastanowić nad podjęciem kroków mających na celu stworzenie planów budowy takiego urządzenia w naszym kraju. Lokalizacja DEMO nie została jeszcze ustalona i nawet jeżeli obecnie wydaje się bardzo mało prawdopodobne, by reaktor ten mógł stanąć w Polsce, wszelkie plany przygotowania dla niego infrastruktury w naszym kraju mogą mieć jedynie pozytywny wydźwięk. Nawet jeżeli międzynarodowe organizacje uznają, że nie jesteśmy jeszcze przygotowani do podjęcia tak wielkiej inwestycji, być może zgodzą się na pomoc w budowie i dofinansowaniu alternatywnego urządzenia użytecznego dla badań termojądrowych. Starania te na pewno uzyskałyby dodatkowy atut, gdyby polskie prawodawstwo podjęło próbę usystematyzowania zagadnień legislacyjnych związanych z energetyką termojądrową.

Źródła informacji:

- [1] White Paper oraz Green Paper UE
- [2] *Synteza termojądrowa – źródło energii dla elektrowni przyszłości*, Urszula Woźnicka, Raport nr 4/POP (2008)
- [3] *Globalne zasoby energii pierwotnej a kryzys energetyczny*, Marek Bartosik, Panel naukowy: Strategia badań na rzecz rozwoju energetyki w Polsce, PAN (2009)
- [4] *ITER na rozdrożu*, Marek Rabiński, NEUTRONY Nr 2, 114 (2004)
- [5] *Strategia rozwoju atomistyki w Polsce*, Rada do spraw atomistyki (2006)
- [6] *Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine*, The Chernobyl Forum: 2003–2005, Second revised version, www.iaea.org/Publications/Booklets/Chernobyl/chernobyl.pdf
- [7] Patent H05H1/18 i H05H1/02 - Improvements in or relating to gas discharge apparatus for producing thermonuclear reactions
- [8] *Project Mattherhorn: an informal history*, Earl C. Tanner, Princeton University Plasma Physics Laboratory, Princeton, New Jersey, s. 77 (1977) (<http://www.worldcat.org/oclc/33015333>)
- [9] <https://www.llnl.gov/>
- [10] *From Obninsk Beyond: Nuclear Power Conference Looks to Future*, International Atomic Energy Agency (<http://www.iaea.org/NewsCenter/News/2004/obninsk.html>)
- [11] *Nuclear Power in Russia*, World Nuclear Association (<http://world-nuclear.org/info/inf45.htm>)
- [12] *Too Cheap to Meter?*, Canadian Nuclear Society (2006) (<http://www.cns-snc.ca/media/toocheap/toocheap.html>)
- [13] *Nuclear Energy: Principles, Practices and Prospects*, David Bodansky, s.32
- [14] *Nuclear Energy and the Fossil Fuels 'Drilling and Production Practice*, Hubbert Marion King, Spring Meeting of the Southern District, Division of Production, American Petroleum Institute, San Antonio, Texas: Shell Development Company, s. 22-27 (1956)
- [15] *Testing Hubbert*, Adam R. Brandt, Energy Policy, Elsevier **35** (5), s 3074 (2007)
- [16] Instytut Fizyki Plazmy I Laserowej Mikrosyntezy, <http://www.ifpilm.waw.pl>
- [17] Instytut Problemów Jądrowych w Świerku, <http://www.ipj.gov.pl>
- [18] U.S. Geological Survey, <http://www.usgs.gov/>
- [19] Projekt ITER, <http://www.iter.org>
- [20] Projekt HIPER, <http://www.hiper-laser.org>
- [21] <http://www.energetykatermojadrowa.pl/>
- [22] Princeton Plasma Physics Laboratory, USA, <http://www.pppl.gov/>
- [23] Intergovernmental Panel on Climate Change, <http://www.ipcc.ch/>
- [24] <http://fusionforenergy.europa.eu/>
- [25] European Fusion Development Agreement, <http://www.efda.org/>
- [26] <http://fire.pppl.gov/>
- [27] National Ignition Facility, <https://lasers.llnl.gov/>

- [28] <http://www.laserlab-europe.net/>
[29] Extreme Light Infrastructure, <http://www.extreme-light-infrastructure.eu/>

Akty prawne

Umowy międzynarodowe

1. *Umowa w sprawie powołania Międzynarodowej Organizacji Energii Termojądrowej na rzecz wspólnej realizacji projektu ITER*, Paryż, 22.11.2002
2. *Konwencja Bazylejska o kontroli transgranicznego przemieszczania i usuwania odpadów niebezpiecznych*. Bazylea, 22.03.1989

Akty prawa UE

1. Dyrektywa Rady 2003/122/EURATOM w sprawie kontroli wysoce radioaktywnych źródeł zamkniętych i odpadów radioaktywnych, Dz.U.UE.L.2003.346.57
2. Rozporządzenie Rady EURATOM 858/2004 określające stawki oraz warunki przyznawania dodatków specjalnych przewidzianych w art. 56 lit. c) regulaminu pracowniczego za niektóre prace o charakterze szczególnie uciążliwym Dz.U.UE.L.2004.161.14
3. Dyrektywa Rady 80/68/EWG w sprawie ochrony wód podziemnych przed zanieczyszczeniem spowodowanym przez niektóre substancje niebezpieczne, Dz.U.UE.L.1980.20.43
4. Dyrektywa Rady 91/689/EWG w sprawie odpadów niebezpiecznych, Dz.U.UE.L.1991.377.20
5. Dyrektywa 2006/11/WE Parlamentu Europejskiego i Rady, w sprawie zanieczyszczenia spowodowanego przez niektóre substancje niebezpieczne odprowadzane do środowiska wodnego Wspólnoty, Dz.U.UE.L.2006.64.52
6. Dyrektywa 1999/45/WE Parlamentu Europejskiego i Rady, w sprawie zbliżenia przepisów ustawowych, wykonawczych i administracyjnych Państw Członkowskich odnoszących się do klasyfikacji, pakowania i etykietowania preparatów niebezpiecznych, Dz.U.UE.L.1999.200.1
7. Rozporządzenie Rady (WE) Nr 428/2009 ustanawiające wspólnotowy system kontroli wywozu, transferu, pośrednictwa i tranzytu w odniesieniu do produktów podwójnego zastosowania, Dz.U.UE.L.09.134.1
8. Dyrektywa 2006/25/EU w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (sztucznym promieniowaniem optycznym)

Prawo polskie

1. *Ustawa Prawo atomowe* Dz. U. 2001.3.18 ze zm.
2. *Ustawa Prawo ochrony środowiska*, Tekst jednolity Dz. U. 2008.25.150
3. *Ustawa Prawo wodne*, Tekst jednolity Dz. U. 2005.239.2019 ze zm.
4. *Ustawa Kodeks pracy*, Tekst jednolity Dz.U.1998.21.94 ze zm.
5. *Rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego*, Dz. U. 2005.20.168
6. *Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie substancji, preparatów, czynników lub procesów technologicznych o działaniu rakotwórczym lub mutagennym w środowisku pracy*, Dz. U. 2004.280.2771 ze zm.
7. *Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy w sprawie ograniczeń, zakazów i warunków produkcji, obrotu lub stosowania substancji niebezpiecznych i preparatów niebezpiecznych oraz zawierających je produktów*, Dz. U. 2004.168.1762 ze zm.
8. *Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy*, Dz. U. 2004.168.1762 ze zm.
9. *Rozporządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 30 maja 1996 r. w sprawie przeprowadzania badań lekarskich pracowników, zakresu profilaktycznej opieki zdrowotnej nad pracownikami oraz orzeczeń lekarskich wydawanych do celów przewidzianych w Kodeksie pracy*, Dz. U. 2002.217.1833 ze zm.
10. *Rozporządzenie Ministra Środowiska. w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego, których wprowadzenie w ściekach przemysłowych do urządzeń kanalizacyjnych wymaga uzyskania pozwolenia wodno prawnego*, Dz. U. 2005.233.1988 ze zm.

11. *Rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie wysokości jednostkowych stawek kar za przekroczenia warunków wprowadzenia ścieków do wód lub do ziemi*, Dz. U. 2005.260.2177 ze zm.
12. *Rozporządzenie Ministra Budownictwa w sprawie sposobu realizacji obowiązków dostawców ścieków przemysłowych oraz warunków wprowadzania ścieków do urządzeń kanalizacyjnych*, Dz. U. 2006.136.964
13. *Rozporządzenie Ministra w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego*, Dz. U. 2006.137.984
14. Norma PN-EN 60825-1(2): Bezpieczeństwo urządzeń laserowych: Część 1: Klasyfikacja, wymagania i przewodnik użytkownika, Część 2: Bezpieczeństwo światłowodowych systemów telekomunikacyjnych, 2007
15. *Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, jako maksymalną dopuszczalną ekspozycję MDE*, Dz. U. nr 217 poz. 1833; zm. Dz. U. 2005 nr 221, poz. 1769
16. *Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dn. 20 kwietnia 2005 r. dotyczące pomiarów odpowiednich parametrów promieniowania laserowego na stanowiskach pracy*, Dz. U. nr 73, poz. 645